

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ А.С. ПУШКИНА»

Физико-математический факультет  
Кафедра общей и теоретической физики

**А.В. ДЕМИДЧИК**

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Электронный учебно-методический комплекс  
для студентов физических специальностей  
физико-математического факультета

Брест  
БрГУ имени А.С. Пушкина  
2020



*Начало*

*Содержание*



*Страница 1 из 163*

*Назад*

*На весь экран*

*Заккрыть*

УДК 378.147(07)  
ББК 74.480.26  
З 17

*Рекомендовано редакционно-издательским советом  
Учреждения образования  
«Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина»*

*Рецензенты  
Кафедра физики  
Учреждения образования  
«Брестский государственный технический университет»*

Кандидат педагогических наук, доцент,  
доцент кафедры методики преподавания физико-математических дисциплин  
Учреждения образования  
«Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина»  
А.С. Ивкович

Демидчик, А.В. Электротехника : электронный учебно-методический комплекс для студентов физико-математического факультета специальностей 1-02 05 02 «Физика и информатика» и 1-31 04 08 «Компьютерная физика» / А.В. Демидчик. – Брест : Изд-во БрГУ имени А.С. Пушкина, 2020. – 163 с.



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 2 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закреть](#)

Электронный учебно-методический комплекс предназначен для проведения лекционных, практических и лабораторных занятий по дисциплине «Электротехника» для специальности для специальности 1-02 05 02 «Физика и информатика» и специальности 1-31 04 08 «Компьютерная физика».

УДК 378.147(07)

ББК 74.480.26



*Начало*

*Содержание*



*Страница 3 из 163*

*Назад*

*На весь экран*

*Закреть*

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>6</b>
<b>СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА</b>	<b>11</b>
<b>УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ</b>	<b>14</b>
ТЕМА 1. ПОЛУЧЕНИЕ, ПЕРЕДАЧА, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ . . . . .	18
ТЕМА 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА . . . . .	24
2.1 Условия возникновения и существования тока. Постоянный ток. Направление тока. Сила и плотность тока, их единицы измерения. Источники тока . . . . .	24
2.2 Закон Ома для однородного участка цепи (интегральная и дифференциальная формы). Сопротивление. Способы соединения проводников . . . . .	35
2.3 ЭДС. Закон Ома для неоднородного участка и полной цепи . . . . .	40
2.4 Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца (дифференциальная и интегральная формы) . . . . .	44
2.5 Разветвленные цепи. Способы расчёта электрических цепей (метод узло-вых потенциалов, метод контурных токов, эквивалентного генератора и др.). Правила Кирхгофа . . . . .	47
ТЕМА 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА . . . . .	64
ТЕМА 4. ТРЁХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ . . . . .	70
ТЕМА 5. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ . . . . .	77
ТЕМА 6. ТРАНСФОРМАТОРЫ . . . . .	87
ТЕМА 7. МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА . . . . .	99
7.1 Классификация машин переменного тока . . . . .	99



Начало

Содержание



Страница 4 из 163

Назад

На весь экран

Заккрыть

7.2	Принцип работы и устройство асинхронного двигателя . . . . .	101
<b>ТЕМА 8. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА . . . . .</b>		<b>104</b>
8.1	Принцип работы и устройство генератора постоянного тока. Типы обмоток якоря . . . . .	104
<b>ТЕМА 9. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ . . .</b>		<b>111</b>

**ПЕРЕЧЕНЬ ЭКЗАМЕНАЦИОННЫХ ВОПРОСОВ . . . . . 129**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ . . . . . 130**

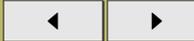
ПОСТОЯННЫЙ ТОК . . . . .	130
ОТВЕТЫ . . . . .	148
ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК . . . . .	152
ОТВЕТЫ . . . . .	161

**ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ . . . . . 163**



Начало

Содержание



Страница 5 из 163

Назад

На весь экран

Закреть

# ВВЕДЕНИЕ

Учебная дисциплина «Электротехника» является компонентом учреждения высшего образования. Актуальность изучения дисциплины данной дисциплины определяется ролью, которую она играет в современной науке и технике, культуре и образовании. Данная дисциплина тесно связана с курсом общей физики (раздел «Электричество и магнетизм») и теоретической физики (раздел «Электродинамика»), которые дают основные понятия и определения, необходимые в дальнейшем при изучении таких дисциплин, как «Компьютерные технологии в физическом эксперименте», «Физика компьютеров», «Технические средства и методы защиты информации», «Физическая электроника».

**Цель изучения дисциплины** – формирование знаний, умений и навыков в области электротехники, необходимых для будущей профессиональной деятельности.

## Задачи изучения дисциплины:

- формирование знаний об основных понятиях, методах и устройствах современной электроники и методах их исследования;
- формирование умений самостоятельно приобретать и практически использовать знания, наблюдать и объяснять физические процессы, протекающие в электронных устройствах.

Требования к уровню усвоения содержания дисциплины заданы образовательным стандартом высшего образования, в котором определены общенаучные умения, система предметных знаний и комплекс методологических знаний.

В результате изучения дисциплины студент должен **знать:**



Начало

Содержание



Страница 6 из 163

Назад

На весь экран

Закреть

- физическую сущность работы электротехнических аналоговых и цифровых электронных приборов и устройств;
- методы анализа и расчёта параметров электро- и радиотехнических цепей и устройств;
- тенденции развития электротехники, аналоговой и цифровой электроники, возможности использования электронных устройств в своей дальнейшей профессиональной деятельности;

**уметь:**

- производить измерения в электро- и радиотехнических целях;
- рассчитывать параметры цифровых, электро- и радиотехнических цепей и устройств;
- анализировать режимы работы цифровых, электро- и радиотехнических устройств;
- использовать инновационные технологии в решении типовых профессиональных задач.

**Требования к академическим компетенциям специалиста:** специалист должен уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач, уметь работать самостоятельно, иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.

**Требования к социально-личностным компетенциям специалиста:** специалист должен обладать качествами гражданственности, быть способным



Начало

Содержание



Страница 7 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

к социальному взаимодействию, обладать способностью к межличностным коммуникациям, владеть навыками здорового образа жизни.

**Требования к профессиональным компетенциям специалиста:** специалист должен быть способен применять знания теоретических и экспериментальных основ физики и математики, методов измерения физических величин, методов планирования, организации и ведения научно-производственной работы, средств автоматизации; владеть современными методами программирования, компьютерными методами сбора, хранения и обработки информации; пользоваться глобальными информационными ресурсами, новой научной литературой по физике, инновационным технологиям. Кроме того, специалист должен быть способен применять полученные знания, использовать новейшие открытия в естествознании, методы научного анализа, осуществлять поиск информации по перспективным направлениям развития отрасли, информационным технологиям, определять цели инноваций и способы их достижения, применять методы анализа и внедрения инноваций в научно-производственной деятельности.

В соответствии с целями и задачами дисциплины основными методами (технологиями) обучения являются: иллюстративный, проблемное обучение (проблемное изложение), частично-поисковый и исследовательский методы; коммуникативные технологии, основанные на активных формах и методах обучения; мультимедийное сопровождение лекций. Изучение материала опирается на использование знаний и навыков, полученных при изучении общей и теоретической физики, математических и информационных дисциплин.

На лекциях рассматриваются теоретические основы электротехники, аналоговой и цифровой электроники. Более глубоко анализируются фундаментальные, основополагающие, принципиальные вопросы курса и наиболее трудные темы курса, которыми студенты не могут овладеть самостоятельно.

Лабораторные работы нацелены на формирование практических умений сборки



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 8 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

и исследования электронных устройств. Особое внимание уделяется выяснению сущности физических процессов и законов, лежащих в основе работы различных радиоэлектронных устройств. В ходе работ студенты постоянно используют сочетание аппаратных и программных средств для осуществления лабораторных опытов, что отвечает современному стилю использования вычислительной техники в экспериментах.

На изучение учебной дисциплины «Электротехника» отводится:

для студентов специальности 1-02 05 02 «Физика и информатика» в третьем семестре 20 часов лекционных и 30 часов лабораторных занятий,  
для студентов специальности 1-31 04 08 «Компьютерная физика» в пятом семестре 28 часов лекционных и 24 часа лабораторных занятий.

Итоговый контроль знаний для студентов обеих специальностей осуществляется в форме экзамена.

Структура учебно-методического комплекса:

- введение;
- основная часть, содержащая теоретический и практический разделы;
- вспомогательная часть, в которой состоящая из содержания учебного материала, учебно-методической карты и перечня экзаменационных вопросов;
- контролирующая часть (тестовые задания).

Цель учебно-методического комплекса – систематизировать теоретический материал по учебной дисциплине «Электротехника», связав его с материалом, преподаваемым в общем курсе физики.

Учебно-методический комплекс разработан в соответствии с требованиями ОСВО 1-02 05 02-2013. Специальность 1-02 05 02 Физика и информатика, утверждённого и введённого в действие постановлением Министерства образования



Начало

Содержание



Страница 9 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

Республики Беларусь от 30.08.2013, № 87, а также на основе ОСВО 1-31 04 08-2018. Специальность 1-31 04 08 Компьютерная физика, утверждённого и введённого в действие постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 22.12.2018, № 124.

Содержание комплекса соответствует учебным планам специальностей 1-02 05 02 «Физика и информатика» и 1-31 04 08 «Компьютерная физика».

Учебная программа для специальности 1-02 05 02 «Физика и информатика» от 04.07.2019, регистрационный № УД-20-011-19/уч.

Учебная программа для специальности 1-31 04 08 «Компьютерная физика» от 30.06.2016, регистрационный № УД-28-001-16/уч.



*Начало*

*Содержание*



*Страница 10 из 163*

*Назад*

*На весь экран*

*Заккрыть*

# СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

## 1. ПОЛУЧЕНИЕ, ПЕРЕДАЧА, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Производство, передача и распределение электрической энергии. Электрические цепи, приемники и источники электроэнергии.

## 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ЭДС, внутреннее сопротивление источника. Законы Ома и Джоуля-Ленца. Анализ цепей, правила Кирхгофа.

## 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Переменный ток, напряжение, ЭДС. Анализ колебательных процессов, метод комплексных амплитуд. Правила Кирхгофа для КА.

Анализ цепей методом КА, резонанс напряжений. Векторные диаграммы КА. Использование векторных диаграмм на примере параллельной RLC-цепи, резонанс токов.

Мощность в цепи переменного тока, понятия активной, реактивной, полной мощностей, треугольник мощностей. Коэффициент мощности. Выражение мощностей через КА. Действующие значения переменного тока, ЭДС, напряжения.

## 4. ТРЁХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Трёхфазные цепи, трехфазный генератор, соединения фаз генератора и приемника. Понятия линейных и фазных величин. Соотношения между линейными и фазными величинами при соединении нагрузки звездой и треугольником.

## 5. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Физическая сущность измерений. Аналоговые стрелочные приборы, магнитоэлектрический, электромагнитный, электродинамический измерительные механизмы. Измерение токов, напряжений, сопротивления постоянному току стрелочными приборами. Измерение активной мощности. Погрешности измерений и классы точности приборов.



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 11 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

## 6. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Физическая сущность трансформирования, устройство однофазного трансформатора, типы магнитопроводов. Анализ процессов методом КА. Передача мощности в трансформаторе. Понятие габаритной мощности трансформатора. Удельная мощность. Автотрансформатор. Трёхфазные трансформаторы. Понятие электронного трансформатора. Измерительные трансформаторы.

## 7. МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Понятие машины, электрическая машина. Типы электрических машин. Машины переменного тока, получение вращающегося магнитного поля в двухфазной и трехфазной системах переменного тока. Статоры машин переменного тока. Асинхронная машина, конструкции ротора. Анализ рамки во вращающемся магнитном поле, вращающий момент ротора, режимы работы асинхронной машины. Механическая характеристика асинхронного двигателя и методы ее регулирования. Электронное управление асинхронным двигателем.

Включение трехфазного двигателя в однофазную сеть Однофазные асинхронные двигатели, конденсаторный двигатель Получение вращающего момента в однофазном статоре, проблема пуска. Двигатель с пусковой обмоткой, двигатель с расщеплёнными полюсами.

Синхронные машины, режим генератора, двигателя, нейтральный. Соотношение ЭДС, напряжения и тока в произвольной фазе синхронного генератора, реакция якоря, понятие нагрузочной характеристики генератора, стабилизация амплитуды напряжения. Электромагнитный момент синхронной машины. Работа синхронной машины параллельно с сетью, поток мощности, режим генератора и двигателя. Маломощные синхронные двигатели.

## 8. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Коллекторная машина постоянного тока, принцип работы, щеточно-коллекторный узел, обмотка ротора. Генератор постоянного тока, ЭДС якоря, способы возбуждения. Двигатель постоянного тока, механические характеристики



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 12 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

при различных возбуждениях. Бесколлекторные двигатели постоянного тока.

## 9. ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Собственная и примесная проводимость полупроводников. p-n-переход. Включение p-n-перехода во внешнюю цепь. Полупроводниковые диоды и транзисторы, их виды, конструктивные особенности, обозначение на схемах.



Начало

Содержание



Страница 13 из 163

Назад

На весь экран

Закреть

# УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Для специальности 1-02 05 02 «Физика и информатика»

Номер раздела	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Средства обучения (оборудование, учебно-наглядные пособия и др.)	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Количество часов УСР		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИКА (50 ч.)</b>		20			30		видеопроектор, ЭВМ, калькулятор	Защита лабораторной работы, экзамен
1	Получение, передача, распределение и потребление электроэнергии	2					видеопроектор, ЭВМ	



Начало

Содержание



Страница 14 из 163

Назад

На весь экран

Заккрыть

2	Электрические цепи постоянного тока	2			12		видеопроектор, ЭВМ	Защита лабораторной работы
3	Электрические цепи переменного тока	4			6		видеопроектор, ЭВМ	Защита лабораторной работы
4	Трёхфазные электрические цепи	2					видеопроектор, ЭВМ	
5	Электроизмерительные приборы	2			6		видеопроектор, ЭВМ	
6	Трансформаторы	2			2		видеопроектор, ЭВМ	Защита лабораторной работы
7	Машины переменного тока	2					видеопроектор, ЭВМ	Защита лабораторной работы
8	Машины постоянного тока	2					видеопроектор, ЭВМ	Защита лабораторной работы
9	Проводимость полупроводников	2			4		видеопроектор, ЭВМ	Защита лабораторной работы



[Начало](#)

[Содержание](#)



Страница 15 из 163

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закреть](#)

**Для специальности 1-31 04 08 «Компьютерная физика»**

Номер раздела	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Средства обучения (оборудование, учебно-наглядные пособия и др.)	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Количество часов УСП		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИКА (52 ч.)</b>		28			24		видеопроектор, ЭВМ, калькулятор	Защита лабораторной работы, экзамен
1	Получение, передача, распределение и потребление электроэнергии	2					видеопроектор, ЭВМ	
2	Электрические цепи постоянного тока	4			12		видеопроектор, ЭВМ	Защита лабораторной работы



*Начало*

*Содержание*



*Страница 16 из 163*

*Назад*

*На весь экран*

*Закреть*

3	Электрические цепи переменного тока	4			6		видеопроектор, ЭВМ	Защита лабораторной работы
4	Трёхфазные электрические цепи	4					видеопроектор, ЭВМ	
5	Электроизмерительные приборы	2					видеопроектор, ЭВМ	
6	Трансформаторы	2			2		видеопроектор, ЭВМ	Защита лабораторной работы
7	Машины переменного тока	4					видеопроектор, ЭВМ	Защита лабораторной работы
8	Машины постоянного тока	2					видеопроектор, ЭВМ	Защита лабораторной работы
9	Проводимость полупроводников	4			4		видеопроектор, ЭВМ	Защита лабораторной работы



[Начало](#)

[Содержание](#)



Страница 17 из 163

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закреть](#)

## ТЕМА 1. ПОЛУЧЕНИЕ, ПЕРЕДАЧА, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Энергосистема – совокупность энергетических ресурсов всех видов и технических средств для их добычи, преобразования, распределения и использования, обеспечивающих комплексное энергоснабжение потребителей. Электроэнергетическая система включает:

1. Электростанции
2. Электрические сети
3. Электрические подстанции
4. Линии электропередачи
5. Электроприёмники потребителей

Как правило, энергосистема наряду с централизованным электроснабжением обеспечивает и централизованное теплоснабжение городов и промышленных центров. Все элементы энергосистемы объединены общим процессом производства, передачи и потребления электроэнергии (и отчасти тепла) и должны работать в едином режиме. Существуют также автономные энергосистемы, не связанные с другими, напр. Отдельного предприятия, корабля, самолёта и т.п.

В зависимости от источника энергии различают следующие типы электростанций:

1. Тепловые электростанции (ТЭС) (рисунок 1.1), использующие природное топливо. Они делятся на конденсационные (КЭС) теплофикационные (ТЭЦ);
2. Гидравлические электростанции (ГЭС) (рисунок 1.2) и гидроаккумулирующие (ГАЭС), использующие энергию падающей воды;
3. Атомные электростанции (АЭС) (рисунок 1.3), использующие энергию ядерного распада;
4. Дизельные электростанции (ДЭС) (рисунок 1.4);
5. ТЭС с газотурбинными (ГТУ) и парогазовыми установками (ПГУ);



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 18 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Заккрыть](#)



Рисунок 1.1

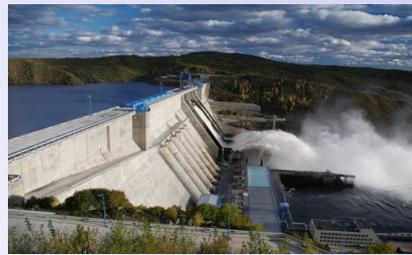


Рисунок 1.2



Рисунок 1.3



Рисунок 1.4



Рисунок 1.5



Рисунок 1.6



[Начало](#)

[Содержание](#)

[◀](#) [▶](#)

[◀◀](#) [▶▶](#)

Страница 19 из 163

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закреть](#)



Рисунок 1.7



Рисунок 1.8

6. Солнечные электростанции (СЭС) (рисунок 1.5);
7. Ветровые электростанции (ВЭС) (рисунок 1.6);
8. Геотермальные электростанции (ГЕОТЭС) (рисунок 1.7);
9. Приливные электростанции (ПЭС) (рисунок 1.8);

Наиболее часто в современной энергетике выделяют традиционную и нетрадиционную энергетику. Традиционную энергетику разделяют на электроэнергетику и теплоэнергетику. Наиболее удобный вид энергии – электрическая, которая может считаться основой цивилизации. Преобразование первичной энергии в электрическую производится на электростанциях.

Примерно 70% мировой электроэнергии вырабатывают на ТЭС. Они делятся на конденсационные тепловые электростанции (КЭС), вырабатывающие только электроэнергию, и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), которые производят электроэнергию и теплоту.

Линия электропередачи (ЛЭП) – один из компонентов электрической сети. Различают воздушные и кабельные линии электропередачи.

Воздушная линия электропередачи (ВЛ) – устройство, предназначенное для передачи или распределения электрической энергии по проводам, находящимся на открытом воздухе и прикрепленным с помощью траверс, изоляторов и арматуры к



Начало

Содержание



Страница 20 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

опорам или другим сооружениям.

В состав подобных воздушных линий входят:

- провода, являющиеся основной составляющей любой линии электропередач;
- траверсы, необходимы для крепления проводов с опорными элементами;
- изоляторы;
- опорные системы;
- контур заземления;
- разрядники;
- молниеотводчики.

Сами воздушные высоковольтные линии электропередач делятся:

По роду тока:

1. Переменного
2. Постоянного

В основе своей ВЛ служат для передачи переменного тока. Редко можно встретить второй вариант. Обычно он используется для питания сети контактной или связной для обеспечения связью несколько энергосистем, есть и другие виды.

По напряжению воздушные линии делятся по номиналу этого показателя. Перечислим их:

1. для переменного тока: 0,4; 6; 10; 35; 110; 150; 220; 330; 400; 500; 750; 1150 киловольт (кВ);
2. для постоянного используется напряжение – 400 кВ.

При этом линии электропередач напряжением до 1,0 кВ считаются низшего класса, от 1,0 до 35 кВ – среднего, от 110 до 220 кВ – высокого, от 330 до 500



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 21 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

кВ – сверхвысокого, выше 750 кВ ультравысокого. Отметим, что все эти группы отличаются друг от друга требованиями к расчетным условиям и конструктивным особенностям

Напряжение ЛЭП соответствует их назначению.

- Высоковольтная линия напряжением свыше 500 кВ считаются сверхдальними, они предназначаются для соединения отдельных энергосистем.
- Высоковольтная линия напряжением 220, 330 кВ считаются магистральными. Их основное назначение – соединить между собой мощные электростанции, отдельные энергосистемы, а также электростанции внутри данных систем.
- Воздушные ЛЭП напряжением 35–150 кВ устанавливаются между потребителями (большими предприятиями или населенными пунктами) и распределительными пунктами.
- ВЛ до 20 кВ используются в качестве линий электропередач, которые непосредственно подводят электрический ток к потребителю.

### **Кабельные ЛЭП**

Кабельные линии электропередач – это закрытые в изоляцию кабели. Обычно кабельные ЛЭП представляют собой несколько линий, установленные рядом друг с другом в параллельном направлении. Длины кабеля для этого бывает недостаточно, поэтому между участками устанавливаются соединительные муфты. Кстати, нередко можно встретить кабельные линии электропередач с масломнаполнением, поэтому такие сети часто укомплектовываются специальной малонаполнительной аппаратурой и системой сигнализации, которая реагирует на давление масла внутри кабеля.

Если говорить о классификации кабельных линий, то они идентичны классификации линий воздушных. Отличительные особенности есть, но их не так



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 22 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

много. В основном эти две категории отличаются между собой способом прокладки, а также конструктивными особенностями. К примеру, по типу прокладки кабельные ЛЭП делятся на подземные, подводные и по сооружениям.

Последняя классификация в кабельных ЛЭП – это тип изоляции. В принципе, основных видов два: твердая изоляция и жидкостная. К первой относятся изоляционные оплетки из полимеров (поливинилхлорид, сшитый полиэтилен, этилен–пропиленовая резина), а также другие виды, к примеру, промасленная бумага, резино–бумажная оплетка. К жидкостным изоляторам относится нефтяное масло. Есть и другие виды изоляции, к примеру, специальными газами или другими видами твердых материалов. Но их используют сегодня очень редко.

Потребителем электрической энергии называется электроприемник или группа электроприемников. Приемником электрической энергии называется аппарат, агрегат, механизм, предназначенный для преобразования электрической энергии в другой вид энергии. Приёмником электроэнергии является электрическая часть технологической установки или механизма, получающая энергию из сети и преобразует её в другие виды энергии: механическую, тепловую, световую или электроэнергию с иными параметрами (по роду тока, напряжению, частоте). Некоторые технологические установки имеют несколько электроприёмников: станки, краны, прокатные станы и т.п.

Электроприёмники промышленных предприятий классифицируются по следующим признакам: напряжению, роду тока, его частоте, единичной мощности, надёжности электроснабжения, режиму работы, технологическому назначению, производственным связям, территориальному размещению.

По напряжению ЭП подразделяются на две группы: до 1000 В и свыше 1000 В.

По роду тока ЭП подразделяются на приёмники переменного тока промышленной частоты (50 Гц), постоянного тока и переменного тока частотой, отличной от 50 Гц (повышенной или пониженной).



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 23 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закреть](#)

## ТЕМА 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 2.1 Условия возникновения и существования тока. Постоянный ток. Направление тока. Сила и плотность тока, их единицы измерения. Источники тока

**Электрическим током** называют направленное (упорядоченное) движение электрически заряженных тел (частиц) в пространстве.

Количество таких частиц влияет на проводимость материала – различают проводники, полупроводники, диэлектрики, изоляторы.

В металлах такими частицами являются электроны, в электролитах – положительные и отрицательные ионы (катионы и анионы), в ионизированных газах – ионы и электроны, в полупроводниках – электроны и «дырки».

Для возникновения и поддержания тока в какой-либо среде необходимо выполнение двух условий:

1) наличие в среде свободных электрических зарядов (носители заряда могут присутствовать в среде изначально, либо образовываться при содействии внешних факторов (ионизаторов, электромагнитного поля, температуры);

2) создание в среде электрического поля (в отсутствие электрического поля их передвижения хаотичны, а при подключении к двум точкам вещества разности потенциалов становятся направленными – от одного потенциала к другому).

Наличие тока в электроцепи всегда проявляется каким-либо действием. Например, работа при конкретной нагрузке или какое-то сопутствующее явление. Следовательно, именно действие электротока говорит о его присутствии как таковом в той или иной электроцепи. То есть, если работает нагрузка, то ток имеет место быть.

Известно, что электрический ток вызывает различного рода действия. Например, к таковым относятся **тепловые, химические, магнитные, механические или световые**. При этом различные действия электрического тока способны проявлять



Начало

Содержание



Страница 24 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

себя одновременно.

### **Тепловое явление**

Известно, что температура проводника повышается при прохождении через него тока. В качестве таких проводников выступают различные металлы или их расплавы, полуметаллы или полупроводники, а также электролиты и плазма. Например, при пропускании через проволоку из нихрома электрического тока происходит ее сильное нагревание. Данное явление используют в приборах нагрева, а именно: в электрических чайниках, кипятильниках, обогревателях и т.п. Электродуговая сварка отличается самой большой температурой, а именно нагрев электродуги может достигать до 7000 градусов по Цельсию. При такой температуре достигается легкое расплавление металла.

Количество выделяемой теплоты напрямую зависит от того, какое напряжение было приложено к данному участку, а также от электротока и времени его прохождения по цепи.

Для расчета объемов выделяемой теплоты используется или напряжение, или сила тока. При этом необходимо знание показателя сопротивления в электроцепи, поскольку именно оно провоцирует нагрев из-за ограничения тока. Также количество тепла можно определить при помощи тока и напряжения.

### **Химическое явление**

Химическое действие электротока заключается в электролизе ионов в электролите. Анод при электролизе присоединяет к себе анионы, катод – катионы. Иными словами, во время электролиза на электродах источника тока происходит выделение определенных веществ.

Приведем пример: в кислотный, щелочной или же солевой раствор опускаются два электрода. После пропускается по электроцепи ток, что провоцирует создание положительного заряда на одном из электродов, на другом – отрицательного. Ионы, которые находятся в растворе, откладываются на электроде с иным зарядом.

Химическое действие электротока применяется в промышленности. Так,



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 25 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

используя данное явление, осуществляют разложение воды на кислород и водород. Кроме того, при помощи электролиза получают металлы в их чистом виде, а также осуществляют гальваническое покрытие поверхности.

### **Магнитное явление**

Электрический ток в проводнике любого агрегатного состояния создает магнитное поле. Иными словами, проводник при электрическом токе наделяется магнитными свойствами. Таким образом, если к проводнику, в котором протекает электроток, приблизить магнитную стрелку компаса, то та начнет поворачиваться и займет к проводнику перпендикулярное положение. Если же на сердечник из железа намотать данный проводник и пропустить сквозь него постоянный ток, то данный сердечник примет свойства электромагнита.

Природа магнитного поля всегда заключается в наличии электрического тока. Объясним: движущиеся заряды (заряженные частицы) образуют магнитное поле. При этом токи противоположного направления отталкиваются, а одинакового направления – притягиваются. Данное взаимодействие обосновано магнитным и механическим взаимодействием магнитных полей электротоков. Выходит, что магнитное взаимодействие токов первостепенно.

Магнитное действие применяется в трансформаторах и электромагнитах.

### **Световое явление**

Самый простой пример светового действия – лампа накаливания. В данном источнике света спираль достигает нужной температурной величины посредством проходящего сквозь нее тока до состояния белого каления. Тем самым и излучается свет. В традиционной лампочке накаливания всего лишь пять процентов всей электроэнергии расходуется на свет, остальная же – преобразуется в тепло.

Более современные аналоги, например, люминесцентные лампы наиболее эффективно преобразуют электроэнергию в свет. То есть, около двадцати процентов всей энергии лежит в основе света. Люминофор принимает УФ-излучение, идущее от разряда, что возникает в ртутных парах или в инертных газах.



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 26 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

Самая эффективная реализация светового действия тока происходит в светодиодных источниках света. Электрический ток, проходя через р-п-переход, провоцирует рекомбинацию носителей заряда с излучением фотонов. Лучшими излучателями света являются прямозонные полупроводники. Изменяя состав данных полупроводников, возможно создание светодиодов для различных световых волн (разной длины и диапазона). Коэффициент полезного действия светодиода достигает 50 процентов.

### **Механическое явление**

Вокруг проводника с электрическим током возникает магнитное поле. Все магнитные действия преобразуются в движение. Примером служат электрические двигатели, магнитные подъемные установки и др.

Для измерения электрического тока пользуются понятиями силы тока и его плотности. Измеряется сила тока специальным прибором – амперметром.

**Амперметрами** называют приборы, служащие для измерения силы тока в цепи.

При измерениях амперметр включают в цепь последовательно тому участку, на котором измеряется величина тока. Поэтому амперметры должны иметь очень малое собственное сопротивление, чтобы их включение не изменяло заметно величины тока в цепи. Для измерения малых токов, применяют микро- и миллиамперметры. Для расширения пределов измерения амперметров к ним присоединяют шунт.

**Шунт** – это малое сопротивление  $r_{ш}$ , включенное в цепь параллельно сопротивлению амперметра, вследствие чего на амперметр ответвляется только малая часть из полного тока, текущего по магистральному проводу (рисунок 2.1).

Введем коэффициент увеличения предела измерения амперметра –  $n_A$  :

$$n_A = \frac{I}{I_A}$$

где  $I$  – величина тока в магистральной цепи,  $I_A$  – величина тока, текущего через амперметр.



Начало

Содержание



Страница 27 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

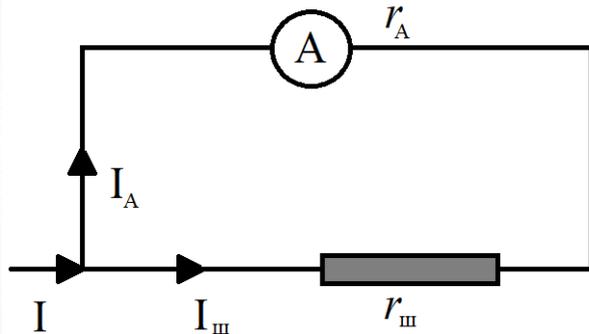


Рисунок 2.1

Если  $r_A$  – сопротивление амперметра, тогда между сопротивлением шунта и амперметра связь выражается соотношением:

$$r_{ш} = \frac{r_A}{n - 1}.$$

**Гальванометрами** называют чувствительные приборы, служащие для измерения весьма малых токов, напряжений и количества электричества. По принципу действия и устройству гальванометры бывают магнитоэлектрические с подвижным магнитом, струнные, термогальванометры и электродинамометры. Чаще всего гальванометры применяются для измерения тока и напряжения в цепях постоянного тока. Подсоединив к ним шунт или добавочное сопротивление, их превращают в амперметр или вольтметр с соответствующими пределами измерений.

**Источник тока** – это устройство, в котором происходит преобразование какого-либо вида энергии в электрическую энергию.



Начало

Содержание



Страница 28 из 163

Назад

На весь экран

Заккрыть

В любом источнике тока совершается работа по разделению положительно и отрицательно заряженных частиц, которые накапливаются на полюсах источника.

Существуют различные виды источников тока:

### 1) Механический источник тока

Механическая энергия преобразуется в электрическую энергию.



Рисунок 2.2

К ним относятся: электрофорная машина (рисунок 2.2) (диски машины приводятся во вращение в противоположных направлениях. В результате трения щеток о диски на кондукторах машины накапливаются заряды противоположного знака), динамо-машина, генераторы.

### 2) Тепловой источник тока

Внутренняя энергия преобразуется в электрическую энергию.

Например, термоэлемент (рисунок 2.3) – две проволоки из разных металлов необходимо спаять с одного края, затем нагреть место спая, тогда между другими концами этих проволок появится напряжение.

Применяются в термодатчиках и на геотермальных электростанциях.



Начало

Содержание



Страница 29 из 163

Назад

На весь экран

Закреть

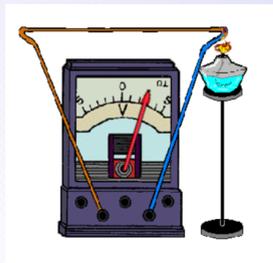


Рисунок 2.3

### 3) Световой источник тока

Энергия света преобразуется в электрическую энергию.

Например, фотоэлемент – при освещении некоторых полупроводников световая энергия превращается в электрическую. Из фотоэлементов составлены солнечные батареи.

Применяются в солнечных батареях, световых датчиках, калькуляторах, видеокамерах.

### 4) Химический источник тока

В результате химических реакций внутренняя энергия преобразуется в электрическую.

Например, гальванический элемент (рисунок 2.4) – в цинковый сосуд вставлен угольный стержень. Стержень помещен в плотняный мешочек, наполненный смесью оксида марганца с углем. В элементе используют клейстер из муки на растворе нашатыря. При взаимодействии нашатыря с цинком, цинк приобретает отрицательный заряд, а угольный стержень – положительный заряд. Между заряженным стержнем и цинковым сосудом возникает электрическое поле. В таком источнике тока уголь является положительным электродом, а цинковый сосуд – отрицательным электродом.



Начало

Содержание



Страница 30 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть



Рисунок 2.4

Из нескольких гальванических элементов можно составить батарею (рисунок 2.5).

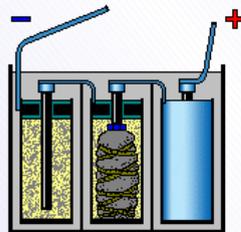


Рисунок 2.5

Источники тока на основе гальванических элементов применяются в бытовых автономных электроприборах, источниках бесперебойного питания.

Аккумуляторы – в автомобилях, электромобилях, сотовых телефонах.

Условное обозначение источника тока на электрической схеме:



Начало

Содержание

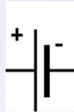


Страница 31 из 163

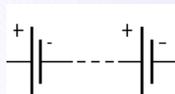
Назад

На весь экран

Закреть



или батареи, состоящей из нескольких источников:



**Постоянный ток** – электрический ток, который с течением времени не изменяется по величине и направлению.

Постоянный ток является разновидностью однонаправленного тока. Однонаправленный ток – это электрический ток, не изменяющий своего направления.

Условно принято считать, что электрический ток в электрическом поле имеет направление от точек с большими потенциалами к точкам с меньшими потенциалами. Это значит, что направление постоянного электрического тока всегда совпадает с направлением движения положительных электрических зарядов, например положительных ионов в электролитах и газах. Там же, где электрический ток создаётся только движением потока отрицательно заряженных частиц, например, потока свободных электронов в металлах, за направление электрического тока принимают направление, противоположное движению электронов.

Мерой интенсивности движения электрических зарядов в проводниках является **сила тока  $I$**  :

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

Если при равномерном движении электрических зарядов по проводнику за время  $t$  протекло количество электричества  $q$ , то ток в проводнике можно выразить



Начало

Содержание



Страница 32 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

формулой:

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

отсюда видна размерность силы тока в СИ:  $1\text{А} = \frac{\text{Кл}}{\text{с}}$ .

Сила тока измеряется амперметром, он включается в цепь так, чтобы через него проходил весь измеряемый ток, то есть последовательно.

**Плотность тока** – более подробная характеристика тока, чем сила тока  $I$ . Плотность тока характеризует ток локально, в каждой точке пространства, а  $I$  – это интегральная характеристика, привязанная не к точке, а к области пространства, в которой протекает ток.

Модуль вектора плотности тока численно равен отношению силы тока  $\partial I$  через элементарную площадку  $\partial S$ , перпендикулярную направлению движения носителей заряда, к ее площади:

$$j = \frac{\partial I}{\partial S_{\perp}}. \quad (1)$$

Единица плотности тока –  $\text{А}/\text{м}^2$ .

Ясно, что плотность тока связана с плотностью свободных зарядов  $\rho$  и с дрейфовой скоростью их движения:

$$\vec{j} = \rho \vec{u}_{\text{др}}$$

За направление вектора  $j$  принимают направление вектора  $\vec{u}_{\text{др}}$  положительных носителей зарядов (раньше не знали о существовании отрицательных носителей зарядов и приняли так). Если носителями являются как положительные, так и отрицательные заряды, то плотность тока определяется формулой:

$$\vec{j} = q_+ n_+ \vec{u}_{\text{др}+} + q_- n_- \vec{u}_{\text{др}-}$$



Начало

Содержание



Страница 33 из 163

Назад

На весь экран

Закреть

где  $q_+n_+$  и  $q_-n_-$  – объемные плотности соответствующих зарядов.

Поле вектора  $j$  можно изобразить графически с помощью линий тока, которые проводят так же, как и линии вектора напряженности  $\vec{E}$  (рисунок 2.6).

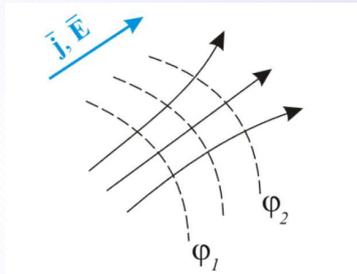


Рисунок 2.6



Начало

Содержание



Страница 34 из 163

Назад

На весь экран

Закреть

## 2.2 Закон Ома для однородного участка цепи (интегральная и дифференциальная формы). Сопротивление. Способы соединения проводников

**Закон Ома для участка цепи** гласит: ток прямо пропорционален напряжению и обратно пропорционален сопротивлению. **Закон Ома в интегральной форме** для однородного участка цепи (не содержащего ЭДС) записывается следующей формулой:

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

где  $R$  – электрическое сопротивление.

**Электрическим сопротивлением** проводника обусловлено явление преобразования электрической энергии в тепловую при прохождении электрического тока по проводнику.

Единица сопротивления в СИ – 1 Ом.

Факторы, влияющие на сопротивление проводника:

- 1) Материал, из которого он изготовлен.
- 2) Температура.
- 3) Размер.
- 4) Длина.
- 5) Коррозия.

**Электрическая проводимость** характеризует способность тела проводить электрический ток. Проводимость – величина обратная сопротивлению. Электрическая проводимость определяется как  $\frac{1}{R}$ . Обычно проводимость обозначается буквой  $G$ .

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

Измеряется проводимость в Сименсах: [См]=[1/Ом].

Для однородного линейного проводника выразим  $R$  через  $\rho$  :



Начало

Содержание



Страница 35 из 163

Назад

На весь экран

Заккрыть

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2)$$

где  $\rho$  – удельное объемное сопротивление;  $[\rho] = [\text{Ом} \cdot \text{м}]$ .

Найдем связь между  $\vec{j}$  и  $\vec{E}$  в бесконечно малом объеме.

Исходя из закона Ома имеем

$$I = \frac{U}{R} = \frac{E dl}{\rho \frac{dS}{dS}} = \frac{E dS}{\rho}.$$

А мы знаем, что  $\vec{j} = \frac{dl}{dS} = \frac{1}{\rho} E$ , или  $\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E}$ . Отсюда можно записать:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

– это запись **закона Ома в дифференциальной форме**.

Здесь  $\sigma = \frac{1}{\rho}$  удельная электропроводность.

Размерность  $[\sigma] - [\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}]$ .

Плотность тока можно выразить через заряд электрона  $e$ , количество зарядов  $n$  и дрейфовую скорость  $\vec{v}$ :

$$\vec{j} = en\vec{v}.$$

Пусть  $b = \frac{\vec{v}}{E}$ , тогда  $\vec{v} = b\vec{E}$  и плотность тока  $\vec{j} = enb\vec{E}$ .

Если удельную электропроводность  $\sigma$  выразить через  $e$ ,  $n$  и  $b$  ( $\sigma = enb$ ), то вновь получим выражение **закона Ома в дифференциальной форме**:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}.$$



Начало

Содержание



Страница 36 из 163

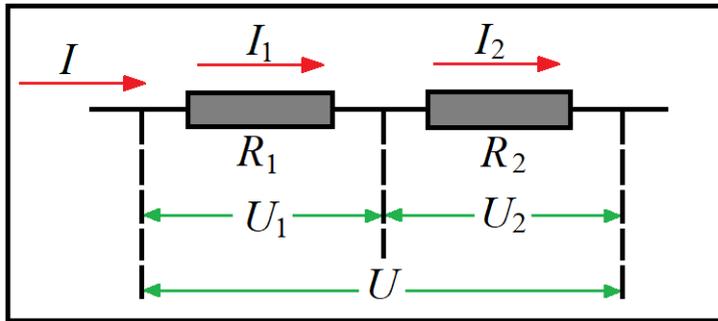
Назад

На весь экран

Закрыть

Проводники в электрических цепях могут соединяться последовательно и параллельно.

При **последовательном соединении** проводников сила тока во всех проводниках одинакова:  $I_1 = I_2 = I$ .



*Последовательное соединение проводников*

По закону Ома, напряжения  $U_1$  и  $U_2$  на проводниках равны

$$U_1 = IR_1, U_2 = IR_2.$$

Общее напряжение  $U$  на обоих проводниках равно сумме напряжений  $U_1$  и  $U_2$  :

$$U = U_1 + U_2 = I(R_1 + R_2) = IR,$$

где  $R$  – электрическое сопротивление всей цепи.

Отсюда следует:

$$R = R_1 + R_2. \quad (3)$$

При последовательном соединении полное сопротивление цепи равно сумме сопротивлений отдельных проводников. Этот результат справедлив для любого числа последовательно соединенных проводников.



Начало

Содержание



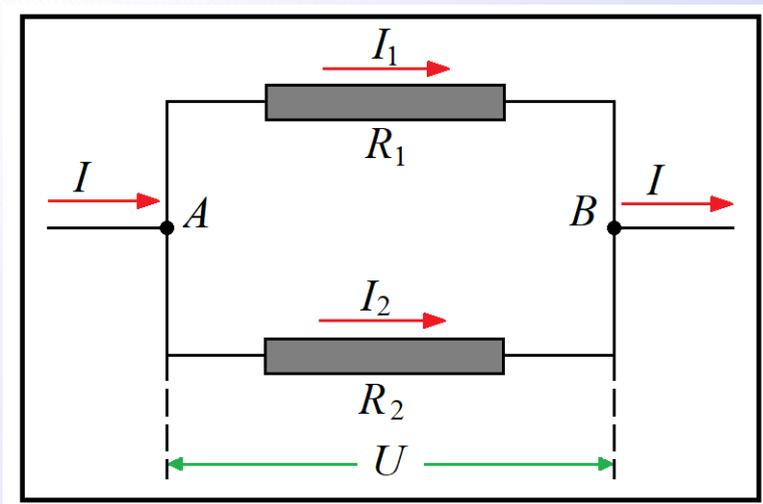
Страница 37 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

При **параллельном соединении** напряжения  $U_1$  и  $U_2$  на обоих проводниках одинаковы:  $U_1 = U_2 = U$ .



*Параллельное соединение проводников*

Сумма токов  $I_1 + I_2$ , протекающих по обоим проводникам, равна току в неразветвленной цепи:  $I = I_1 + I_2$ .

Этот результат следует из того, что в точках разветвления токов (узлы А и В) в цепи постоянного тока не могут накапливаться заряды. Например, к узлу А за время  $\Delta t$  подтекает заряд  $I\Delta t$ , а утекает от узла за то же время заряд  $I_1\Delta t + I_2\Delta t$ . Следовательно,  $I = I_1 + I_2$ .

Записывая на основании закона Ома

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, I_2 = \frac{U}{R_2}, \text{ и } I = \frac{U}{R},$$



Начало

Содержание



Страница 38 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

где  $R$  – электрическое сопротивление всей цепи, получим

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

При параллельном соединении проводников величина, обратная общему сопротивлению цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям параллельно включенных проводников.

Этот результат справедлив для любого числа параллельно включенных проводников.

Следует отметить, что далеко не все сложные цепи, состоящие из проводников с различными сопротивлениями, могут быть рассчитаны с помощью формул для последовательного и параллельного соединения. На рисунке 2.7 ниже приведен пример электрической цепи, которую нельзя рассчитать указанным выше методом.

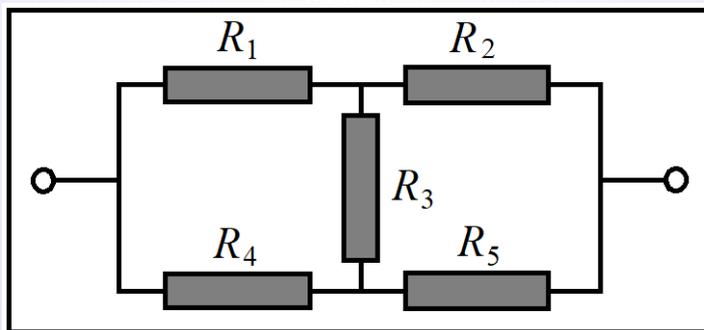


Рисунок 2.7

Цепи, подобные изображенной на рисунке 2.7, а также цепи с разветвлениями, содержащие несколько источников, рассчитываются с помощью правил Кирхгофа (или иными методами, о которых речь пойдёт ниже).



Начало

Содержание



Страница 39 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

## 2.3 ЭДС. Закон Ома для неоднородного участка и полной цепи

Для того чтобы поддерживать ток достаточно длительное время, необходимо от конца проводника с меньшим потенциалом непрерывно отводить, а к другому концу – с большим потенциалом – подводить электрические заряды, т.е. необходим круговорот зарядов. Поэтому в замкнутой цепи, наряду с нормальным движением зарядов, должны быть участки, на которых движение (положительных) зарядов происходит в направлении возрастания потенциала, т.е. против сил электрического поля (рисунок 2.8).

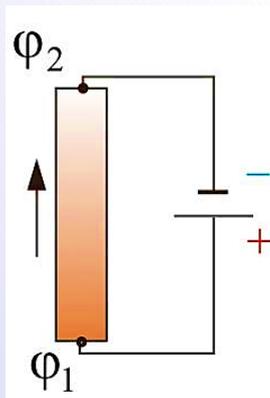


Рисунок 2.8

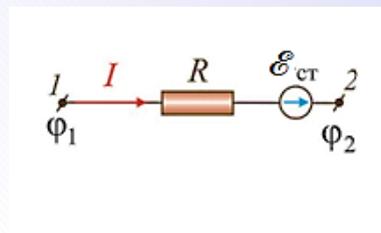


Рисунок 2.9

Перемещение заряда на этих участках возможно лишь с помощью сил неэлектрического происхождения (сторонних сил): химические процессы, диффузия носителей заряда, вихревые электрические поля.

Аналогия – насос, качающий воду в водонапорную башню, действует за счет негравитационных сил (электромотор). Сторонние силы можно характеризовать работой, которую они совершают над перемещающимися по замкнутой цепи или



Начало

Содержание



Страница 40 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

её участку зарядами (рисунок 2.8).

Величина  $\varepsilon$ , равная работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда в цепи, называется **электродвижущей силой** (ЭДС), действующей в цепи:

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \right] = [\text{В}].$$

Размерность ЭДС совпадает с размерностью потенциала, т.е. измеряется в вольтах.

При прохождении электрического тока в замкнутой цепи на свободные заряды действуют силы со стороны стационарного электрического поля и сторонние силы. При этом на отдельных участках этой цепи ток создается только стационарным электрическим полем. Такие участки цепи называются **однородными**. На некоторых участках этой цепи, кроме сил стационарного электрического поля, действуют и сторонние силы. Участок цепи, на котором действуют сторонние силы, называют **неоднородным** участком цепи.

Рассмотрим неоднородный участок цепи, участок, содержащий источник ЭДС (т.е. участок, где действуют неэлектрические силы). Напряженность  $\vec{E}$  поля в любой точке цепи равна векторной сумме поля кулоновских сил и поля сторонних сил, т.е.  $\vec{E} = \vec{E}_k + \vec{E}_{\text{ст}}$ .

Величина, численно равная работе по переносу единичного положительного заряда суммарным полем кулоновских и сторонних сил на участке цепи (1-2), называется **напряжением**  $U_{12}$  на этом участке (рисунок 2.9):

$$U_{12} = \int_1^2 \vec{E}_q d\vec{l} + \int_1^2 \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l}$$



Начало

Содержание



Страница 41 из 163

Назад

На весь экран

Заккрыть

т.к.  $\text{vec}E_q d\vec{l} = -d\varphi$ , или  $\int_1^2 \vec{E}_q d\vec{l} = \varphi_1 - \varphi_2$ , тогда

$$U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{12}.$$

Напряжение на концах участка цепи совпадает с разностью потенциалов только в случае, если на этом участке нет ЭДС, т.е. на однородном участке цепи. Запишем **обобщенный закон Ома для участка цепи, содержащей источник ЭДС**:

$$IR_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{12}.$$

Обобщенный закон Ома выражает закон сохранения энергии применительно к участку цепи постоянного тока. Он в равной мере справедлив как для пассивных участков (не содержащих ЭДС), так и для активных.

В электротехнике часто используют термин **падение напряжения** – изменение напряжения вследствие переноса заряда через сопротивление:

$$U = IR.$$

В замкнутой цепи (рисунок 2.10)  $\varphi_1 = \varphi_2$  :  $IR_{\Sigma} = \varepsilon$ , или  $I = \frac{\varepsilon}{R_{\Sigma}}$ , где  $R_{\Sigma} = R + r$ ;  $r$  – внутреннее сопротивление активного участка цепи.

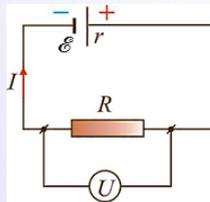


Рисунок 2.10



Начало

Содержание



Страница 42 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

Тогда закон Ома для замкнутого участка цепи, содержащего источник ЭДС, запишется в виде

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}.$$



*Начало*

*Содержание*



*Страница 43 из 163*

*Назад*

*На весь экран*

*Закреть*

## 2.4 Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца (дифференциальная и интегральная формы)

При протекании тока по однородному участку цепи электрическое поле совершает работу. За время  $\Delta t$  по цепи протекает заряд  $\Delta q = I\Delta t$ . Электрическое поле на выделенном участке совершает работу:

$$\Delta A = (\varphi_1 - \varphi_2)\Delta q = \Delta\varphi_{12}I\Delta t = UI\Delta t,$$

где  $U = \Delta\varphi_{12}$  – напряжение. Эту работу называют **работой электрического тока**.

Если обе части формулы  $RI = U$ , выражающей закон Ома для однородного участка цепи с сопротивлением  $R$ , умножить на  $I\Delta t$ , то получится соотношение:

$$RI^2\Delta t = UI\Delta t = \Delta A.$$

Это соотношение выражает закон сохранения энергии для однородного участка цепи.

Работа  $\Delta A$  электрического тока  $I$ , протекающего по неподвижному проводнику с сопротивлением  $R$ , преобразуется в тепло  $\Delta Q$ , выделяющееся на проводнике.

$$\Delta Q = \Delta A = RI^2\Delta t.$$

Закон преобразования работы тока в тепло был экспериментально установлен независимо друг от друга Дж. Джоулем и Э. Ленцем и носит название закона Джоуля–Ленца.

Мощность электрического тока равна отношению работы тока  $\Delta A$  к интервалу времени  $\Delta t$ , за которое эта работа была совершена:

$$P = \frac{\Delta A}{\Delta t} = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}.$$



Начало

Содержание



Страница 44 из 163

Назад

На весь экран

Заккрыть

Работа электрического тока в СИ выражается в джоулях (Дж), мощность – в ваттах (Вт).

При прохождении по проводнику тока, проводник нагревается. Джоуль и независимо от него Ленц обнаружили экспериментально, что количество выделяющегося в проводнике тепла пропорционально его сопротивлению, квадрату силы тока и времени:

$$Q = RI^2t.$$

Если сила тока изменится со временем, то

$$Q = \int_0^t Ri^2 dt.$$

Вышеприведённые соотношения выражают закон Джоуля-Ленца. Подставляя в омах,  $i$  в амперах, а  $t$  в секундах,  $Q$  получим в джоулях.

Закон Джоуля-Ленца имеет следующие объяснения. Рассмотрим однородный проводник, к которому приложено напряжение  $U$ . За время  $dt$  через каждое сечение проводника проходит заряд  $dq = idt$ . Это равносильно тому, что заряд  $dq = idt$  переносится за время  $dt$  из одного конца проводника в другой. При этом силы поля совершают работу  $dA = Udq = Uidt$ . Заменяя  $U$  в соответствии с законом Ома через  $Ri$  и интегрируя, получим для работы электрических сил выражение, совпадающее с выражением для  $Q$ . Таким образом, нагревание проводника происходит за счёт работы, совершаемой силами над носителями заряда.

От формулы, определяющей тепло выделяемое во всем проводнике, можно перейти к выражению, характеризующему выделение тепла в различных местах проводника. Выделим в проводнике элементарный объем в виде цилиндра. Согласно закону Джоуля-Ленца за время  $dt$  в этом объеме выделится тепло

$$dQ = Ri^2 dt = \frac{\rho dl}{dS} (jdS)^2 dt = \rho j^2 dV dt,$$



Начало

Содержание



Страница 45 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

где  $dV = dSdl$  – величина элементарного объёма.

Количество тепла  $dQ$ , отнесённое к единице времени и единице объёма, назовем удельной мощностью тока  $\omega$ . Получим:

$$\omega = \rho j^2.$$

Этой формуле можно придать следующий вид:

$$\omega = jE = \sigma E^2.$$

Две последние формулы – закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме. Чтобы, исходя из них, получить количество тепла, выделяющееся во всем проводнике за время  $t$ , нужно проинтегрировать  $\omega$  по объёму проводника в некоторый момент времени  $t$ , а затем полученное выражение проинтегрировать по времени:

$$Q = \int_0^T dt \int_V \rho j^2 dV.$$



Начало

Содержание



Страница 46 из 163

Назад

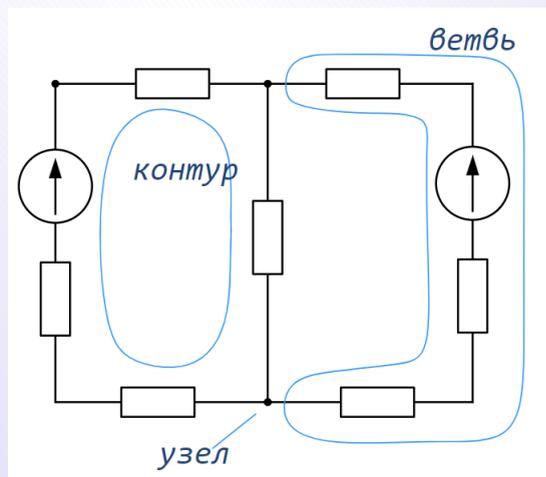
На весь экран

Заккрыть

## 2.5 Разветвленные цепи. Способы расчёта электрических цепей (метод узловых потенциалов, метод контурных токов, эквивалентного генератора и др.). Правила Кирхгофа

В состав любой электрической цепи входит набор элементов, соединенных между собой.

Элементы, которые соединены последовательно образуют **ветвь**. Цепь, которая содержит несколько ветвей, называется **разветвленная цепь**. Ветви соединяются между собой в точках, которые называют **узлами** (на схемах обозначают жирной точкой). Несколько ветвей образуют между собой замкнутый участок цепи, который называется **контур**.



К методам для расчёта электрических цепей относятся:

- 1) Расчёт цепей с непосредственным использованием законов Ома и Кирхгофа.
- 2) Метод преобразования электрической цепи.
- 3) Метод контурных токов.



Начало

Содержание



Страница 47 из 163

Назад

На весь экран

Заккрыть

- 4) Метод узловых потенциалов.
- 5) Метод эквивалентного генератора (теорема об активном двухполюснике).
- 6) Метод наложения.

**Расчет разветвлённых цепей с помощью закона Ома** довольно сложен. Эта задача решается более просто с помощью двух правил немецкого физика **Г. Кирхгофа** (1824 – 1887).

**Первое правило Кирхгофа** утверждает, что алгебраическая сумма токов, сходящихся в любом узле цепи равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0.$$

В случае установившегося постоянного тока в цепи ни в одной точке проводника, ни на одном из его участков не должны накапливаться электрические заряды.

Токи, сходящиеся к узлу, считаются положительными:

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0.$$

Первый закон является следствием закона сохранения заряда.

**Второе правило Кирхгофа** является обобщением закона Ома для разветвленной цепи и следствием закона сохранения энергии.

Для произвольного замкнутого контура с произвольным числом разветвлений (рисунок 2.11) можно записать для каждого элемента контура:

$$\varphi_2 - \varphi_3 + \varepsilon_1 = I_1 R_1;$$

$$\varphi_3 - \varphi_1 + \varepsilon_2 = I_2 R_2;$$

$$\varphi_1 - \varphi_1 + \varepsilon_3 = I_3 R_3.$$



Начало

Содержание



Страница 48 из 163

Назад

На весь экран

Закреть

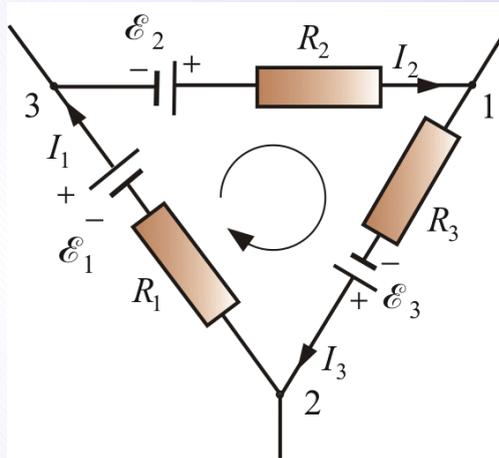


Рисунок 2.11

Складывая эти уравнения, получим **второе правило Кирхгофа**:

В любом замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма произведения тока на сопротивление равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом же контуре.

Обход контуров осуществляется по часовой стрелке, если направление обхода совпадает с направлением тока, то ток берется со знаком «плюс».



Начало

Содержание



Страница 49 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

Рассмотрим схему (рисунок 2.12):

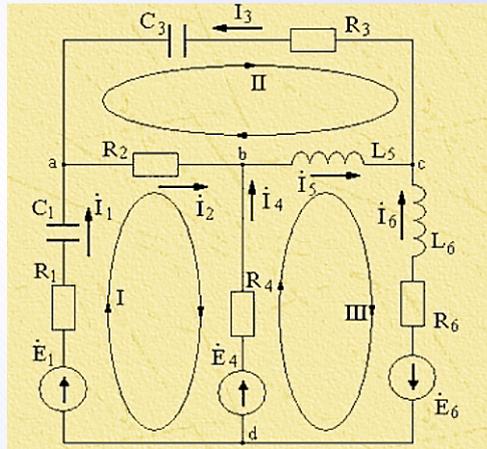


Рисунок 2.12

Алгоритм расчёта цепи следующий:

1. Произвольно выбираем направления токов во всех ветвях и обозначаем их на схеме ( $I_1 - I_6$ ).

2. Произвольно выбираем направление обхода контуров. Количество контуров должно быть таким, чтобы каждая ветвь входила хотя бы в один контур. Минимально необходимое количество контуров ( $n$ ) можно определить по формуле:  $n = x - y + 1$ , где  $x$  – количество ветвей схемы (в нашем случае 6), а  $y$  – количество узлов (в нашем случае 4).

3. Упростим схему, определив комплексное сопротивление ветвей согласно выражениям:

$$Z_1 = R_1 - jX_{C1}, Z_2 = R_2, Z_3 = R_3 - jX_{C3}, Z_4 = R_4, Z_5 = jX_{L5} \text{ и } Z_6 = R_6 + jX_{L6}.$$



Начало

Содержание



Страница 50 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

В результате упрощения получим схему (рис 2.13):

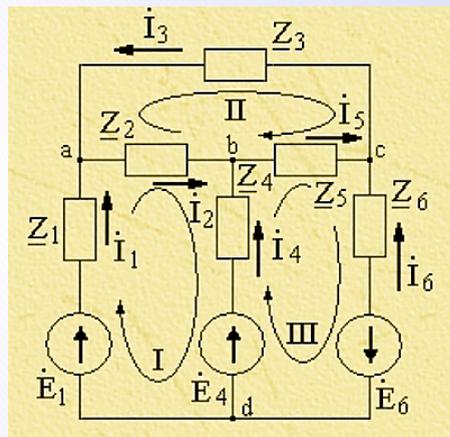


Рисунок 2.13

4. Составляем уравнения по первому закону Кирхгофа. Необходимое количество уравнений можно определить как  $n = y - 1$ . Составляем уравнения для узлов  $a$ ,  $b$ , и  $c$ .

$$-I_1 + I_2 - I_3 = 0;$$

$$-I_2 - I_4 + I_5 = 0;$$

$$-I_5 + I_3 - I_6 = 0.$$

Составляем уравнения по второму закону Кирхгофа для контуров I, II и III.

$$I_1 Z_1 + I_2 Z_2 - I_4 Z_4 = E_1 - E_4;$$

$$-I_3 Z_3 - I_2 Z_2 - I_5 Z_5 = 0;$$



Начало

Содержание



Страница 51 из 163

Назад

На весь экран

Заккрыть

$$I_4 Z_4 + I_5 Z_5 - I_6 Z_6 = E_4 + E_6.$$

5. Решаем совместно обе системы уравнений и получаем значения токов  $I_1 - I_6$ .

### Метод преобразований

Суть метода преобразований состоит в упрощении цепи и, как следствие, её расчёта. Рассмотрим схему (рисунок 2.14). Произведем преобразование эквивалентное преобразование треугольника  $Z_2, Z_3, Z_5$  в звезду  $Z_a, Z_b, Z_c$  (как показано на рисунок 2.14, а), а затем заменим последовательное соединение (рисунок 2.14, б) и получим окончательную схему (рисунок 2.14, в).

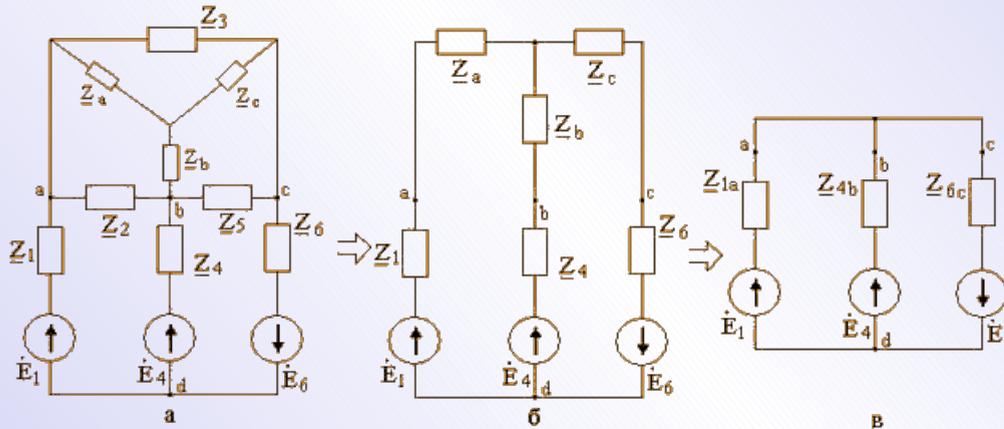


Рисунок 2.14

Произведем преобразования для преобразования треугольник – звезда:

$$Z_a = \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3 + Z_5},$$



Начало

Содержание

◀ ▶

◀▶

Страница 52 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

$$Z_b = \frac{Z_2 Z_5}{Z_2 + Z_3 + Z_5},$$

$$Z_a = \frac{Z_3 Z_5}{Z_2 + Z_3 + Z_5}.$$

Для последовательного соединения нагрузок:

$$Z_{1a} = Z_1 + Z_a,$$

$$Z_{4b} = Z_4 + Z_b,$$

$$Z_{6c} = Z_6 + Z_c.$$

Полученная в результате преобразований схема (в) существенно проще исходной схемы и может быть рассчитана любым методом, изученным в дальнейшем.

### Метод контурных токов

Этот метод основан на введении дополнительных величин контурных токов удовлетворяющих первому закону Кирхгофа.

Пусть будет задана схема, показанная на рисунке 2.13. Произвольно введем контурные токи  $I_{11}$ ;  $I_{22}$ ;  $I_{33}$ . Направление этих токов можно выбрать произвольно. Докажем, что введение этих величин не противоречит основным законам электротехники. Для этого выделим, например узел ( $b$ ) и договоримся об условиях, при которых будет произведен расчёт схемы (рисунок 2.15).



Начало

Содержание



Страница 53 из 163

Назад

На весь экран

Закреть

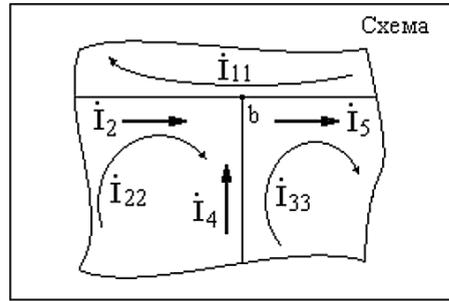


Рисунок 2.15

Пусть токи:

$$I_1 = I_{22}; I_2 = I_{22} - I_{11}; I_3 = -I_{11}; I_4 = I_{33} - I_{22}; I_5 = I_{33} - I_{11}; I_6 = -I_{33}.$$

Запишем первый закон Кирхгофа для узла (b)  $I_5 - I_2 - I_4 = 0$  и произведем подстановку контурных токов в соответствии с условиями, получим:

$$I_{33} - I_{11} - I_{22} + I_{11} - I_{33} + I_{22} = 0.$$

Из уравнения видно, что первый закон Кирхгофа для узла (b) сходится, значит, введение величин  $I_{11}$ ,  $I_{22}$ ,  $I_{33}$  при оговоренных выше условиях правомерно.

Запишем уравнения по второму закону Кирхгофа для схемы рисунка 2.14 а для контура 1 (по данному контуру протекает ток  $I_{11}$ ):  $-I_2 Z_2 - I_5 Z_5 - I_3 Z_3 = 0$ , с введением контурных токов  $-(I_{22} - I_{11})Z_2 - (I_{33} - I_{11})Z_5 + I_{11}Z_3 = 0$ , раскроем скобки и произведем группировку членов

$$-I_{22}Z_2 + I_{11}Z_2 - I_{33}Z_5 + I_{11}Z_5 + I_{11}Z_3 = 0;$$

$$I_{11}(Z_2 + Z_5 + Z_3) - I_{22}Z_2 - I_{33}Z_5 = 0.$$



Начало

Содержание



Страница 54 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

Аналогично получим уравнения для второго и третьего контуров. Приведем эти уравнения без подробного вывода:

$$I_{22}(Z_1 + Z_2 + Z_4) - I_{11}Z_2 - I_{33}Z_4 = E_1 - E_4;$$

$$I_{33}(Z_4 + Z_5 + Z_6) - I_{22}Z_4 - I_{11}Z_5 = E_4 - E_6.$$

Комплексы  $Z_2 + Z_5 + Z_3 = Z_{11}$ ,  $Z_1 + Z_2 + Z_4 = Z_{22}$ ,  $Z_4 + Z_5 + Z_6 = Z_{33}$  назовем контурными сопротивлениями, а сопротивления  $Z_2 = Z_{12} = Z_{21}$ ,  $Z_4 = Z_{23} = Z_{32}$ ,  $Z_5 = Z_{13} = Z_{31}$  – межконтурными сопротивлениями.

С учетом введенных обозначений запишем окончательно систему уравнений для расчета контурных токов:

$$I_{11}Z_{11} - I_{22}Z_{22} - I_{33}Z_{13} = 0;$$

$$-I_{11}Z_{21} + I_{22}Z_{22} - I_{33}Z_{23} = E_1 - E_4;$$

$$-I_{11}Z_{31} - I_{22}Z_{32} + I_{33}Z_{33} = E_4 + E_6.$$

Можно привести алгоритм расчёта схем методом контурных токов.

1. Выбираем (произвольно) направления токов в ветвях.
2. Вводим контурные токи по следующим правилам: контурными токами должны быть охвачены все ветви, хотя бы один раз.
3. Определяем величины контурных и межконтурных сопротивлений.
4. Составляем систему уравнений по правилу: первое уравнение составляется относительно тока  $I_{11}$ . Знаки остальных членов уравнения, т.е.  $I_{22}$  и  $I_{33}$  берутся так: если  $I_{22}$  в ветви  $Z_{12}$  совпадает по направлению с  $I_{11}$ , то знак плюс, если нет, то минус. Точно также составляются остальные уравнения.

В правой части уравнений находится сумма ЭДС, действующих в соответствующем контуре. Знак ЭДС определяется по правилу: если направление контурного тока совпадает с направлением  $E$ , то знак плюс, если нет то минус.



Начало

Содержание



Страница 55 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

5. Рассчитываем уравнения.

6. Рассчитываем токи в ветвях по определенным выше уравнениям.

### Метод узловых потенциалов

Метод узловых потенциалов, так же как и метод контурных токов позволяет снизить порядок системы для расчета электротехнических схем. Данный метод состоит в нахождении потенциалов всех узлов схемы и затем по известным потенциалам токов во всех ветвях. Метод узловых потенциалов базируется на первом законе Кирхгофа.

Прежде чем приступить к изучению метода узловых потенциалов, рассмотрим схему (рисунок 2.16):

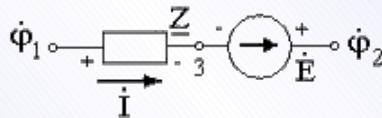


Рисунок 2.16

Пусть в ней известны потенциалы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , а так же все параметры элементов. Запишем значение потенциала  $\varphi_1$  через потенциал  $\varphi_2$  и через падения напряжений на элементах схемы. Запись произведем с учетом того, что ток всегда протекает от точки с большим потенциалом к точке с меньшим потенциалом.

$$\varphi_1 = \varphi_2 - E + IZ.$$

Выразим из этого уравнения ток:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + E}{Z}.$$



Начало

Содержание



Страница 56 из 163

Назад

На весь экран

Закреть

Положим данную конструкцию в основу дальнейшего вывода. Рассмотрим схему (рисунок 2.17):

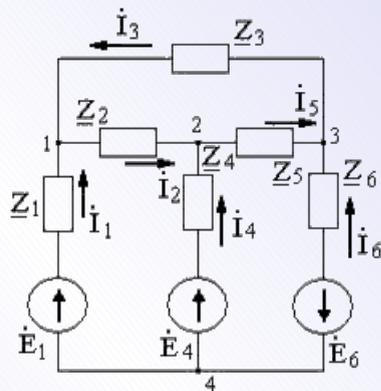


Рисунок 2.17

Выразим все токи через потенциалы узлов  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ :

$$I_1 = \frac{\varphi_4 - \varphi_1 + E_1}{Z_1}; \quad I_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{Z_2}; \quad I_3 = \frac{\varphi_3 - \varphi_1}{Z_3}; \quad I_4 = \frac{\varphi_4 - \varphi_2 + E_4}{Z_4};$$

$$I_5 = \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{Z_5}; \quad I_6 = \frac{\varphi_4 - \varphi_3 - E_6}{Z_6}.$$

Далее запишем первый закон Кирхгофа для узлов 1, 2 и 3.

Для узла 1:  $-I_1 + I_2 - I_3 = 0$ .

Для узла 2:  $-I_2 - I_4 + I_5 = 0$ .

Для узла 3:  $I_3 - I_5 - I_6 = 0$ .

Произведем подстановку в эти уравнения токов, выраженных через потенциалы:

$$\frac{-\varphi_4 + \varphi_1 - E_1}{Z_1} + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{Z_2} + \frac{-\varphi_3 + \varphi_1}{Z_3} = 0;$$



Начало

Содержание



Страница 57 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

$$\frac{-\varphi_1 + \varphi_2}{Z_2} + \frac{-\varphi_4 + \varphi_2 - E_4}{Z_4} + \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{Z_5} = 0;$$

$$\frac{\varphi_3 - \varphi_1}{Z_3} + \frac{-\varphi_2 + \varphi_3}{Z_5} + \frac{-\varphi_4 + \varphi_3 + E_6}{Z_6} = 0.$$

Выполним почленное деление на  $Z$  и перенесем члены уравнения, содержащие ЭДС в правую часть. Запишем первое уравнение относительно  $\varphi_1$ , второе – относительно  $\varphi_2$ , третье – относительно  $\varphi_3$ . Потенциал  $\varphi_4$  приравняем к нулю  $\varphi_4 = 0$ . Получим:

$$\varphi_1 \left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right) - \varphi_2 \left( \frac{1}{Z_2} \right) - \varphi_3 \left( \frac{1}{Z_3} \right) = E_1 \left( \frac{1}{Z_1} \right);$$

$$-\varphi_1 \left( \frac{1}{Z_2} \right) + \varphi_2 \left( \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_5} \right) - \varphi_3 \left( \frac{1}{Z_5} \right) = E_4 \left( \frac{1}{Z_4} \right);$$

$$-\varphi_1 \left( \frac{1}{Z_3} \right) - \varphi_2 \left( \frac{1}{Z_5} \right) + \varphi_3 \left( \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_5} + \frac{1}{Z_6} \right) = -E_6 \left( \frac{1}{Z_6} \right).$$

Обозначим сумму проводимостей ветвей принадлежащих одному узлу узловыми проводимостями:

$$\left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right) = Y_{11}, \quad \left( \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_5} \right) = Y_{22}, \quad \left( \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_5} + \frac{1}{Z_6} \right) = Y_{33}.$$

А проводимости, ветвей между узлами взаимными проводимостями:

$$\frac{1}{Z_2} = Y_{12} = Y_{21}, \quad \frac{1}{Z_3} = Y_{13} = Y_{31}, \quad \frac{1}{Z_5} = Y_{23} = Y_{32}.$$

С учётом введенных обозначений запишем систему уравнений для расчета узловых потенциалов в общем виде:

$$\begin{aligned} \varphi_1 Y_{11} - \varphi_2 Y_{12} - \varphi_3 Y_{13} &= E_1 Y_1; \\ -\varphi_1 Y_{21} + \varphi_2 Y_{22} - \varphi_3 Y_{23} &= E_4 Y_4; \\ -\varphi_1 Y_{31} - \varphi_2 Y_{32} + \varphi_3 Y_{33} &= -E_6 Y_6. \end{aligned} \tag{4}$$



Начало

Содержание



Страница 58 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

Приведем алгоритм расчета электрических схем с помощью метода узловых потенциалов.

1. Приравняем потенциал одного из узлов 0;
2. Составим уравнения по методу узловых потенциалов (знаки (-) в уравнениях присваиваются автоматически). В правой части уравнений знак определяется следующим образом: если ЭДС направлена к узлу, то она имеет знак (+), если от узла - (-);
3. Рассчитываем уравнения, определяем потенциалы.
4. Определяем токи по приведённым ранее формулам.

### Метод эквивалентного генератора

Метод применяется, если полный расчёт схемы не нужен, а необходимо определить токи только в одной или нескольких ветвях.

Этот метод также называют теоремой об активном двухполюснике. Читается теорема следующим образом: любую электрическую цепь по отношению к исследуемой ветви можно представить в виде эквивалентного генератора, содержащего эквивалентный источник ЭДС  $E_э$  и эквивалентное внутреннее сопротивление  $Z_{вн}$  (рисунок 2.18).

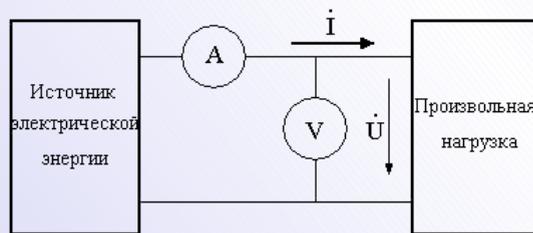


Рисунок 2.18



Начало

Содержание



Страница 59 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

Напряжение на выходе эквивалентного генератора находится из выражения:

$$U_{ab} = E_{\text{э}} - IZ_{\text{вн}}$$

Определить параметры эквивалентного генератора можно из опытов холостого хода (хх) и короткого замыкания (кз).

В эти опыты моделируются математически или физически.

Опыт холостого хода. (рисунок 2.19).

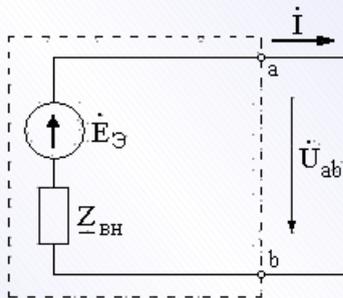


Рисунок 2.19

Подставим в выражение  $U_{ab} = E_{\text{э}} - IZ_{\text{вн}}$  значение тока  $I = 0$ , получим  $U_{\text{хх}} = U_{ab} = E_{\text{э}}$ .

Второй опыт – короткого замыкания. (рисунок 2.20).



Начало

Содержание



Страница 60 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

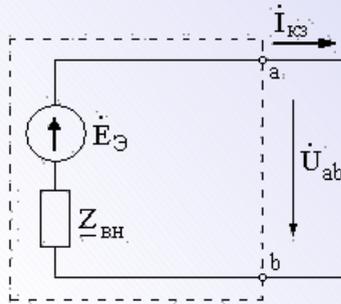


Рисунок 2.20

Из закона Ома получим:  $I_{\text{кз}} = \frac{E_3}{Z_{\text{вн}}}$ , откуда выразим  $Z_{\text{вн}}$  как  $Z_{\text{вн}} = \frac{E_3}{I_{\text{кз}}}$ .

Зная параметры эквивалентного генератора определим ток, протекающий по нагрузке:

$$I = \frac{E_3}{Z_{\text{н}} + Z_{\text{вн}}}$$

### Метод наложения

Метод формулируется так: ток в любой ветви электрической схемы равен алгебраической сумме токов, наводимых в этой ветви каждым из источников в отдельности.



Начало

Содержание



Страница 61 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

Пояснить этот метод проще и наглядней рисунком (смотрите рисунок 2.21):

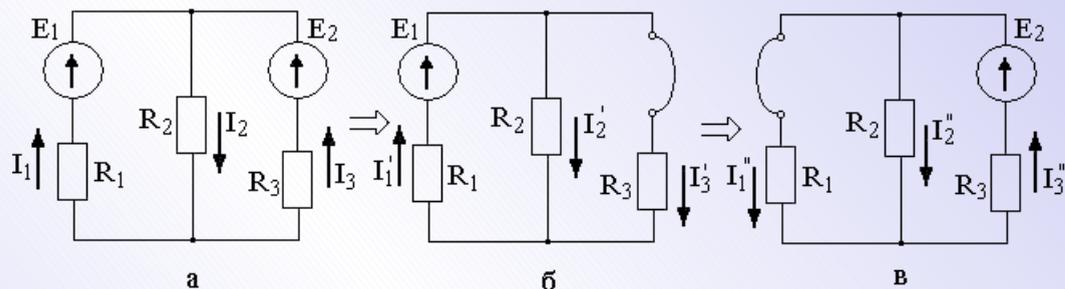


Рисунок 2.21

Пусть требуется рассчитать схему, показанную на рисунке 2.21, а.

Исходя из определения метода, можно записать для тока в любой ветви:  $I_k = \sum_{i=1}^n I_k^i$ , где  $n$  – число ветвей схемы, содержащих источники энергии.

Для того, чтобы определить токи  $I_k^i$  исключим поочередно из схемы сначала источник ЭДС  $E_1$  (смотрите рисунок 2.21, б), а затем источник ЭДС  $E_2$  (смотрите рисунок 2.21, в), оставив при этом внутренние сопротивления источников в схеме. В нашем случае будем считать источники ЭДС идеальными, т.е. с нулевыми внутренними сопротивлениями.

Токи в схеме б определим по формулам:

$$I_1' = \frac{E_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}, \quad I_2' = I_1' \frac{R_3}{R_2 + R_3} \quad \text{и} \quad I_3' = I_1' \frac{R_2}{R_2 + R_3}.$$

Токи в схеме в определим по формулам:

$$I_3'' = \frac{E_2}{R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}, \quad I_2'' = I_3'' \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad \text{и} \quad I_1'' = I_3'' \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$



Начало

Содержание



Страница 62 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

Зная токи, наводимые в ветвях каждым из источников в отдельности, найдем токи в исходной схеме:

$$I_1 = I_1' - I_1'';$$

$$I_2 = I_2' - I_2'';$$

$$I_3 = I_3' - I_3''.$$



*Начало*

*Содержание*



*Страница 63 из 163*

*Назад*

*На весь экран*

*Закреть*

### ТЕМА 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Переменный ток – электрический ток, который с течением времени изменяется по величине и направлению или, в частном случае, изменяется по величине, сохраняя своё направление в электрической цепи неизменным

Действующее значение переменного тока или напряжения можно определить как корень квадратный от интеграла квадрата мгновенных значений тока или напряжения на периоде повторения.

Пользуясь определением, найдем действующее значение синусоидального тока:

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\tau} i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\tau} (I_m \sin(\omega t + \varphi_i))^2 dt} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_m^2 \sin^2(\omega t + \varphi_i) d\omega t} = \sqrt{\frac{I_m^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \end{aligned}$$

После аналогичных вычислений для напряжения получим:  $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ .

Таким образом, действующие значения переменного тока и напряжения меньше их амплитудных значений в  $\sqrt{2}$  раз.

**Действующее значение переменного тока в одной и той же нагрузке  $r$  способствует выделению такой тепловой энергии, которая выделилась бы, если по нагрузке пропустить постоянный ток той же величины.**

В комплексном виде действующие значения напряжения и тока имеют вид:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{-j\varphi_m}; \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{-j\varphi_i}.$$



Начало

Содержание



Страница 64 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

Средним по модулю значением напряжения или тока, называют интеграл от модуля мгновенного значения тока или напряжения на периоде повторения.

Найдем среднее значение переменного напряжения:

$$U_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^{\tau} |U_m \sin \omega t| dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{1}{\pi} U_m (-\cos \pi - 1) = \frac{2}{\pi} U_m.$$

Средние значения напряжения и тока меньше их амплитудных значений в  $\frac{\pi}{2}$  раз. То есть для действующего значения тока:  $I = 0,707I_m$ , а для среднего значения тока:  $I_{\text{cp}} = 0,637I_m$ .

Закон Ома при последовательном соединении активного, индуктивного и емкостного сопротивлений будет выглядеть так:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

где  $I$  – сила тока в А;

$U$  – напряжение в В;

$R$  – активное сопротивление в Ом;

$\omega L$  – индуктивное сопротивление в Ом;

$1/\omega C$  – емкостное сопротивление в Ом.

$$U_L = I \cdot \omega L, U_c = \frac{1}{\omega C}.$$

В электротехнике получил широкое применение метод векторных диаграмм. Сущность этого метода состоит в следующем.



Начало

Содержание



Страница 65 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть



Если за амплитудное значение тока (или напряжения) принять отрезок (вектор) некоторой длиной вращать его, например, против часовой стрелки так, чтобы за период переменного тока он совершал один оборот, то проекция этого отрезка на вертикальную ось в любой момент времени будет равна мгновенному значению переменного тока (или напряжения) в данный момент.

Если изобразить две периодические величины (например, ток и напряжение) в выбранных масштабах (изменения этих величин происходят с одинаковой частотой, но отличаются по фазе на некоторый угол), то при вращении векторов угол сдвига фаз (угол между векторами) остается постоянным в течение всего периода (оборота).

Этот способ и положен в основу метода векторных диаграмм:

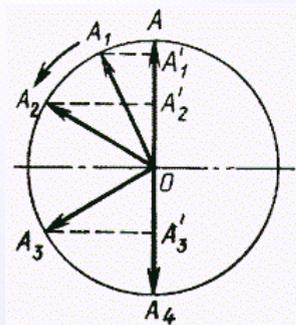


Рисунок 3.1

### Резонанс напряжений

В последовательной цепи с  $R$ ,  $L$  и  $C$  приложенное напряжение  $U$  равно сумме падений напряжений на активном сопротивлении, индуктивности и электроёмкости.

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{I^2 R^2 + (IX_L - IX_C)^2} = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Начало

Содержание



Страница 66 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

Обозначив полное сопротивление цепи через  $z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$  можно записать закон Ома для данной цепи:  $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$ .

Важным является случай, когда ток в цепи равен:  $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + 0}} = \frac{U}{R}$ , т.е. цепь в данном случае имеет наименьшее возможное сопротивление, как будто в неё включено только активное сопротивление. При этом напряжения на индуктивности и электроёмкости, сдвинутые по фазе, полностью компенсируют друг друга. Напряжение, приложенное к цепи, равно напряжению на активном сопротивлении, и ток совпадает по фазе с напряжением. Этот случай получил название резонанса напряжений.

Итак, условием резонанса напряжений является равенство индуктивного и емкостного сопротивлений цепи:  $X_L = X_C$  или  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ .

Явление резонанса напряжений имеет важное значение для практики.

Прежде всего, если в цепь с индуктивностью включить последовательно переменную емкость и постепенно изменять ее, например увеличивая, то ток в цепи будет сначала расти до наступления резонанса, а затем убывать (Рисунок 3.2). Уменьшение реактивного сопротивления цепи за счет введения в цепь емкости называют последовательной компенсацией.



Начало

Содержание



Страница 67 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

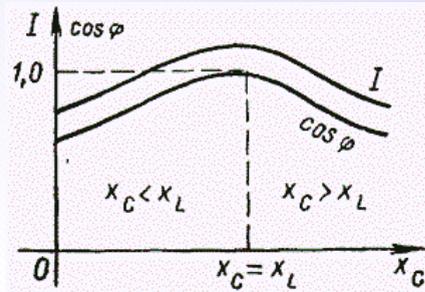


Рисунок 3.2

### Резонанс токов

Рассмотрим параллельное соединение емкости  $C$  с ветвью, состоящей из индуктивности  $L$  и активного сопротивления  $R$ . Обе ветви находятся под одним и тем же приложенным напряжением  $U$ . Построим векторную диаграмму для этой цепи. За основной вектор выберем вектор приложенного напряжения  $U$ . Затем найдем длину вектора тока из соотношения:  $I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + X_{LI}^2}}$  и отложим этот вектор по отношению к вектору  $U$  под углом определяемым по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{X_{LI}}{R_1}.$$

Полученный таким образом вектор тока разложим на две составляющие: активную и реактивную.

Значение вектора тока находим из соотношения  $I_2 = \frac{U}{X_C} = \frac{U}{1/\omega C} = \omega C U = I_C$  и откладываем этот вектор на  $90^\circ$  против часовой стрелки относительно вектора приложенного напряжения  $U$ . Находим общий ток как геометрическую сумму токов

$$I = \sqrt{I_{\text{актив}}^2 + I_{\text{реактив}}^2}.$$



Начало

Содержание



Страница 68 из 163

Назад

На весь экран

Закреть

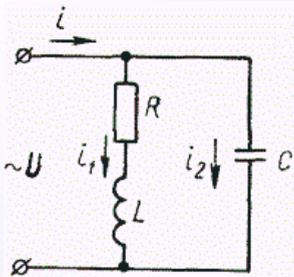


Рисунок 3.3

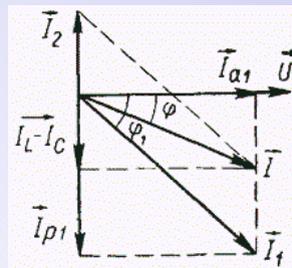


Рисунок 3.4

Угол сдвига фаз между общим током и приложенным напряжением  $U$  можно определить из соотношения  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_L - I_C}{I_{\text{актив}}}$ .

Из рассмотрения векторной диаграммы видно, что общий ток может отставать по фазе от приложенного напряжения или опережать. Если совпадает по фазе с приложенным напряжением такое явление называется резонанс токов. При резонансе токов общий ток равен активной составляющей тока в катушке, т. е. процессы в цепи таковы, будто в ней содержится только активное сопротивление. Таким образом, подключение емкости параллельно катушке индуктивности уменьшает угол сдвига фаз между током и напряжением, как и при последовательном их соединении. Но параллельное подключение имеет и свою особенность: общий ток в цепи при этом уменьшается и становится чисто активным, хотя в самих ветвях реактивные токи не равны нулю; реактивные же токи имеют противоположные фазы. При увеличении тока в катушке потребляемая энергия запасается в магнитном поле, а в конденсаторе, наоборот, при увеличении приложенного напряжения энергия запасается в электрическом поле. Катушка и конденсатор обмениваются между собой энергией, освобождая тем самым линию и генератор от реактивного тока.



Начало

Содержание



Страница 69 из 163

Назад

На весь экран

Закреть

## ТЕМА 4. ТРЁХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Н. Тесла изобрёл двухфазную систему переменного тока, в которой одновременно действовали два напряжения равной амплитуды и частоты, но сдвинутые по фазе на  $90^\circ$  друг относительно друга. Двухфазная система переменного тока имеет ряд преимуществ по сравнению с однофазной. Значительно более совершенной оказалась трехфазная система переменного тока, впервые теоретически обоснованная и практически осуществленная выдающимся русским электротехником конца XIX и начала XX в. М. О. Доливо-Добровольским. В трехфазной системе одновременно действуют три напряжения равной частоты и амплитуды, но сдвинутые по фазе друг относительно друга на  $120^\circ$ . Это изобретение относится к 1889 г.

Основные достоинства трёхфазной системы:

- 1) простота конструкции и эксплуатации трехфазных двигателей,
- 2) большая экономия в массе проводов при передаче электроэнергии на большие расстояния, достигающая 20-30% по сравнению с однофазной системой,
- 3) возможность получения различных напряжений (линейные и фазные) в одной и той же трехфазной системе.

Рассмотрим схему соединения обмоток генератора звездой, в которой концы трёх обмоток соединяются в один узел, а начала служат зажимами для подключения нагрузки.

При таком способе соединения напряжение между каждой фазой и нулевым проводом называют фазным напряжением. Напряжения между фазами называют линейными.

Может показаться, что линейное напряжение, вдвое больше фазного. Но это не так. Для определения соотношения между линейным и фазным напряжениями надо брать не алгебраическую сумму фазных напряжений, а их геометрическую разность (разность векторов). Поясним это.

Интересующие нас линейные напряжения представляют собой разность



Начало

Содержание



Страница 70 из 163

Назад

На весь экран

Заккрыть

потенциалов между точками А к В, В и С, С и А. Чтобы определить разность потенциалов, нужно условно выбрать точку, потенциал которой принят за нуль. Такой точкой, вообще говоря, может быть любая (А, В, С или 0). В трехфазных цепях потенциал нулевого провода принимают равным нулю, а провод, как правило, соединяют с землей (заземляют). Тогда потенциалы точек А, В и С будут соответственно, а линейные напряжения представляют собой разности потенциалов этих точек, т. е.

$$U_{AB} = U_A - U_B; U_{BC} = U_B - U_C; U_{CA} = U_C - U_A.$$

Построим векторную диаграмму фазных напряжений (Рисунок 4.1) и сложим векторы:  $\vec{U}_{AB} = \vec{U}_A + (-\vec{U}_B)$ ;  $\vec{U}_{BC} = \vec{U}_B + (-\vec{U}_C)$ ;  $\vec{U}_{CA} = \vec{U}_C + (-\vec{U}_A)$ .

В результате построений получили три вектора, которые образуют симметричную трехлучевую звезду линейных напряжений, повернутую относительно звезды фазных напряжений на угол  $30^\circ$  против часовой стрелки.

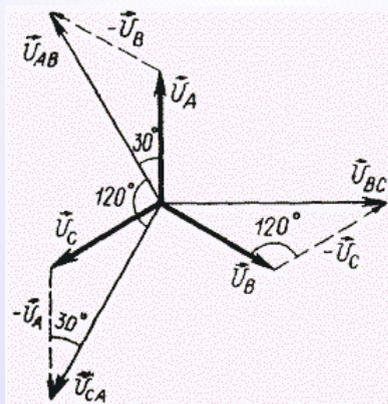


Рисунок 4.1



Начало

Содержание



Страница 71 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

Для установления соотношения между абсолютными значениями линейного и фазного напряжений рассмотрим тупоугольный треугольник с углом  $120^\circ$  при вершине. Из этого треугольника следует:  $U_{л} = U_{\phi}\sqrt{3}$ .

$$\text{Например, если принять линейное напряжение } U_{л} = 220\text{В, то фазное равно } U_{\phi} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} = \frac{220\text{В}}{\sqrt{3}} \approx 127\text{В.}$$

Если же напряжение 220 В принять фазным, то линейное напряжение равно  $U_{л} = U_{\phi}\sqrt{3} = 220\text{В}\sqrt{3} \approx 380\text{В}$ .

В соответствии с ГОСТом напряжения 127, 220 и 380 В приняты стандартными для приемников низкого напряжения. Однако напряжения, которые создают генераторы электростанций, достигают нескольких киловольт (поэтому напряжения 127, 220 и 380 В получают на вторичных обмотках понижающих трансформаторов).

В случае соединения звездой с нейтралью (четырёхпроводная линия) в линии существуют две системы напряжений, например 220/127 и 380/220 В. Два напряжения (линейное и фазное) в одной и той же линии – достоинство четырёхпроводной линии.

Система 380/220 В является более экономичной, нежели система 220/127 В, так как для электропередачи при одной и той же мощности требуется меньший расход металла на провода за счет меньшего тока.

### **Соединение звездой**

Соединение звездой применяют в соединении обмоток трехфазных генераторов, а соединение звездой с нейтралью (четырёхпроводная трехфазная линия) – в технике освещения, где осветительные приборы включают, главным образом, на фазное напряжение. Необходимость нулевого провода вытекает из того, что при работе осветительных приборов практически невозможно добиться симметрии нагрузок. В таких сетях все три фазы и нейтраль подводятся, например, к жилым домам, а внутри каждого дома стремятся примерно одинаково загрузить каждую из фаз с тем, чтобы общая нагрузка была более или менее симметричной. При этом к каждой



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 72 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

квартире подводится нулевой провод и одна из фаз. На распределительных щитах, через которые проходят две или три фазы, в нулевой провод предохранитель не ставится, так как его перегорание может привести к асимметрии напряжений.

### Соединение треугольником

Обмотки трехфазного генератора, а также трехфазные нагрузки могут быть соединены еще одним способом: конец первой обмотки соединяют с началом второй, конец второй – с началом третьей, конец третьей – с началом первой, а узлы соединения служат отводами (Рисунок 4.2). Такой способ соединения называют треугольником. Кажущегося короткого замыкания в обмотках генератора не произойдет, так как в любой момент времени сумма ЭДС в его обмотках равна нулю:

$$e_A + e_B + e_C = 0$$

и ток при отсутствии внешней нагрузки в замкнутом треугольнике также равен нулю.

Это справедливо в том случае, если все три ЭДС строго синусоидальны.

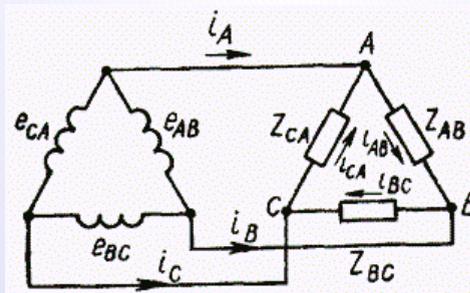


Рисунок 4.2

Но в работе генератора форма ЭДС может отклоняться от синусоидальной, поэтому соединение треугольником обмоток генератора, как правило, не



Начало

Содержание



Страница 73 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

применяют. Однако соединение треугольником широко используется у трехфазных потребителей, создающих симметричную нагрузку (двигатели, печи и т. д.). Именно этот случай соединения мы и рассмотрим несколько подробнее.

Если включить три приемника тока: (см. Рисунок 4.2) – непосредственно между проводами трехпроводной линии, то получим соединение токоприемников треугольником. При таком соединении нет различия между фазным и линейным напряжениями, так как напряжение между началом и концом каждой фазы приемника является в то же время линейным напряжением. Зато здесь появляется различие между фазными и линейными токами приемника.

Построим векторные диаграммы токов и найдем зависимость между их абсолютными значениями. Условимся положительными направлениями фазных токов считать направления от А к В, от В к С и от С к А, а положительными направлениями линейных токов – направления от генератора к приемнику. Тогда по первому закону Кирхгофа имеем:

$$\vec{l}_A + \vec{l}_{CA} = \vec{l}_{AB};$$

$$\vec{l}_B + \vec{l}_{AB} = \vec{l}_{BC};$$

$$\vec{l}_C + \vec{l}_{BC} = \vec{l}_{CA}.$$

Откуда

$$\vec{l}_A = \vec{l}_{AB} - \vec{l}_{CA};$$

$$\vec{l}_B = \vec{l}_{BC} - \vec{l}_{AB};$$

$$\vec{l}_C = \vec{l}_{CA} - \vec{l}_{BC}.$$

Из последних соотношений видно, что любой из линейных токов равен геометрической разности фазных токов двух фаз, непосредственно соединенных с данным проводом линии; причем уменьшаемым является фазный ток, направленный от провода, а вычитаемым – фазный ток, направленный к проводу.



Начало

Содержание



Страница 74 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть



аналогично линейным напряжениям:

$$I_{л} = I_{\phi} \sqrt{3}.$$

Таким образом, два способа включения потребителей (звездой или треугольником) расширяют возможности использования этих потребителей. Например, если каждая из трех обмоток трёхфазного электродвигателя рассчитана на рабочее напряжение 220 В, то электродвигатель может быть включен треугольником и сеть 220/127 В или звездой в сеть 380/220 В.

Так как в соединении треугольником нет уравнительного провода (нейтрали), то неравномерность нагрузки фаз может значительно сказаться на работе генератора, чем в случае соединения звездой с нейтралью. Поэтому соединение треугольником чаще всего применяется в силовых установках (трёхфазные двигатели и т. д.), где можно добиться близких по значению нагрузок фаз.

В трехфазных цепях способ включения нагрузки (звезда или треугольник) не зависит от способа включения обмоток генератора или трансформатора, питающих данную цепь.



Начало

Содержание



Страница 76 из 163

Назад

На весь экран

Закреть

## ТЕМА 5. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Для контроля за правильной эксплуатацией электрических установок необходимо систематически проводить измерения электрических величин, характеризующих работу этих установок. Этот контроль осуществляют электроизмерительные приборы.

Принцип измерения электрических величин был впервые предложен основоположником русской науки М.В. Ломоносовым, который экспериментально пришел к выводу, что «электричество взвешено быть может». Первый электроизмерительный прибор был построен в России современником Ломоносова Г. В. Рихманом. Это был электрометр со шкалой и стрелкой, принцип действия которого положен в основу устройства большинства современных приборов.

### Классификация электроизмерительных приборов

Электроизмерительные приборы классифицируют по следующим признакам:

1. По роду измеряемой величины: для измерения тока – амперметры, миллиамперметры, гальванометры; для измерения напряжения – вольтметры, милливольтметры, гальванометры; для измерения мощности – ваттметры, киловаттметры; для измерения энергии – счетчики; для измерения сдвига фаз и коэффициента мощности – фазометры; для измерения частоты – частотометры; для измерения сопротивлений – омметры и мегомметры и т. д.

2. По роду измеряемого тока: для измерения в цепях постоянного, переменного, постоянного и переменного токов, а также в трехфазных цепях.

3. По степени точности: приборы делят на восемь классов точности – 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5. Номер класса означает процент допустимой приведенной погрешности. Так, приборы класса точности 1,5 имеют допустимую приведенную погрешность 1,5 % и т. д. Приборы, имеющие погрешности более 4,0 %, считаются внеклассными (это щитовые и учебные приборы и т. д.). Приборы классов точности 0,05; 0,1; 0,2 и 0,5 используются для более точных измерений как контрольные (для



Начало

Содержание



Страница 77 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

проверки других приборов) и как лабораторные.

4. По принципу действия: магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, индукционные, тепловые, термоэлектрические, электростатические, электронные, электролитические, фотоэлектрические.

Согласно ГОСТу, электроизмерительные приборы должны удовлетворять следующим требованиям:

а) погрешность прибора не должна превышать его класс точности и изменяться в процессе эксплуатации;

б) на показания прибора не должны влиять внешние электрические поля и изменения температуры;

в) шкала или её рабочая часть должны быть по возможности равномерной и проградуированной в практических единицах;

г) прибор должен иметь хорошую успокоительную систему, чтобы колебания стрелки прибора быстро прекращались (затухали);

д) прибор должен быть стойким к перегрузкам и иметь хорошую изоляцию.

### **Основные детали электроизмерительных приборов**

Устройство для создания противодействующего момента. Принцип работы большинства электроизмерительных стрелочных приборов основан на повороте подвижной их части под действием вращающегося момента. Последний создается током, связанным определенной зависимостью с измеряемой электрической величиной.

Если этому повороту ничем не противодействовать, то подвижная часть прибора либо повернется на наибольший возможный угол, либо придет в ускоренное движение.

Противодействующий момент у большинства приборов создается закручивающейся упругой бронзовой пружины 1 (рисунок 5.1), концы которой прикреплены один – к оси подвижной части прибора 2, а другой – к неподвижной части прибора (к вилке пружинодержателя) 3. Очевидно, что, чем больше ток,



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 78 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

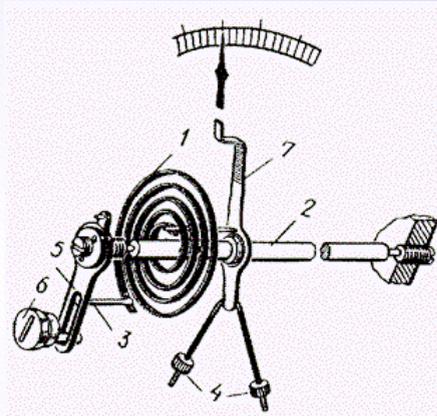


Рисунок 5.1

проходящий через прибор, тем больше вращающий момент, действующий на подвижную часть прибора. Под действием этого вращающего момента подвижная часть прибора поворачивается, закручивая спиральную пружину. Пружина, в свою очередь, препятствует этому повороту. Поворот будет происходить до тех пор, пока вращающий и противодействующий моменты не сравняются. Кроме того, спиральная пружина возвращает подвижную часть прибора в первоначальное (нулевое) положение после того, как прибор выключен из цепи.

Для уравнивания стрелки прибора иногда применяют грузики 4 (противовесы), навинченные на стержни с мелкой резьбой, посредством которой можно изменять расстояние грузиков от оси вращения.

Для установки стрелки прибора против нулевого деления служит корректор, состоящий из поводка 5 и винта 6. Эксцентрично поворачивающийся выступ винта 6 изменяет положение пружинодержателя 3 и одного конца спиральной пружины 1, поворачивая тем самым стрелку 7 в нужную сторону. У многих приборов по две



Начало

Содержание



Страница 79 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

противодействующих пружины. Они помещаются либо рядом, либо у концов оси подвижной системы.

Шкалы приборов. Шкала прибора служит для отсчета значений измеряемой величины. Кроме того, на шкалу обычно наносят условные обозначения, соответствующие характеристикам данного прибора (род измеряемой величины, род тока, класс точности, принцип действия и т. д.).

В многопредельных приборах шкала имеет определенное число условных делений, по которым путем пересчета определяют измеряемую величину в нужных единицах. Шкалы других приборов градуируют непосредственно в значениях измеряемой величины, – это шкалы непосредственного отсчета.

Различают равномерные и неравномерные шкалы. Достоинством равномерной является постоянство масштаба вдоль всей шкалы, что обеспечивает простоту отсчета измеряемой величины в любой части шкалы.

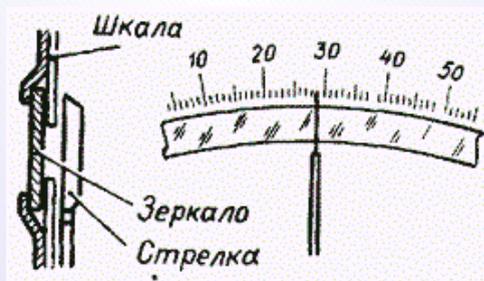


Рисунок 5.2

Обычно в стрелочных приборах стрелка находится на некотором расстоянии от шкалы, а для снятия показаний приборов приходится проецировать положение стрелки на шкалу. При этом положение проекции стрелки зависит от угла между лучом зрения на стрелку и плоскостью шкалы, т. е. от положения глаза относительно стрелки и шкалы. Этот угол должен быть прямым. На практике трудно добиться



Начало

Содержание



Страница 80 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

такого угла, поэтому получается так называемая погрешность от параллакса (параллакс – видимое смещение предмета из-за перемены места наблюдения). Для устранения этой параллактической погрешности на шкалах наиболее точных приборов укрепляют плоскую зеркальную пластину (рисунок 5.2). Отсчёт показаний снимают одним глазом, причем глаз располагают относительно стрелки и шкалы так, чтобы стрелка и ее изображение в зеркале сливались воедино.

Успокоители. Подвижную часть прибора с противодействующей спиральной пружиной можно рассматривать как некоторую колебательную систему. В самом деле, при включении прибора в цепь подвижная его часть под действием толчка, создаваемого быстро нарастающим вращающим моментом, поворачивается, но не сразу может остановиться в положении, в котором вращающий и противодействующий моменты равны (подобно тому, как маятник не в состоянии остановиться, проходя через положение равновесия). Подвижная часть прибора будет совершать затухающие колебания, и для снятия показаний необходимо некоторое время для полной остановки его стрелки.

Для быстрой остановки подвижной части прибора применяют специальные устройства – успокоители. Наиболее распространенными успокоителями являются воздушные и магнитоиндукционные.

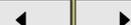
Воздушный успокоитель представляет собой дугообразный цилиндр 1 (рисунок 5.3, а), запаянный с одного конца. Внутри цилиндра находится поршень 2. Он жестко связан с подвижной частью прибора и не касается стенок цилиндра. Зазор между поршнем и цилиндром невелик и при быстрых перемещениях поршня давление внутри цилиндра не успевает выровняться с атмосферным. В цилиндре создаются то сгущения, то разрежения воздуха, которые препятствуют движению поршня и тем самым быстро успокаивают подвижную систему. При медленном же движении поршня часть воздуха может свободно входить в цилиндр и выходить из него через зазор, не препятствуя поворотам подвижной части прибора.

Иногда воздушный успокоитель имеет форму замкнутой коробочки со щелью



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 81 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Заккрыть](#)

(рисунок 5.3, б). Эта щель служит для перемещения рычага 1, на котором укреплена пластинка 2. Последняя не касается стенок коробочки и выполняет ту же роль, что и поршень. При движении пластинки в коробочке одновременно действуют и сгущения (по одну сторону пластинки) и разрежения (по другую сторону), препятствующие колебаниям.

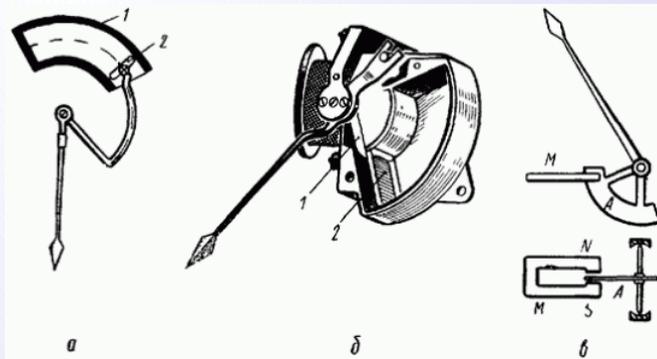


Рисунок 5.3

Магнитоиндукционный успокоитель представляет собой перемещающуюся между полюсами постоянного магнита М (рисунок 5.3, в) легкую алюминиевую пластину А, жёстко связанную с подвижной системой прибора. При колебаниях пластинки в магнитном поле постоянного магнита в соответствии с законом Ленца в ней индуцируются токи, препятствующие этим колебаниям, поэтому колебания подвижной системы и стрелки быстро прекращаются.

Астатические измерительные приборы применяют для устранения влияния внешних магнитных полей на показания электромагнитных и электродинамических приборов. Астатический прибор – это совокупность двух измерительных механизмов, подвижные системы которых объединены в одном приборе и воздействуют на одну и ту же ось со стрелкой. При этом измерительные механизмы



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 82 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

расположены так, что под действием внешнего поля вращающий момент одного из них увеличивается, тогда как другого на столько же уменьшается, а общий вращающий момент, действующий на всю подвижную систему прибора, остается неизменным. На рисунке 5.4 показано устройство астатических электромагнитного (а) и электродинамического (б) механизмов.

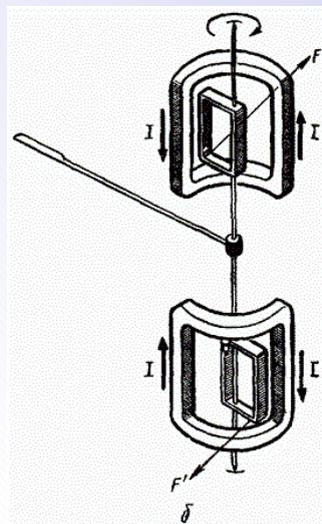
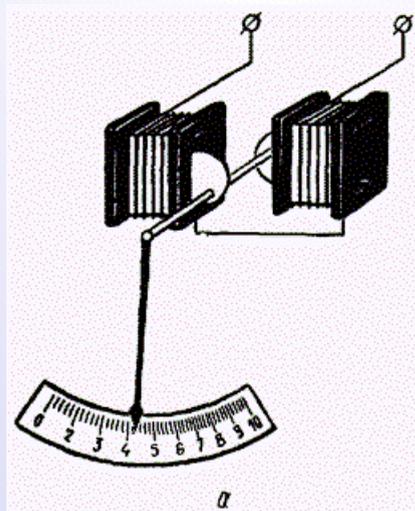


Рисунок 5.4



Начало

Содержание



Страница 83 из 163

Назад

На весь экран

Закреть

Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов. Для правильного выбора приборов и их эксплуатации согласно ГОСТу 2.729–68 на шкалах изображают следующие обозначения:

1) Условное обозначение единицы измерения (или измеряемой величины) либо начальные буквы наименования прибора (таблица 5.1).

Род измеряемой величины	Название прибора	Условное обозначение
Ток	Амперметр	A
	Миллиамперметр	mA
	Микроамперметр	$\mu$ A
Напряжение	Вольтметр	V
	Милливольтметр	mV
Электрическая мощность	Ваттметр	W
	Киловаттметр	kW
Электрическая энергия	Счетчик киловатт-часов	kWh
Сдвиг фаз	Фазометр	$\varphi$
Частота	Частотометр	Hz
Электрическое сопротивление	Омметр	$\Omega$
	Мегомметр	M $\Omega$

Таблица 5.1



Начало

Содержание



Страница 84 из 163

Назад

На весь экран

Заккрыть

2) Условное обозначение системы прибора (таблица 5.2).

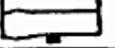
Система прибора	Условное обозначение
Магнитоэлектрическая: с подвижной рамкой и механической противодействующей силой	
с подвижными рамками, без механической противодействующей силы (логометр)	
Электромагнитная: с механической противодействующей силой	
Электродинамическая (без экрана): с механической противодействующей силой	

Таблица 5.2



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 85 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Заккрыть](#)

3) Условные обозначения рода тока и числа фаз, класса точности прибора, испытательного напряжения изоляции, категории прибора по степени защищенности от внешних магнитных полей (таблица 5.3).

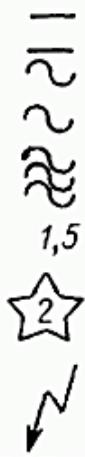
Условное обозначение (ГОСТ 1845—59)	Расшифровка условного обозначения
	<p>Прибор постоянного тока</p> <p>Прибор постоянного и переменного токов</p> <p>Прибор переменного тока</p> <p>Трехфазный прибор</p> <p>Прибор класса точности 1,5</p> <p>Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 кВ</p> <p>Осторожно! Прочность изоляции измерительной цепи не соответствует нормам</p>

Таблица 5.3



Начало

Содержание



Страница 86 из 163

Назад

На весь экран

Заккрыть

## ТЕМА 6. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформатор – это статический электромагнитный аппарат, служащий для преобразования посредством магнитного поля электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока того же или иного напряжения при сохранении частоты тока.

Генераторы электрических станций вырабатывают стандартные напряжения: 3,15; 6,3; 10,5; 15,75 кВ и др. Для передачи электроэнергии на значительные расстояния в целях снижения потерь на нагревание проводов требуются более высокие напряжения до 500 кВ и выше, поэтому на электростанциях напряжение повышается с помощью повышающих трансформаторов. Основная часть потребителей переменного тока использует напряжения от 127 до 500 В. Значительная часть мощных электродвигателей работает при напряжениях 3 – 6 кВ, поэтому напряжение линии электропередачи на месте потребления понижается до нужных значений с помощью понижающих трансформаторов.

Различают силовые трансформаторы (от единиц до нескольких сотен тысяч киловольт–ампер) и трансформаторы малой мощности (10 – 300 ВА). Первые используют в сетях распределения электрической энергии, последние – в разных областях новой техники: в радиоэлектронике, автоматике, реактивной технике и т. д.

### Устройство и принцип действия

Простейший однофазный трансформатор состоит из стального сердечника (рисунок 6.1) и двух обмоток – первичной с числом витков и вторичной с числом витков.

Если к первичной обмотке подвести переменное синусоидальное напряжение, то из-за нелинейной магнитной характеристики ферромагнитного сердечника ток в этой обмотке окажется несинусоидальным.

Об этом несколько подробнее будет сказано ниже. Отметим, что при



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 87 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

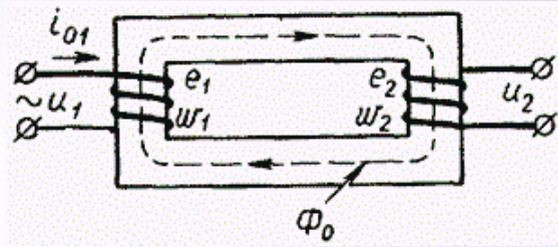


Рисунок 6.1

рассмотрении процессов в трансформаторе несинусоидальные токи в его обмотках заменяются так называемой эквивалентной синусоидой – синусоидальным током, эквивалентным по действующему значению несинусоидальному. Это дает возможность применять к исследованиям и расчетам трансформаторов теорию синусоидальных токов

Итак, если к первичной обмотке трансформатора подвести переменное синусоидальное напряжение, то в ней появится некоторый ток, который в сердечнике создаст переменный магнитный поток. Этот поток, будучи сцепленным с витками обеих обмоток, наведет в них ЭДС.

$$e_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi_0}{dt}$$

$$e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi_0}{dt}$$

Если приложенное напряжение равно

$$u_1 = U_{mL} \sin \omega t$$

то в идеальном трансформаторе (без потерь) его первичная обмотка будет



Начало

Содержание



Страница 88 из 163

Назад

На весь экран

Заккрыть

представлять собой чистую индуктивность и тогда

$$i_{01} = I_{01m} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

магнитный поток совпадает по фазе с током, его создающим:

$$\Phi_0 = \Phi_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

а ЭДС равны

$$e_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = -\omega_1 \omega \Phi_m \cos \omega t - \varepsilon_{m1} \sin \omega t$$

$$e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi_0}{dt} = \omega_2 \omega \Phi_m \cos \omega t - \varepsilon_{m2} \sin \omega t.$$

Поскольку в соответствии со вторым законом Кирхгофа  $\left| \frac{u_2}{u_1} \right| = \left| \frac{e_2}{e_1} \right|$  или

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = k \text{ где } k - \text{ коэффициент трансформации.}$$

Таким образом, трансформатор преобразует подведенное к нему напряжение в соответствии с соотношением числа витков его обмоток. Идеализированный трансформатор передает форму преобразуемого переменного напряжения без искажения.

Векторная диаграмма идеального трансформатора приведена на рисунке 6.2.



Начало

Содержание



Страница 89 из 163

Назад

На весь экран

Заккрыть

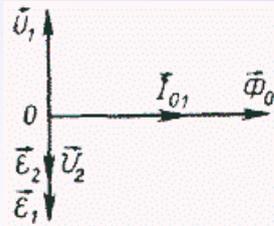


Рисунок 6.2

### Холостой режим работы трансформатора

Режим работы трансформатора, при котором его вторичная обмотка разомкнута, называют холостым режимом или холостым ходом (трансформатор работает без нагрузки). Именно такой режим работы был рассмотрен в предыдущем параграфе. Однако там мы пренебрегли нелинейностью кривой намагничивания стального сердечника, явлением гистерезиса и токами Фуко, действием потоков рассеяния магнитного поля и активным сопротивлением обмотки. В реальном же трансформаторе все эти явления влияют на происходящие в нем процессы. Кратко рассмотрим их.

Нелинейность зависимости первичного тока от магнитного потока, из-за которой намагничивание сердечника заходит в область магнитного насыщения, приводит к тому, что ток в первичной обмотке становится несинусоидальным. Под действием синусоидально изменяющихся приложенного напряжения и магнитного потока в соответствии с кривой намагничивания получается несинусоидальный ток, имеющий несколько заостренную форму (рисунок 6.3).

В соответствии с теоремой Фурье всякий периодический несинусоидальный ток может быть представлен бесконечным рядом, состоящим из постоянной составляющей и суммы переменных составляющих с возрастающими кратными частотами и убывающими амплитудами. Их называют гармоническими



Начало

Содержание



Страница 90 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

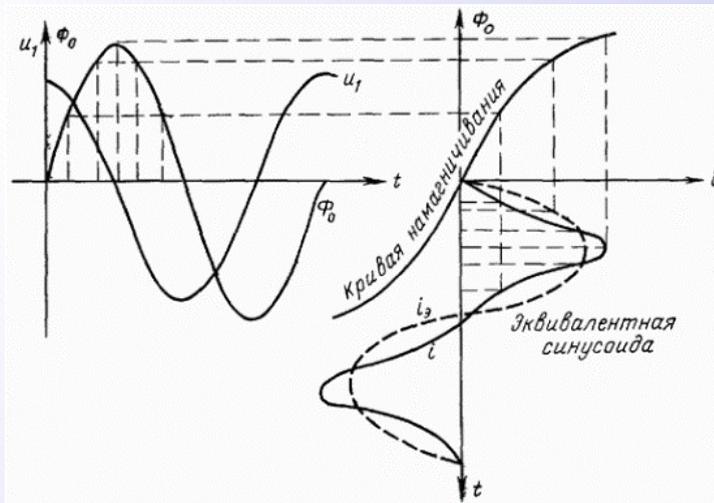


Рисунок 6.3

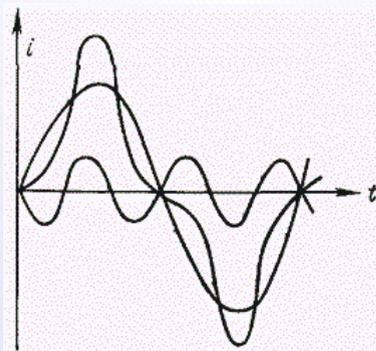


Рисунок 6.4



Начало

Содержание



Страница 91 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

составляющими или гармониками; частота первой (основной) гармоники равна частоте заданной функции:

$$i = I_{m1} \sin(\omega t + \psi_1) + I_{m2} \sin(2\omega t + \psi_2) + I_{m3} \sin(3\omega t + \psi_3) + \dots$$

В зависимости от конкретной задачи такое разложение: может не иметь постоянной составляющей; начальные фазы гармоник могут быть равными нулю или отличаться на  $\pi$ ; может иметь только четные или только нечетные гармоники. Так, несинусоидальный ток, получающийся в результате нелинейности кривой намагничивания сердечника трансформатора, в соответствии с теоремой Фурье может быть представлен в виде суммы двух первых нечетных гармоник (первой и третьей, рисунок 6.4) или заменен «эквивалентной синусоидой» (см. рисунок 6.3). Эквивалентный ток, сдвинутый по фазе относительно приложенного напряжения на поддерживает магнитный поток и является чисто реактивным током. Его называют намагничивающим током

Гистерезис также влияет на форму тока. Как известно, в ферромагнетике, подвергнутом циклическому перемагничиванию, магнитный поток связан с током зависимостью, выражаемой петлей гистерезиса. В результате ток  $i$  в катушке (рисунок 6.5) оказывается несинусоидальным и сдвинутым по фазе относительно потока на некоторый небольшой угол потерь (5–7). Этот ток может быть представлен в виде суммы двух токов – намагничивающего тока (реактивный ток) и тока от гистерезиса (активный ток). Появление тока понятно из физической сущности явления гистерезиса: на перемагничивание сердечника затрачивается энергия, пропорциональная площади петли гистерезиса. Эта энергия идет на нагревание сердечника. Для уменьшения потерь на гистерезис сердечники электрических машин переменного тока изготавливают из специальной трансформаторной стали.

Вихревые токи, или токи Фуко, возникающие в проводниках, находящихся в переменных магнитных полях, возникают и в сердечниках трансформаторов. Замыкаясь в толще сердечника, эти токи нагревают их, создавая потери энергии.



Начало

Содержание



Страница 92 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

Поскольку вихревые токи возникают в плоскостях, перпендикулярных направлению магнитного потока, то для уменьшения этих токов сердечники трансформаторов набирают из отдельных изолированных друг от друга стальных пластин.

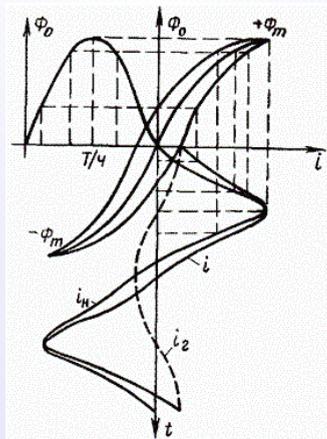


Рисунок 6.5

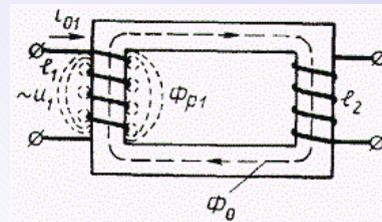


Рисунок 6.6

Потоки рассеяния в сердечнике трансформатора создаются той частью магнитного потока, которая замыкается не через магнитопровод, а через воздух в непосредственной близости от витков. Поскольку потоки рассеяния (рисунок 6.6) замыкаются в основном через воздух, то их можно считать пропорциональными создающим их токам. Потоки рассеяния составляют лишь около 0,25% от основного магнитного потока трансформатора.

Активное сопротивление первичной цепи создает потери за счет активного тока, нагревающего обмотку. Для уменьшения этих потерь обмотки машин выполняют, как правило, из меди.

Теперь учтем все виды потерь в трансформаторе при холостом режиме и построим векторную диаграмму.



[Начало](#)

[Содержание](#)



Страница 93 из 163

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)



на основе которого построим векторную диаграмму холостого режима трансформатора. Для построения в качестве основного возьмем вектор магнитного потока (Рисунок 6.7). Из-за потерь на гистерезис и на вихревые токи этот поток отстаёт от создавшего его тока на угол потерь ( $5 - 7^\circ$ ).

Ток холостого хода обычно мал (3–6% от номинального), угол велик, в режиме холостого хода, а полное падение напряжения на внутреннем сопротивлении равно 0,125 – 0,2%. Поэтому приложенное к первичной обмотке напряжение уравнивается в основном ЭДС, т. е. тогда

$$k = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \approx \frac{U_1}{U_2}$$

где  $k$  – коэффициент трансформации (отношение высшего напряжения к низшему).

На практике режим холостого хода используется для определения коэффициента трансформации  $k$  и потерь в трансформаторе на гистерезис и вихревые токи, на так называемые 'потери в стали'

### Рабочий режим трансформатора

Режим работы трансформатора, при котором во вторичную обмотку включена нагрузка, называют рабочим режимом или режимом нагрузки.

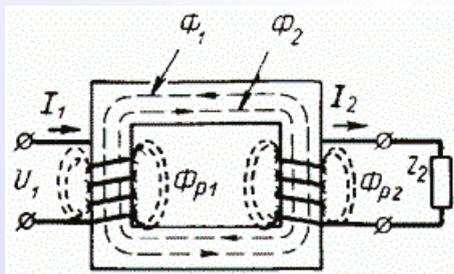


Рисунок 6.8



[Начало](#)

[Содержание](#)



Страница 95 из 163

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Заккрыть](#)

В режиме холостого хода, как известно, основной магнитный поток в сердечнике создает в первичной обмотке ЭДС самоиндукции, уравновешивающую основную часть приложенного напряжения. Так будет до тех пор, пока вторичная обмотка разомкнута. Но если во вторичную обмотку включить какую-нибудь нагрузку, в ней появится ток возбуждающий в том же сердечнике свой магнитный поток (рисунок 6.8), размагничивающе действующий на сердечник (в соответствии с законом Ленца). В результате общий магнитный поток в сердечнике должен уменьшиться. Это последнее приведет к уменьшению ЭДС в первичной обмотке. Теперь часть приложенного напряжения окажется неуравновешенной, что приведет к увеличению тока в первичной обмотке. Очевидно, что ток в первичной обмотке будет возрастать до тех пор, пока не прекратится размагничивающее действие тока нагрузки. После этого результирующий магнитный поток восстановится приблизительно до прежнего значения

Уменьшение нагрузки вторичной обмотки уменьшит ток и магнитный поток, что приведет к нарушению равновесия между приложенным напряжением и ЭДС поэтому ток в первичной обмотке уменьшится до такого значения, при котором результирующий магнитный поток восстановится до прежнего значения.

Таким образом, магнитный поток в трансформаторе остается практически постоянным как в режиме холостого хода, так и в режиме переменной нагрузки (от нуля до максимальной). Это свойство трансформатора называют способностью саморегулирования, т. е. способностью автоматически регулировать значение первичного тока в зависимости от изменений тока нагрузки

Построим векторную диаграмму нагруженного трансформатора.



[Начало](#)

[Содержание](#)



Страница 96 из 163

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Заккрыть](#)

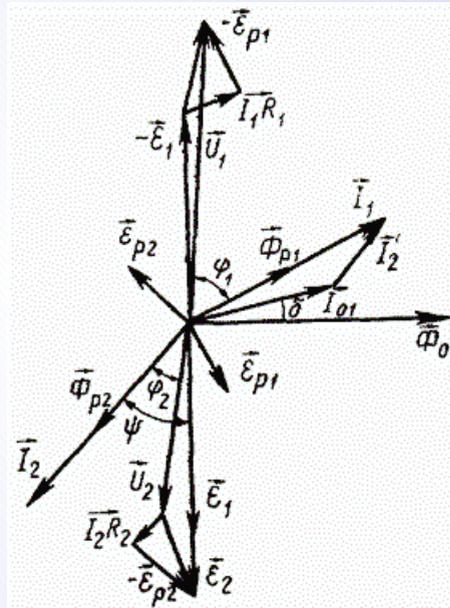


Рисунок 6.9

Пусть трансформатор не имеет потерь. Тогда его мощности равны между собой, откуда

$$I_2' U_1 = I_2 U_2$$

или

$$\frac{I_2}{I_2'} = \frac{U_1}{U_2} = k, I_2' = \frac{I}{k} I_2$$

где  $k$  – коэффициент трансформации. Добавочный ток, выраженный через вторичный ток, называют приведенным вторичным током.

Из векторной диаграммы следует также, что  $\cos \varphi_1$  при холостом ходе мал (угол



Начало

Содержание



Страница 97 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

$\varphi_1$  велик), но по мере увеличения тока нагрузки  $\vec{I}_2$  (растет соответственно к току  $I_{01}$  добавка  $I$ ) ток  $I_1$  растет, а угол  $\varphi_1$  уменьшается. Отсюда следует весьма важный для практики вывод: для повышения коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$  следует полностью загружать трансформатор.



*Начало*

*Содержание*



*Страница 98 из 163*

*Назад*

*На весь экран*

*Закреть*

## ТЕМА 7. МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 7.1 Классификация машин переменного тока

Электрические машины служат для преобразования механической энергии в электрическую (генераторы) либо электрической в механическую (двигатели). Машины переменного тока делятся на асинхронные и синхронные. Такое деление связано с характером вращения магнитного потока и ротора в двигателях переменного тока. Так, в асинхронном двигателе скорость вращения ротора несколько меньше скорости вращения магнитного поля, создаваемого обмоткой статора. Увеличение нагрузки двигателя вызывает уменьшение скорости вращения ротора. В синхронном же двигателе скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля статора и не зависит от нагрузки двигателя. Подобное различие можно усмотреть и в работе асинхронного и синхронного генераторов.

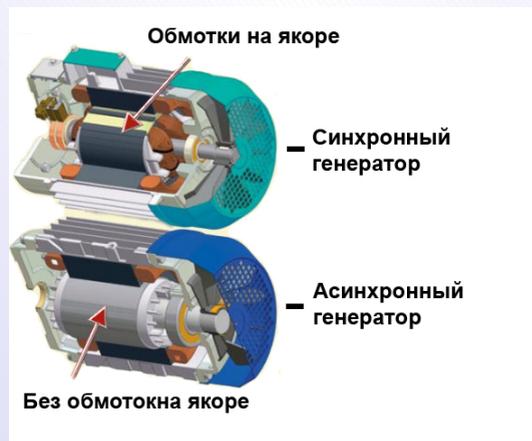


Рисунок 7.1



Начало

Содержание



Страница 99 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

Асинхронные машины используют главным образом как двигатели, а синхронные – как двигатели и генераторы. Практически все генераторы переменного тока синхронные.

Двигатель переменного тока имеет статор с сетевой обмоткой, создающей вращающий момент, и ротор с обмоткой, создающей противодействующий момент. Статор и ротор, выполненные из листовой электротехнической стали, входят в общую магнитную цепь двигателя.

В синхронных генераторах ротор под действием первичного двигателя при своем вращении создает вращающий магнитный поток, наводящий в обмотке статора ЭДС. Таким образом, обмотка ротора создает полюсную систему – индуктор, а обмотка статора генератора является якорем. Все электрические машины переменного тока имеют механическую часть, куда входят: корпус машины (станина), вал ротора, подшипники, в которых вращается вал, и вентиляционное устройство для охлаждения машины.

Конструктивные особенности различных машин переменного тока более подробно рассмотрены ниже.



[Начало](#)

[Содержание](#)



Страница 100 из 163

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Заккрыть](#)

## 7.2 Принцип работы и устройство асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель изобретен в 1889 г. выдающимся русским электротехником М. О. Доливо-Добровольским. Благодаря простоте конструкции и эксплуатации асинхронный двигатель стал основой современного электропривода.

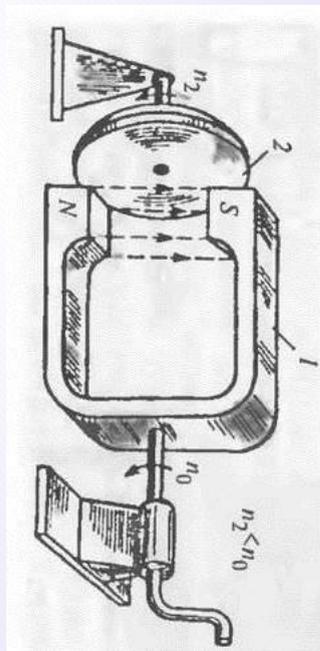


Рисунок 7.2

В основу принципа действия асинхронных двигателей положено явление Араго (Рисунок 7.2), демонстрируемое следующим образом. Под горизонтально подвешенным на нити медным или алюминиевым диском (2) помещают вращающийся подковообразный магнит (1), при этом диск приходит во вращение



Начало

Содержание



Страница 101 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

в ту же сторону, что и магнит. Тот же диск будет вращаться и в случае, если его расположить во вращающемся магнитном поле, создаваемом, например, тремя катушками, включенными в трёхфазную сеть.

Вращение диска в описанных опытах объясняется так. Вращающееся магнитное поле, создаваемое механическим вращением постоянного магнита или токами трехфазной системы в катушках, индуцирует в теле диска вихревые токи. Последние взаимодействуют с вращающимся магнитным полем и в соответствии с законом Ленца начинают приводить диск во вращение. По мере увеличения скорости диска относительная скорость диска и поля уменьшается, уменьшаются индукционные токи в диске и электромагнитные силы. За счет механического трения диск начнет приостанавливаться, однако возрастающая при этом относительная скорость диска и поля приводит к увеличению индукционных токов и электромагнитных сил, и диск станет снова «подталкиваться» и т. д. В конечном счете наступит равновесие между электромагнитным и тормозным моментами, при котором диск будет вращаться с некоторой постоянной скоростью, меньшей скорости вращения магнитного поля, т. е. асинхронно.

Явление асинхронного вращения диска из немагнитного металла во вращающемся магнитном поле положено в основу устройства асинхронных двигателей.

Основными частями асинхронного двигателя являются (рисунок 7.3): статор (1) с рабочей обмоткой, ротор (2) с лопастями вентилятора (3) и два подшипниковых щита (4) с вентиляционными отверстиями.

Сердечник статора собирают из листов электротехнической стали. В специальных пазах, расположенных на внутренней цилиндрической поверхности статора, укладывают рабочие обмотки двигателя. Для включения обмоток звездой и треугольником у обмоток выведены все шесть концов. Ротор асинхронного двигателя представляет собой стальной цилиндрический сердечник, собранный из листов электротехнической стали, с обмоткой в виде «беличьего колеса», которое



[Начало](#)

[Содержание](#)



Страница 102 из 163

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

можно рассматривать как многофазную обмотку (Рисунок 7.4) Здесь каждая пара диаметрально противоположных стержней с соединительными кольцами представляет собой короткозамкнутый виток.

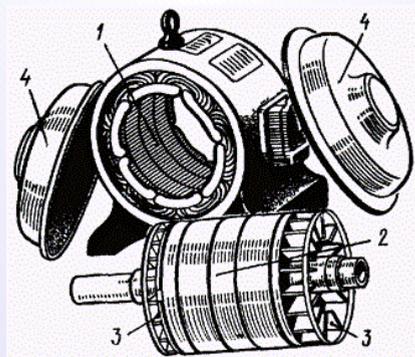


Рисунок 7.3

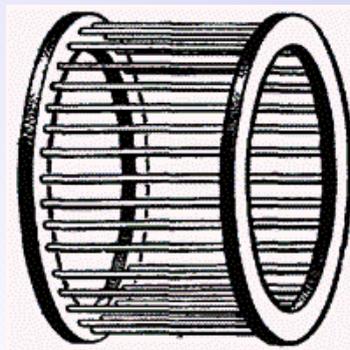


Рисунок 7.4

Вращение ротора можно объяснить следующим образом. Если «белочье колесо», способное вращаться вокруг оси, поместить во вращающееся магнитное поле, то под действием ЭДС, возникающих в стержнях, в короткозамкнутых витках появятся токи. Эти токи, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем статора, приведут «белочье колесо» в асинхронное вращение в ту же сторону, что и поле. Получается асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, так как стержни «белочьего колеса», выполняющие роль рабочей обмотки ротора, замкнуты накоротко через соединительные кольца. Однако из-за большого рассеяния магнитного потока внутри статора (в воздухе) действующее на ротор усилие со стороны вращающегося поля было бы невелико, поэтому «белочье колесо» располагают на поверхности стального цилиндра. Последний собирают из отдельных листов электротехнической стали.



Начало

Содержание



Страница 103 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

## ТЕМА 8. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В современной электроэнергетике используется преимущественно переменный ток, но достаточно широко используется и постоянный. Это объясняется теми достоинствами постоянного тока, которые сделали его незаменимым при решении многих практических задач. Так, среди электрических машин двигатели постоянного тока занимают особое положение. Двигатели постоянного тока позволяют осуществить плавное регулирование скорости вращения в любых пределах, создавая при этом большой пусковой момент. Это свойство двигателей постоянного тока делает их незаменимыми в качестве тяговых двигателей городского и железнодорожного транспорта (трамвай, троллейбус, метро, электровоз, тепловоз). Двигатели постоянного тока используются также в электроприводе некоторых металлорежущих станков, прокатных станов, подъёмно-транспортных машин, экскаваторов. Постоянный ток используется также для питания электролитических ванн, электромагнитов различного назначения, аппаратуры управления и контроля, для зарядки аккумуляторов. Это питание осуществляется от генераторов постоянного тока, приводимых в действие, как правило, асинхронными и синхронными двигателями переменного тока. Однако генераторы часто заменяют выпрямителями (на полупроводниковых диодах и тиристорах) и постоянный ток получают из переменного.

Машины постоянного тока входят также в электрооборудование автомобилей, судов, самолетов и ракет.

### 8.1 Принцип работы и устройство генератора постоянного тока. Типы обмоток якоря

Принцип работы генератора постоянного тока основан на возникновении ЭДС в рамке, вращающейся в магнитном поле (рисунок 8.1, а). За один оборот в каждой рабочей (активной) части рамки ЭДС дважды меняет знак. Чтобы ток во



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 104 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

внешней цепи имел только одно направление (постоянное), применяют коллектор – два полукольца, соединенные с концами рамки, а рамку соединяют с внешней цепью через вращающийся коллектор и неподвижные щетки. Как только активная сторона рамки начнет пересекать линии магнитной индукции в противоположном направлении по сравнению с предыдущим, соединенное с этой стороной полукольцо коллектора начнет соприкасаться с другой щеткой. Благодаря такому устройству направление тока во внешней цепи остается неизменным, хотя его значение изменяется (пульсирует, рисунок 8.1, б).

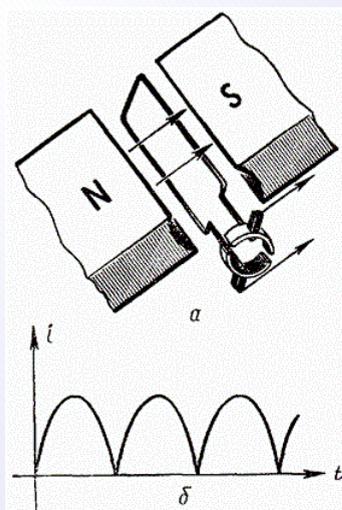


Рисунок 8.1

Устройство промышленного генератора постоянного тока изображено на рисунке 8.2. На внутренней поверхности станины (1) изготовленной из цельного чугунного литья, жестко укреплены главные полюсы (2) с обмотками возбуждения и дополнительные полюсы с обмотками для компенсации ЭДС самоиндукции и



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 105 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Заккрыть](#)

реакции якоря. В большинстве случаев электромагниты питаются от самого генератора. Внутри станины помещается якорь (3), представляющий собой металлический цилиндр, набранный из штампованных пластин электротехнической стали. В продольных пазах на поверхности якоря размещается обмотка якоря, состоящая из соединенных между собой секций. Для сглаживания пульсаций ЭДС и тока обмотка якоря равномерно размещена по всей поверхности, магнитное сопротивление между полюсами уменьшается благодаря стальному сердечнику якоря. Выводы обмоток припаивают к изолированным друг от друга и от корпуса машины медным пластинам коллектора (4), причем конец одной секции и начало следующей припаивают к одной и той же пластине.

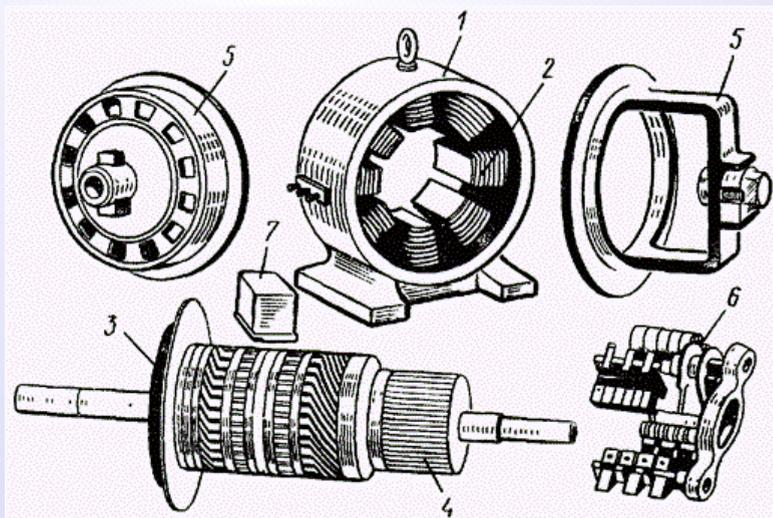


Рисунок 8.2

Коллектор жестко укреплен на валу якоря, на этом же валу крепят и вентилятор. Вал якоря помещается в подшипники подшипниковых щитов (5), укрепляемых



Начало

Содержание



Страница 106 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

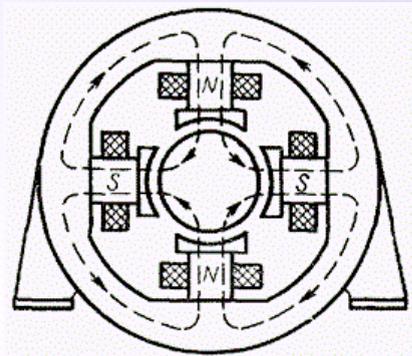


Рисунок 8.3

на боковых сторонах станины. Между якорем и полюсами статора образуется незначительный воздушный зазор, благодаря которому якорь может свободно вращаться. На цилиндрическую поверхность коллектора накладываются угольные щетки, вставленные в щеткодержатели (6). Для уменьшения сопротивления щетки часто прессуются из смеси угольного и медного порошка.

Машины постоянного тока часто делают многополюсными (рисунок 8.3), при этом в каждой секции обмотки за один оборот значение и знак ЭДС изменяются столько раз, сколько полюсов. Магнитная цепь такой машины более сложная, при этом число пар щеток равно числу пар полюсов, а щетки одинаковой полярности соединяют вместе.

Принципы работы генератора постоянного тока рассмотрим более подробно.

Если якорь изготовить в виде кольца и на нем разместить обмотку в виде замкнутого тороида, то такой якорь называют кольцевым, а обмотку – спиральной. При вращении этого якоря в магнитном поле в витках его обмотки будут индуцироваться ЭДС (рисунок 8.4, а). Оказывается, что в витках одной половины обмотки ЭДС имеет один знак, в витках другой половины – противоположный. Если



[Начало](#)

[Содержание](#)

[◀](#) [▶](#)

[◀◀](#) [▶▶](#)

Страница 107 из 163

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

витки равномерно распределены по поверхности якоря, то тока в обмотке не будет, так как действие ЭДС обеих половин взаимно компенсируется. Если, например, у витков с внешней стороны частично снять изоляцию и с двух противоположных сторон наложить две неподвижные щетки ( $a$  и  $b$ ) так, чтобы при вращении якоря они могли касаться каждого витка, то легко заметить, что вся обмотка как бы разделится пополам и при вращении якоря витки одной половины обмотки будут постепенно переходить в другую, при этом число витков каждой половины, полярность и значение ЭДС будут оставаться неизменными. Если теперь подключить нагрузку к щеткам, то во внешней цепи и в каждой половине обмотки установится постоянный ток.

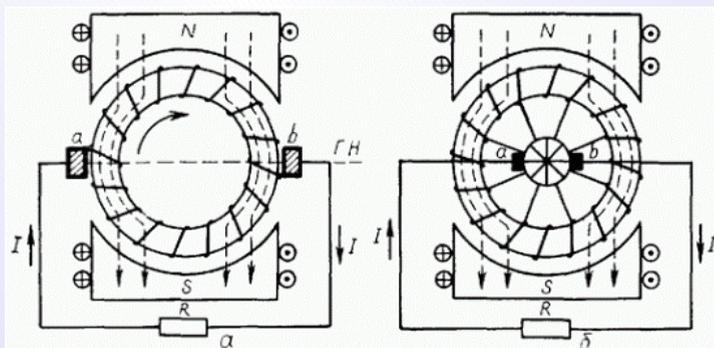


Рисунок 8.4

Очевидно, что для более полного использования ЭДС обмотки щетки надо подключать в тех точках, где ЭДС не наводится. Прямая, проходящая через две такие точки, называется геометрической нейтралью (ГН). При таком расположении щеток обмотка оказывается разделенной на две параллельные ветви, соединенные между собой и внешней цепью щетками. Если щетки сместить относительно геометрической нейтрали, то в части витков каждой параллельной ветви ЭДС будет



Начало

Содержание



Страница 108 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

иметь противоположную полярность, а под щетками может начаться искрение, так как в закорачиваемых щетками витках (секциях) ЭДС отлична от нуля.

Кольцевой якорь можно усовершенствовать, если не снимать изоляцию с витков обмотки, а сделать от них отводы, соединенные с пластинами коллектора, а щетки наложить на коллектор (рисунок 8.4, б). Если у такой машины сделать четыре полюса, то обмотка разделится на четыре части (рисунок 8.5, а). Если далее вместо двух щеток поставить четыре и одноименные соединить между собой (рисунок 8.5, б), то обмотка будет иметь четыре параллельные ветви. Легко видеть, что с увеличением числа параллельных ветвей ток нагрузки может быть соответственно увеличен.

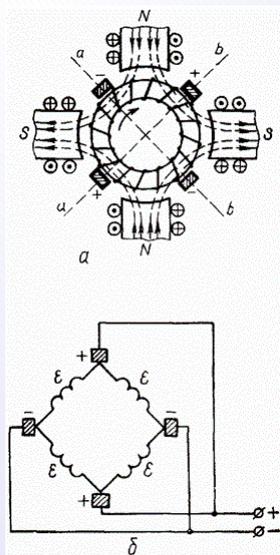


Рисунок 8.5

Рассмотренный выше кольцевой якорь со спиральной обмоткой имеет



[Начало](#)

[Содержание](#)



Страница 109 из 163

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

существенные недостатки. Во-первых, магнитный поток замыкается через стенку кольца (якоря), минуя внутреннюю полость, поэтому активной стороной каждого витка обмотки является та, которая расположена на поверхности, а внутренняя часть витка для получения ЭДС не используется и служит лишь соединительным проводником. Это обстоятельство приводит к нерациональному расходу меди. Во-вторых, спиральную обмотку нельзя сделать по шаблону, поэтому в настоящее время машины с кольцевым якорем не изготавливают.

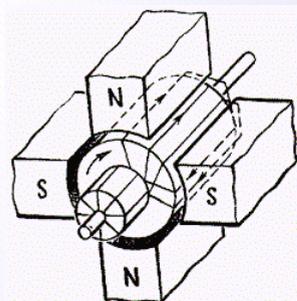


Рисунок 8.6

Недостатки кольцевого якоря устраняют заменой его барабанным. Обмотки барабанного якоря (рисунок 8.6) укладывают в специальные пазы на поверхности цилиндра (якоря) в виде отдельных секций, определенным образом соединенных с пластинами коллектора и между собой. Секция – это часть обмотки между двумя соседними отводами к коллектору. Обе стороны каждой секции являются активными; секции изготавливают по шаблону.



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 110 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

## ТЕМА 9. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Полупроводниками являются кристаллические вещества, у которых при 0 К валентная зона полностью заполнена электронами, а ширина запрещенной зоны невелика. Полупроводники обязаны своим названием тому обстоятельству, что по величине электропроводности они занимают промежуточное положение между металлами и диэлектриками. Однако характерным для них является не величина проводимости, а то, что их проводимость растет с повышением температуры (напомним, что у металлов она уменьшается).

Различают собственные и примесные полупроводники. К числу собственных относятся химически чистые полупроводники. Электрические свойства примесных полупроводников определяются имеющимися в них искусственно вводимыми примесями.

Собственная проводимость возникает в результате перехода электронов с верхних уровней валентной зоны в зону проводимости. При этом в зоне проводимости появляется некоторое число носителей тока – электронов, занимающих уровни вблизи дна зоны; одновременно в валентной зоне освобождается такое же число мест на верхних уровнях, в результате чего появляются дырки.

Распределение электронов по уровням валентной зоны и зоны проводимости, можно сделать очень наглядным, изобразив, как это сделано на рисунке 9.1, график функции распределения совместно со схемой энергетических зон.

Соответствующий расчет дает, что у собственных полупроводников отсчитанное от потолка валентной зоны значение уровня Ферми равно

$$\varepsilon_F = \frac{1}{2}\Delta\varepsilon + \frac{3}{4}kT \ln \frac{m^*}{m^*},$$

где  $\Delta\varepsilon$  – ширина запрещенной зоны, а  $m^*$  и  $m^*$  – эффективные массы дырки и электрона, находящегося в зоне проводимости. Обычно второе слагаемое пренебрежимо мало, и можно полагать  $\varepsilon_F = (1/2)\Delta\varepsilon$ . Это означает, что уровень



Начало

Содержание



Страница 111 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

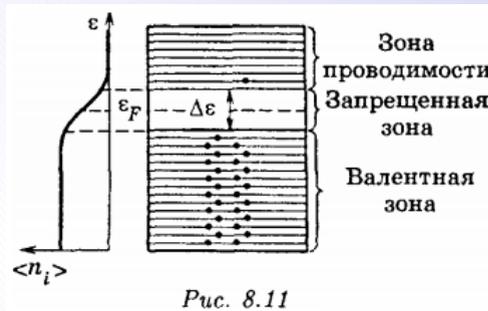


Рис. 8.11

Рисунок 9.1

Ферми лежит посредине запрещенной зоны. Следовательно, для электронов, перешедших в зону проводимости, величина  $\epsilon - \epsilon_F$  мало отличается от половины ширины запрещенной зоны. Уровни зоны проводимости лежат на хвосте кривой распределения. Поэтому вероятность их заполнения электронами можно находить по формуле:

$$f(\epsilon) \sim \exp\left(\frac{\Delta\epsilon}{2kT}\right).$$

Количество электронов, перешедших в зону проводимости, а, следовательно, и количество образовавшихся дырок, будет пропорционально вышеприведённому выражению. Эти электроны и дырки являются носителями тока. Поскольку проводимость пропорциональна числу носителей, она также должна быть пропорциональна этому выражению. Следовательно, электропроводность собственных полупроводников быстро растет с температурой, изменяясь по закону

$$\sigma(\epsilon) = \sigma_0 \exp\left(\frac{\Delta\epsilon}{2kT}\right)$$

где  $\Delta\epsilon$  – ширина запрещенной зоны,  $\sigma_0$  – величина, изменяющаяся с температурой гораздо медленнее, чем экспонента, в связи с чем, ее можно в первом приближении



Начало

Содержание



Страница 112 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

считать константой.

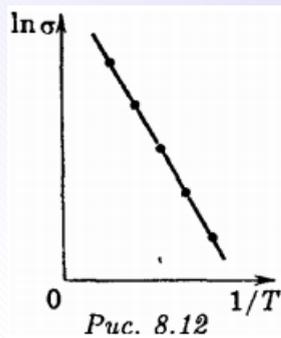


Рисунок 9.2

Если на графике откладывать зависимость  $\ln \sigma$  от  $1/T$ , то для собственных полупроводников получается прямая линия, изображенная на рисунке 9.2. По наклону этой прямой можно определить ширину запрещенной зоны  $\Delta \varepsilon$ .

Типичными полупроводниками являются элементы IV группы периодической системы Менделеева – германий и кремний. Они образуют решетку типа алмаза, в которой каждый атом связан ковалентными (парно-электронными) связями с четырьмя равноотстоящими от него соседними атомами. Условно такое взаимное расположение атомов можно представить в виде плоской структуры, изображенной на рисунке 9.3. Кружки со знаком «+» обозначают положительно заряженные атомные остатки (т.е. ту часть атома, которая остается после удаления валентных электронов), кружки со знаком «-» – валентные электроны, двойные линии – ковалентные связи.

При достаточно высокой температуре тепловое движение может разорвать отдельные пары, освободив один электрон. Покинутое электроном место перестает быть нейтральным, в его окрестности возникает избыточный положительный заряд



Начало

Содержание



Страница 113 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

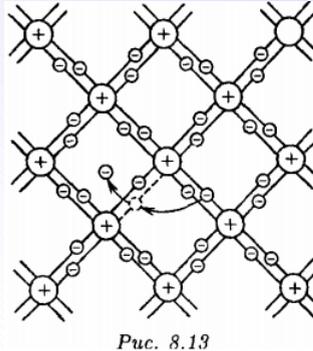


Рисунок 9.3

$+e$ , т.е. образуется дырка. На это место может перескочить электрон одной из соседних пар. В результате дырка начинает также странствовать по кристаллу, как и освободившийся электрон.

При встрече свободного электрона с дыркой они *рекомбинируют* (соединяются). Это означает, что электрон нейтрализует избыточный положительный заряд, имеющийся в окрестности дырки, и теряет свободу передвижения до тех пор, пока снова не получит от кристаллической решетки энергию, достаточную для своего высвобождения. Рекомбинация приводит к одновременному исчезновению свободного электрона и дырки. На схеме уровней процессу рекомбинации соответствует переход электрона из зоны проводимости на один из свободных уровней валентной зоны.

Итак, в собственном полупроводнике идут одновременно два процесса: рождение попарно свободных электронов и дырок и рекомбинация, приводящая к попарному исчезновению электронов и дырок. Вероятность первого процесса быстро растет с температурой. Вероятность рекомбинации пропорциональна как числу свободных электронов, так и числу дырок. Следовательно, каждой температуре соответствует



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 114 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

определенная равновесная концентрация электронов и дырок.

Когда внешнее электрическое поле отсутствует, электроны проводимости и дырки движутся хаотически. При включении поля на хаотическое движение накладывается упорядоченное движение: электронов против поля и дырок в направлении поля. Оба движения – и дырок, и электронов – приводят к переносу заряда вдоль кристалла. Следовательно, собственная электропроводность обуславливается как бы носителями заряда двух знаков – отрицательными и положительными дырками.

Отметим, что при достаточно высокой температуре собственная проводимость наблюдается во всех без исключения полупроводниках. Однако в полупроводниках, содержащих примесь, электропроводность складывается из собственной и примесной проводимостей.

### Примесные полупроводники.

Увеличить проводимость собственного полупроводника уже при комнатных температурах можно за счет легирования, внесения примесей. При внесении в кристаллическую решётку четырёхвалентного Ge т.н. донорной примеси пятивалентного фосфора P, разрешённые уровни примеси попадают в запрещённую зону Ge ближе к дну зоны проводимости (рисунок 9.4). Пятый слабо связанный электрон фосфора не может быть задействован для ковалентной связи с соседними атомами Ge, поэтому он отрывается от атома P и может свободно перемещаться по кристаллу. При этом атом P становится положительным ионом.

Так как донорные примесные уровни отделены от разрешённых уровней в зоне проводимости германия очень узкой энергетической щелью  $\Delta E_A$ , намного меньшей, чем ширина  $\Delta E$  запрещённой зоны, то число электронов в зоне проводимости станет намного больше, чем число дырок в валентной зоне. Поэтому основными носителями тока в донорных полупроводниках являются электроны



Начало

Содержание



Страница 115 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть



в зоне проводимости. Такой полупроводник называется полупроводником  $n$ -типа («негатив» – отрицательный). Число электриков, перешедших с примесных уровней в зону проводимости и пропорционально концентрации дополнительной примеси  $N_A$  и вероятности преодоления энергетического барьера  $\Delta E_A$ . Ещё если учесть электроны, перешедшие из валентной зоны в зоны проводимости (число которых пропорционально вероятности преодоления запретной зоны  $\Delta E$ ), то общая концентрация основных носителей в зоны проводимости:

$$n \sim N_A e^{-\frac{\Delta E}{kT}} + N_0 e^{-\frac{\Delta E}{kT}}.$$

Уровень Ферми при температуре абсолютного нуля находится посередине между примесным уровнем и дном зоны проводимости в верхней части запрещённой зоны.

Концентрация неосновных носителей (дырков) в валентной зоне:

$$p = n_0 e^{-\frac{\Delta E}{kT}}.$$

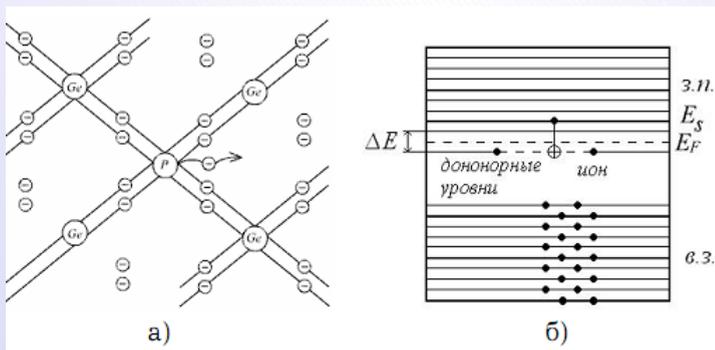


Рисунок 9.4

Начало

Содержание



Страница 116 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

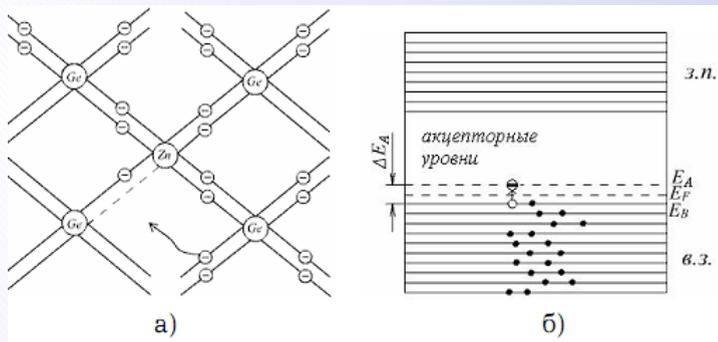


Рисунок 9.5

Чтобы получить полупроводник  $p$ -типа с дырочной проводимостью нужно в четырехвалентный полупроводник внести трехвалентную примесь (например In). Разрешённые уровни этой примеси располагаются в запрещённой зоне Ge вблизи его валентной зоны, и отделены от неё довольно узкой щелью  $\Delta E_A$  (рисунок 9.5). У атома In для образования ковалентной связи с соседними атомами Ge не хватает одного электрона. Поэтому атом In охотно забирает недостающий ему электрон у Ge, превращаясь в отрицательный ион, а в атоме Ge появляется «дырка», на место которой может прийти электрон от другого атома Ge. Таким образом, дырка становится свободным положительным зарядом (носителем тока), способным перемещаться направлено под действием поля  $\vec{E}$ .

С энергетической точки зрения этот процесс выглядит так: электрон Ge преодолевает энергетический барьер  $\Delta E_A$  переходя из полностью заполненной валентной зоны Ge на акцепторный уровень примеси. Образовавшийся при этом отрицательный ион примеси не участвует в проводимости (ион – тяжёлый, и сильно внедрён в кристалл). Освободившееся в валентной зоне свободное место – «дырка» может перемещаться под действием поля  $\vec{E}$ , увеличивая свою энергию.



Начало

Содержание



Страница 117 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

Число появившихся таким образом «дырок» зависит от концентрации  $E_A$  акцепторной примеси и высоты барьера  $\Delta E_A$ .

$$p \sim N_A e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}.$$

Одновременно с этим некоторые электроны Ge могут преодолеть всю запрещённую зону и оказаться в пустой зоне проводимости. Тогда появляется сразу пара носителей: электроны в зоне проводимости и дырка в валентной зоне.

Концентрация электронов в зоне проводимости

$$n = n_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}.$$

Общее число дырок окажется больше, чем электронов в зоне проводимости. Основными носителями в таких полупроводниках являются дырки. Поэтому полупроводник с трехвалентной примесью называют полупроводник  $p$ -типа (позитив – положительный). Уровень Ферми в акцепторных полупроводниках при  $\mu = 0$  находится в нижней части запрещённой зоны посередине между акцепторным уровнем и потолком валентной зоны.

Так как в примесных полупроводниках концентрация носителей тока складывается из концентрации примесных носителей и концентрации собственных носителей, то их электропроводность тоже представляет собой сумму электропроводностей обусловленных собственными и примесными носителями

$$\sigma \approx \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} + \sigma_\delta e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}.$$

### Смешанная проводимость

$P-n$  переход представляет собой тонкий слой на границе между двумя областями одного и того же кристалла, отличающимися типом примесной проводимости.



Начало

Содержание



Страница 118 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

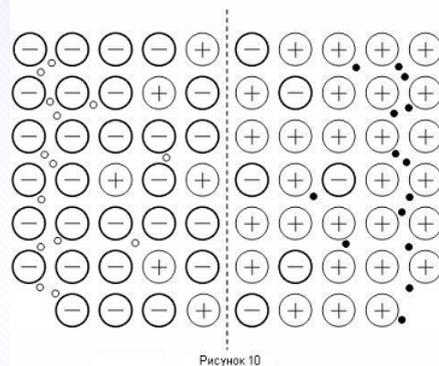


Рисунок 10

Рисунок 9.6

В  $p$ -области основными носителями тока являются дырки, появившиеся в результате перехода электронов из ВЗ кристалла на примесные акцепторные уровни. Сама примесь становится отрицательным ионом, не участвующим в проводимости. Параллельно с этим за счет тепловой энергии возможен переход электронов из ВЗ в ЗП с образованием сразу пары носителей тока: электрон – в ЗП и дырка – в ВЗ. Поэтому в  $p$ -области есть небольшое количество неосновных носителей – электронов в ЗП и много дырок в ВЗ.

В  $n$ -области основные носители тока – электроны, отданные пятивалентной донорной примесью в зону проводимости кристалла. Сами доноры превращаются в положительные ионы.

Наряду с этим тепловое движение переводит часть электронов из ВЗ в ЗП, поэтому в  $n$ -области появляется небольшое число дырок в ВЗ – неосновных носителей для  $n$ -области.

Благодаря диффузии дырки (которых много в  $p$ -области и мало в  $n$ -области) идут в  $n$ -область. Навстречу дыркам из  $n$ -области в  $p$ -область движутся



Начало

Содержание



Страница 119 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

электроны. Встречаясь в контактном слое электроны и дырки рекомбинируют. Поэтому  $-n$  переход сильно обедняется носителями тока и приобретает большое сопротивление. Одновременно с этим в контактном слое толщиной  $\delta_1$  появляется некомпенсированный объемный положительный заряд ионов донорной примеси, а в контактном слое толщиной  $\delta_2$  - области - некомпенсированный дырками отрицательный заряд ионов акцепторной примеси. Между слоями  $\delta_1$  и  $\delta_2$  возникает контактная разность потенциалов  $\Delta\varphi_{\text{в}}$ . Электрическое поле напряженностью  $\vec{\varepsilon}_{\text{в}}$  направлено от  $n$ - к  $p$ -области. Так как электроны в  $p$ -области находятся под отрицательным потенциалом, то энергия их возрастает ( $\Delta E_{\delta} = e_{-}\varphi_{-} > 0$ ). Потенциал  $n$ -области положительный, поэтому энергия электронов в  $n$ -области уменьшается ( $\Delta E_{\delta} = e_{-}\varphi_{+} < 0$ ). Значит в донорной  $n$ -области все уровни будут опускаться, а в  $p$ -области - подниматься. Установится термодинамическое равновесие между  $p$ - и  $n$ -областями для носителей тока. При этом произойдет изгибание энергетических зон в области  $p - n$  перехода: потолок ВЗ в  $p$ -области окажется выше чем в  $n$ -области на величину  $\Delta E_{\text{в}} = |e\varphi_{\text{в}}|$ .

Для того чтобы в условиях равновесия основным носителям (дыркам из  $p$ -области или электронам из  $n$ -области) перейти в соседнюю область им нужно преодолеть потенциальный барьер высотой  $|e\varphi_{\text{в}}|$ . Значит, диффузионный ток основных носителей зависит от высоты барьера и определяется вероятностью преодоления этого барьера

$$I_{n \rightarrow p}^{\text{in}} = B e^{-\frac{\mu_A + e\varphi_e}{kT}}.$$

Встречный поток электронов из  $p$ - в  $n$ -область (неосновные носители) не связан с преодолением барьера (они «скатываются с горки»)

$$I_{n \rightarrow p}^{\text{in}} = B e^{-\frac{\mu_A}{kT}}.$$

В этом случае электроны  $p$ -области, подошедшие к переходу, подхватываются контактным полем  $\vec{\varepsilon}_{\text{в}}$  и переносятся в  $n$ -область.



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 120 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

Подобное движение неосновных носителей под действием  $\vec{\varepsilon}_B$  порождает дрейфовый ток проводимости, величина которого зависит от числа ежесекундно рождающихся неосновных носителей.

В условиях равновесия результирующий ток через  $n$  переход равен нулю:

$$I_{n \rightarrow p}^{in} = I_{n \rightarrow p}^{iani} = I_0 = B e^{-\frac{\mu_A}{kT}} = B e^{-\frac{\mu_A + e\varphi}{kT}}.$$

Установившаяся контактная разность потенциалов:

$$\varphi_B = \frac{\mu_A - \mu_{A1}}{e}.$$

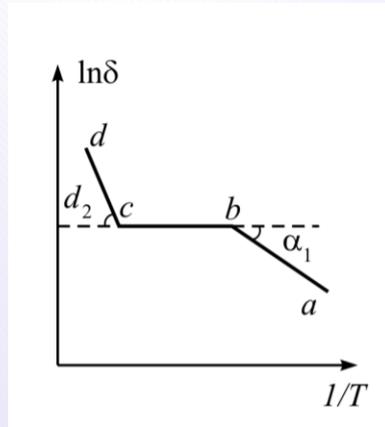


Рисунок 9.7

Зависимость электропроводности смешанного полупроводника от температуры представлена на рисунке 9.7 в виде графика  $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$ . Здесь  $\sigma$  – удельная



Начало

Содержание



Страница 121 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

электропроводность полупроводника. Качественно эта зависимость разбивается на три участка. Участок ab соответствует примесной электропроводности при низких температурах. Угол наклона прямой ab характеризует энергию ионизации примесей, или согласно зонной теории – ширину дополнительных энергетических уровней:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\Delta E}{2k}$$

где  $k$  – постоянная Больцмана. Участок bc соответствует интервалу температур, при котором все примеси уже ионизированы, а собственная электропроводность еще не появилась. И, наконец, участок cd соответствует собственной проводимости полупроводника. По тангенсу наклона прямой cd определяют ширину запрещенной зоны чистого полупроводника:

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{E_c}{2k}.$$

### **Контактные явления в полупроводниках. $P - N$ переход. ВАХ $p - n$ перехода**

В полупроводнике  $n$ -типа основными носителями свободного заряда являются электроны; их концентрация значительно превышает концентрацию дырок ( $n_n \gg n_p$ ). В полупроводнике  $p$ -типа основными носителями являются дырки ( $n_p \gg n_n$ ).

При контакте двух полупроводников  $n$ - и  $p$ -типов начинается процесс диффузии: дырки из  $p$ -области переходят в  $n$ -область, а электроны, наоборот, из  $n$ -области в  $p$ -область. В результате в  $n$ -области вблизи зоны контакта уменьшается концентрация электронов и возникает положительно заряженный слой. В  $p$ -области уменьшается концентрация дырок и возникает отрицательно заряженный слой.



Начало

Содержание



Страница 122 из 163

Назад

На весь экран

Закреть

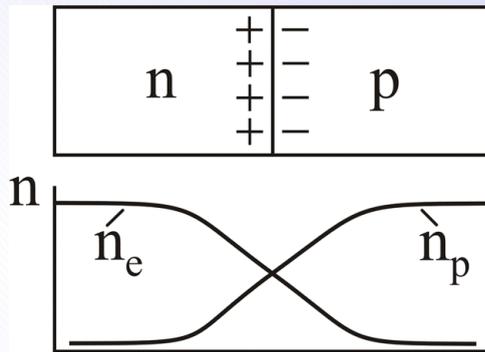


Рисунок 9.8

Таким образом, на границе полупроводников образуется двойной электрический слой  $p - n$  переход), электрическое поле которого препятствует процессу диффузии электронов и дырок навстречу друг другу (рисунок 9.9).

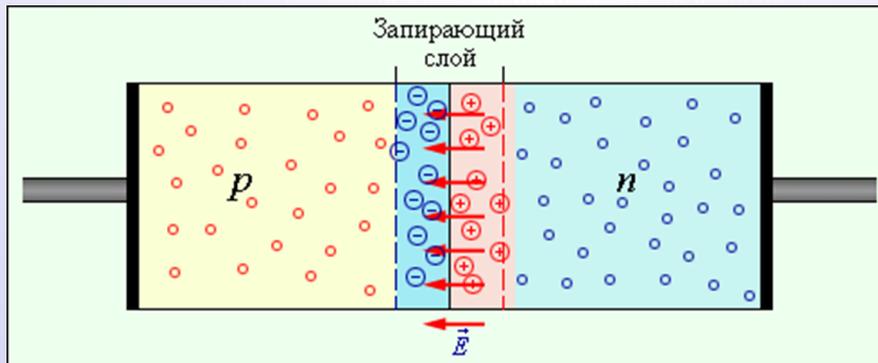


Рисунок 9.9



[Начало](#)

[Содержание](#)



Страница 123 из 163

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Заккрыть](#)



Пограничная область раздела полупроводников с разными типами проводимости (так называемый запирающий слой) обычно достигает толщины порядка десятков и сотен межатомных расстояний. Объемные заряды этого слоя создают между  $p$ - и  $n$ -областями запирающее напряжение  $U_z$ , приблизительно равное 0,35 В для германиевых  $n - p$ -переходов и 0,6 В для кремниевых. Если полупроводник с  $n - p$ -переходом подключен к источнику тока так, что положительный полюс источника соединен с  $n$ -областью, а отрицательный – с  $p$ -областью, то напряженность поля в запирающем слое возрастает.

Дырки в  $p$ -области и электроны в  $n$ -области будут смещаться от  $n - p$ -перехода, увеличивая тем самым концентрации неосновных носителей в запирающем слое. Ток через  $n - p$ -переход практически не идет. Напряжение, поданное на  $n - p$ -переход в этом случае называют обратным. Весьма незначительный обратный ток обусловлен только собственной проводимостью полупроводниковых материалов, то есть наличием небольшой концентрации свободных электронов в  $p$ -области и дырок в  $n$ -области. Если  $n - p$ -переход соединить с источником так, чтобы положительный полюс источника был соединен с  $p$ -областью, а отрицательный с  $n$ -областью, то напряженность электрического поля в запирающем слое будет уменьшаться, что облегчает переход основных носителей через контактный слой.

Дырки из  $p$ -области и электроны из  $n$ -области, двигаясь навстречу друг другу, будут пересекать  $n - p$ -переход, создавая ток в прямом направлении. Сила тока через  $n - p$ -переход в этом случае будет возрастать при увеличении напряжения источника. Способность  $n - p$  перехода пропускать ток практически только в одном направлении используется в приборах, которые называются полупроводниковыми диодами.

Полупроводниковые диоды изготавливаются из кристаллов кремния или германия. При их изготовлении в кристалл с каким-либо типом проводимости вводят примесь, обеспечивающую другой тип проводимости. Полупроводниковые диоды используются в выпрямителях для преобразования

Начало

Содержание



Страница 124 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

переменного тока в постоянный. Типичная вольт-амперная характеристика кремниевого диода приведена на рисунке 9.10.

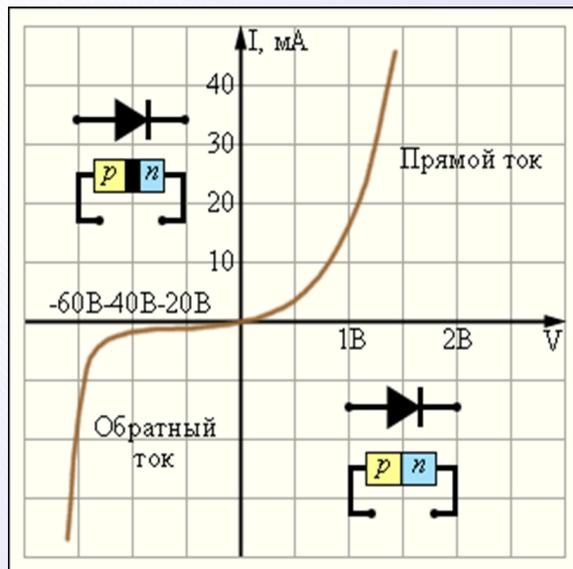


Рисунок 9.10

На графике использованы различные шкалы для положительных и отрицательных напряжений.

Полупроводниковые диоды обладают многими преимуществами по сравнению с вакуумными диодами – малые размеры, длительный срок службы, механическая прочность. Существенным недостатком полупроводниковых диодов является зависимость их параметров от температуры. Кремниевые диоды, например, могут удовлетворительно работать только в диапазоне температур от  $-70^{\circ}\text{C}$  до  $80^{\circ}\text{C}$ . У германиевых диодов диапазон рабочих температур несколько шире.



Начало

Содержание



Страница 125 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

Полупроводниковые приборы не с одним, а с двумя  $n-p$ -переходами называются транзисторами. Название происходит от сочетания английских слов: transfer – переносить и resistor – сопротивление. Обычно для создания транзисторов используют германий и кремний.

Транзисторы бывают двух типов:  $p-n-p$ -транзисторы и  $n-p-n$ -транзисторы. Например, германиевый транзистор  $p-n-p$ -типа представляет собой небольшую пластинку из германия с донорной примесью, то есть из полупроводника  $n$ -типа. В этой пластинке создаются две области с акцепторной примесью, то есть области с дырочной проводимостью. В транзисторе  $n-p-n$ -типа основная германиевая пластинка обладает проводимостью  $p$ -типа, а созданные на ней две области – проводимостью  $n$ -типа.

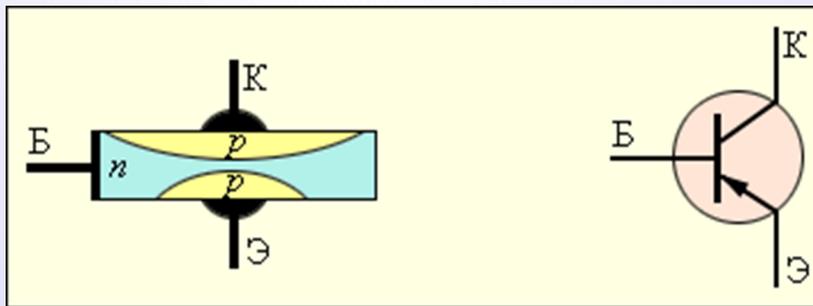


Рисунок 9.11

Пластинку транзистора называют базой (Б), одну из областей с противоположным типом проводимости – коллектором (К), а вторую – эмиттером (Э). Обычно объем коллектора превышает объем эмиттера.

В условных обозначениях разных структур стрелка эмиттера показывает направление тока через транзистор. Оба  $n-p$ -перехода транзистора соединяются с двумя источниками тока. На рисунке показано включение в цепь транзистора



[Начало](#)

[Содержание](#)



Страница 126 из 163

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

$p - n - p$ -структуры.

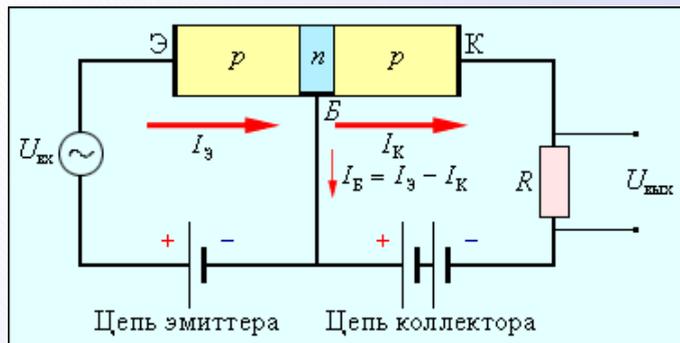


Рисунок 9.12

Переход «эмиттер–база» включается в прямом (пропускном) направлении (цепь эмиттера), а переход «коллектор–база» – в запирающем направлении (цепь коллектора). Пока цепь эмиттера разомкнута, ток в цепи коллектора очень мал, так как для основных носителей свободного заряда – электронов в базе и дырок в коллекторе – переход заперт.

При замыкании цепи эмиттера дырки – основные носители заряда в эмиттере – переходят из него в базу, создавая в этой цепи ток  $I_э$ . Но для дырок, попавших в базу из эмиттера,  $n - p$ -переход в цепи коллектора открыт. Большая часть дырок захватывается полем этого перехода и проникает в коллектор, создавая ток  $I_к$ .

Для того, чтобы ток коллектора был практически равен току эмиттера, базу транзистора делают в виде очень тонкого слоя. При изменении тока в цепи эмиттера изменяется сила тока и в цепи коллектора. Если в цепь эмиттера включен источник переменного напряжения, то на резисторе  $R$ , включенном в цепь коллектора, также возникает переменное напряжение, амплитуда которого может во много раз превышать амплитуду входного сигнала. Следовательно, транзистор



Начало

Содержание



Страница 127 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

выполняет роль усилителя переменного напряжения. Однако, такая схема усилителя на транзисторе является неэффективной, так как в ней отсутствует усиление сигнала по току, и через источники входного сигнала протекает весь ток эмиттера  $I_э$ .

В реальных схемах усилителей на транзисторах источник переменного напряжения включают так, чтобы через него протекал только небольшой ток базы  $I_б = I_э - I_к$ . Малые изменения тока базы вызывают значительные изменения тока коллектора. Усиление по току в таких схемах может составлять несколько сотен.

В настоящее время полупроводниковые приборы находят исключительно широкое применение в радиоэлектронике. Современная технология позволяет производить полупроводниковые приборы – диоды, транзисторы, полупроводниковые фотоприемники и т. д. – размером в несколько микрон.

Качественно новым этапом электронной техники явилось развитие микроэлектроники, которая занимается разработкой интегральных микросхем и принципов их применения.



[Начало](#)

[Содержание](#)



Страница 128 из 163

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закреть](#)

# ПЕРЕЧЕНЬ ЭКЗАМЕНАЦИОННЫХ ВОПРОСОВ

1. История развития и области применения электротехники. Производство, передача и распределение электроэнергии. Элементы техники безопасности.
2. Постоянный ток. Электрические цепи, приёмники и источники электроэнергии. ЭДС, внутреннее сопротивление источника. Законы Ома и Джоуля-Ленца. Мощность постоянного тока.
3. Методы расчёта цепей постоянного тока. Правила Кирхгофа, метод контурных токов, узловых потенциалов (с примерами-иллюстрациями для каждого метода).
4. Переменный ток, способы его получения. Действующее и среднее значение тока. Резистор, конденсатор и катушка в цепи переменного тока.
5. Закон Ома для цепей переменного тока. Векторные диаграммы. Сдвиг фаз. Резонанс в цепях переменного тока. Мощность переменного тока. Коэффициент мощности.
6. Трёхфазный ток. Соединение треугольником и звездой. Мощность трёхфазной системы.
7. Электрические измерения. Погрешности измерений. Класс точности. Обозначения, наносимые на прибор (шкалу прибора). Измерение токов и напряжений. Увеличение пределов измерения амперметра и вольтметра.
8. Электроизмерительные устройства и их основные детали. Классификация приборов (магнитоэлектрические, электромагнитные и т.п.), их отличительные особенности по устройству и принципу действия.
9. Машины постоянного тока: устройство, принцип действия, назначение.
10. Машины переменного тока: устройство, принцип действия, назначение.
11. Трансформаторы, их классификация. КПД трансформатора.
12. Собственная и примесная проводимость полупроводников.  $p$ - $n$ -переход. Включение  $p$ - $n$ -перехода во внешнюю цепь. Полупроводниковые диоды и транзисторы, их виды, конструктивные особенности, обозначение на схемах.



Начало

Содержание



Страница 129 из 163

Назад

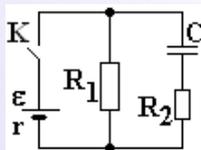
На весь экран

Закрыть

# ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

## ПОСТОЯННЫЙ ТОК

1. Две квадратные пластины со стороной  $a = 300$  мм, закреплённые на расстоянии  $d = 3$  мм друг от друга, образуют плоский конденсатор, подключённый к источнику постоянного напряжения  $U = 250$  В. Расположенные вертикально пластины погружают в сосуд с керосином ( $\varepsilon = 2$ ) со скоростью  $v = 5$  мм/с. Найти силу тока, текущего при этом по подводящим проводам.
2. К проволочному кольцу присоединены подводящие провода. В каком отношении точки присоединения делят длину окружности, если общее сопротивление получившейся цепи в 6,25 раза меньше сопротивления кольца?
3. При перемещении заряда 20 Кл по проводнику сопротивлением 0,5 Ом совершена работа 100 Дж. Найти время, в течение которого по проводнику шёл ток, считая его постоянным.
4. В коробке с тремя выводами А, В и С находится неизвестная схема, состоящая из резисторов. При помощи омметра измерены сопротивления между различными выводами:  $R_{AB} = 10$  Ом,  $R_{BC} = 20$  Ом и  $R_{AC} = 10$  Ом. К точкам А и С подключают батарейку напряжением 1,5 В, а между С и В – амперметр, сопротивление которого 5 Ом. Что он покажет?
5. В схеме, приведённой на рисунке, в начальный момент времени ключ разомкнут, и заряда на конденсаторе  $C$  нет. Найти количество теплоты, которое выделится на резисторе  $R_2$  сразу после замыкания ключа  $K$ .



Начало

Содержание



Страница 130 из 163

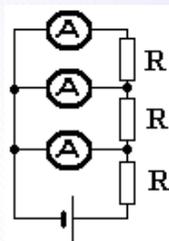
Назад

На весь экран

Закреть

6. Зарядка аккумулятора производится током 4 А. Напряжение на клеммах аккумулятора при зарядке 12,6 В. При разрядке того же аккумулятора током 6 А напряжение на клеммах 11,1 В. Найти ток короткого замыкания.

7. На рисунке все амперметры одинаковые и все резисторы одинаковые. Верхний амперметр показывает 1 мА, средний 4 мА. Напряжение батарейки 4,5 В. Что показывает нижний амперметр и чему равно  $R$ ?



8. Какая масса меди выделится за время 2000 с на катоде при электролизе медной соли, если в течение первой половины этого времени сила тока равномерно возрастает от нуля до 6 А, а в течение второй половины времени равномерно уменьшается до 3 А?

9. Напряжение на резисторе сопротивлением 100 Ом меняется со временем по закону  $U = k \cdot t^{0,5}$ , где  $k = 2$  (численно),  $t$  – время в секундах,  $U$  – напряжение в вольтах. Найти количество теплоты, выделяющееся на резисторе за первые 100 с.

10. За 1 мин через поперечное сечение проводника прошёл заряд 100 Кл. При этом за первые 10 с сила тока равномерно возросла от нуля до некоторого значения  $I$ , а последние 10 с она равномерно уменьшилась до нуля. Найти величину тока  $I$ .

11. Батарея аккумуляторов, соединённых последовательно, подключается один раз к нагрузке сопротивлением 4 Ом, другой раз к нагрузке сопротивлением 25 Ом. Сколько аккумуляторов соединено в батарею, и какова ЭДС одного аккумулятора, если в обоих случаях выделилась одна и та же мощность? Внутреннее сопротивление одного аккумулятора равно 1 Ом.



Начало

Содержание



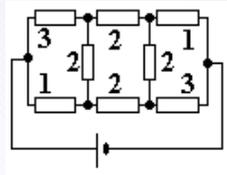
Страница 131 из 163

Назад

На весь экран

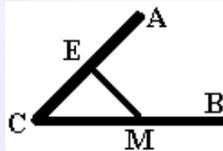
Закрыть

12. Определить сопротивление схемы из резисторов, показанных на рисунке. Значения сопротивлений указаны в Ом.



13. Лампочку, рассчитанную на напряжение 2,5 В и ток 0,2 А, подключают длинными проводами к батарейке. Амперметр, включенный последовательно с лампочкой, показывает ток 0,2 А. Когда лампочку подключили к проводам параллельно с амперметром, она накалилась так же, как и в первом случае. Какой ток показывает амперметр? Батарейку считать идеальной, сопротивление проводов равно 2 Ом.

14. Провод АСВ изогнут так, что точки А, С и В образуют правильный треугольник. К серединам сторон АС и ВС подключена перемычка ЕМ из такого же провода, но с вдвое меньшим сечением. К точкам А и В приложено напряжение  $U$ . Найти падение напряжения на перемычке.



15. Схема содержит 50 разных амперметров и 50 одинаковых вольтметров. Показания первого вольтметра 9,6 В, первого амперметра – 9,5 мА, второго амперметра – 9,2 мА. Определить сумму показаний всех вольтметров.



Начало

Содержание

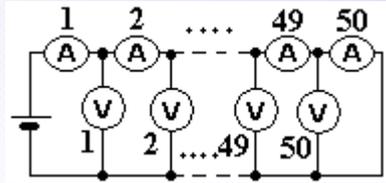


Страница 132 из 163

Назад

На весь экран

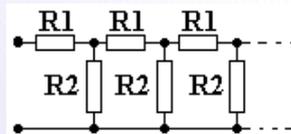
Закрыть



16. Шесть одинаковых проводников, сопротивление каждого из которых 2 Ом, соединены попарно параллельно. Все три пары соединены последовательно и подключены к батарее с внутренним сопротивлением 1 Ом. При этом по каждому проводнику течёт ток 2,5 А. Какой ток будет течь по каждому проводнику, если один из них удалить?

17. Однородный пучок протонов, ускоренных разностью потенциалов 600 кВ, имеет круглое сечение радиуса 5 мм. Найти напряжённость электрического поля на поверхности пучка и разность потенциалов между поверхностью и осью пучка при силе тока 50 мА.

18. Найти сопротивление между точками А и В бесконечной цепи, образованной повторением одного и того же звена – сопротивлений  $R_1 = 4$  Ом и  $R_2 = 3$  Ом.



19. Присоединение к вольтметру некоторого добавочного сопротивления увеличивает предел измерения напряжения в  $n$  раз. Другое добавочное сопротивление увеличивает предел измерения в  $m$  раз. Во сколько раз увеличится предельно измеримое вольтметром напряжение, если включить последовательно с вольтметром эти два сопротивления, соединенные между собой параллельно?

20. При включении шунта, имеющего сопротивление  $R_{ш} = 100$  Ом, параллельно



[Начало](#)

[Содержание](#)



Страница 133 из 163

[Назад](#)

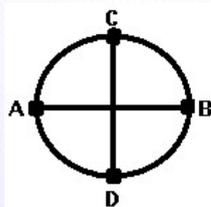
[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

измерительному прибору стрелка отклоняется на всю шкалу при токе во внешней цепи  $I_1 = 3$  А. При включении добавочного сопротивления  $R_{\text{доб}} = 300$  Ом к незашунтированному гальванометру шкала прибора становится в четыре раза грубее, чем без добавочного сопротивления и шунта. Какое сопротивление шунта надо взять для того, чтобы стрелка прибора отклонялась на всю шкалу при токе во внешней цепи  $I_2 = 7,5$  А?

**21.** Дана электрическая цепь, в которой помимо сопротивления  $R$  и источника ЭДС с внутренним сопротивлением  $r$ , находится некоторое сопротивление  $R_0$ , потребляющее мощность  $N$ . Когда к клеммам этого сопротивления подключают параллельно ещё одно такое же сопротивление, то в них обоих также расходуется мощность  $N$ . Чему равно  $R_0$ ?

**22.** Из проволоки, единица длины которой имеет сопротивление  $\rho$ , составлен изображённый на рисунке контур (окружность радиуса  $r$  и два взаимно перпендикулярных диаметра). Найти сопротивление между точками С и D.



**23.** К аккумулятору с внутренним сопротивлением  $r = 1$  Ом подключен нагревательный прибор с сопротивлением  $R = 8$  Ом. Затем параллельно с первым подключили второй такой же прибор. Как изменилось количество теплоты, выделяющееся в единицу времени во внешней цепи?

**24.** Сопротивления проводников 1 и 3, а также ЭДС источников 1 и 3 известны. При какой величине ЭДС источника 2 по сопротивлению 2 ток не потечёт?



Начало

Содержание

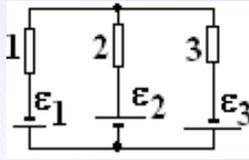


Страница 134 из 163

Назад

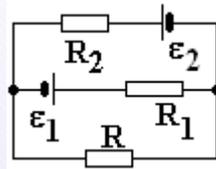
На весь экран

Закреть



25. При длительном пропускании тока  $I_1 = 1,4$  А через проволоку последняя нагрелась до температуры  $t_1 = 55^\circ\text{C}$ , а при пропускании тока величиной  $I_2 = 2,8$  А – до  $t_2 = 160^\circ\text{C}$ . До какой температуры нагревается проволока при токе  $I_3 = 5,5$  А? Теплоотдача с единицы поверхности пропорциональна разности температур проволоки и воздуха. Зависимостью сопротивления проволоки от температуры пренебречь.

26. Найти величину и направление тока через сопротивление  $R$ , если ЭДС источников  $\varepsilon_1 = 1,5$  В,  $\varepsilon_2 = 3,7$  В, а сопротивления равны:  $R_1 = 10$  Ом,  $R_2 = 20$  Ом,  $R = 5$  Ом. Внутренними сопротивлениями источников тока пренебречь.



27. Два цилиндрических проводника одинакового сечения, но с разными удельными сопротивлениями  $\rho_1$  и  $\rho_2$  плотно прижаты торцами друг к другу. Найти заряд на границе раздела проводников, если в направлении от проводника 1 к проводнику 2 течёт ток  $I$ .

28. Никелирование пластины с поверхностью  $100$  см<sup>2</sup> продолжается 4 ч при токе  $0,4$  А. Молярная масса никеля  $58,7 \cdot 10^{-3}$  кг/моль, его валентность 2, плотность  $8,9$  г/см<sup>3</sup>. Определить толщину слоя никеля, который покроет за это время пластину.



Начало

Содержание



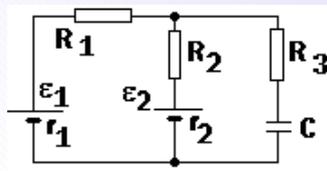
Страница 135 из 163

Назад

На весь экран

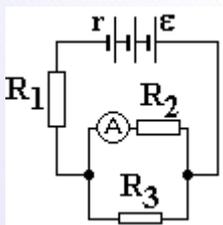
Закрыть

29. Определить заряд  $q$  конденсатора ёмкостью  $C = 2$  мкФ, если величины сопротивлений  $R_1 = 1$  Ом,  $R_2 = 3$  Ом,  $R_3 = 5$  Ом, ЭДС источников тока равны  $\varepsilon_1 = 4$  В,  $\varepsilon_2 = 2$  В, их внутренние сопротивления  $r_1 = 0,25$  Ом,  $r_2 = 0,75$  Ом.



30. Два элемента с одинаковыми ЭДС включены в цепь последовательно, при этом сопротивление внешней цепи 5 Ом. Отношение напряжения на зажимах первого элемента к напряжению второго элемента равно  $2/3$ . Найти внутренние сопротивления элементов, если известно, что внутреннее сопротивление первого элемента в 2 раза больше, чем второго.

31. Батарея аккумуляторов с ЭДС  $\varepsilon = 2,8$  В включена в цепь, как показано на рисунке. Здесь  $R_1 = 1,8$  Ом,  $R_2 = 2$  Ом,  $R_3 = 3$  Ом и амперметр показывает 0,48 А. Определить внутреннее сопротивление батареи. Сопротивлением амперметра пренебречь.



32. Электрический чайник ёмкостью 2 л и мощностью 500 Вт, полный воды, при температуре  $20^\circ\text{C}$  включили в сеть и забыли выключить. Через какое время возникнет опасность пожара, если КПД чайника 70%?



Начало

Содержание



Страница 136 из 163

Назад

На весь экран

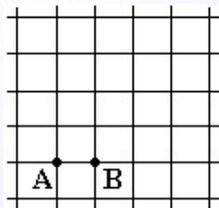
Закрыть



**33.** Необходимо сконструировать печь, на нагревательном элементе которой должна выделяться мощность 2,1 кВт. Напряжение сети равно 220 В, сопротивление подводящих проводов 1 Ом. Каким необходимо сделать сопротивление нагревательного элемента печи?

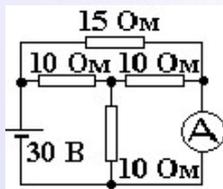
**34.** Если три одинаковых элемента, соединенных параллельно, замкнуть на внешнее сопротивление 0,3 Ом, на нём выделится такая же мощность, как и в случае последовательного соединения девяти таких же элементов. Чему равно внутреннее сопротивление одного из элементов?

**35.** Имеется бесконечная проволочная сетка с прямоугольной ячейкой. Сопротивление каждой из проволок, составляющих ячейку сетки, равно  $r$ . Найти сопротивление сетки между точками А и В.



**36.** Вольтметр имеет сопротивление 2 кОм и измеряет напряжение до 100 В. Какое нужно поставить добавочное сопротивление, чтобы измерить напряжение до 220 В?

**37.** Что покажет амперметр в схеме, изображённой на рисунке? Сопротивление амперметра очень мало.



Начало

Содержание



Страница 137 из 163

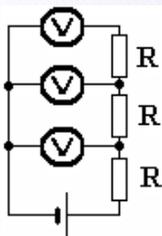
Назад

На весь экран

Заккрыть

**38.** Если на первичную обмотку ненагруженного трансформатора подать напряжение 220 В, то напряжение на вторичной обмотке будет 127 В. Какое напряжение будет на нагрузке 10 Ом, подключенной ко вторичной обмотке этого трансформатора при том же напряжении первичной обмотки? Активное сопротивление первичной обмотки 2 Ом, а вторичной 1 Ом. Внутреннее сопротивление генератора тока принять равным нулю.

**39.** Цепь собрана из одинаковых вольтметров. Нижний вольтметр показывает 10 В, а верхний – 8 В. Каково показание среднего вольтметра?



**40.** Некоторая цепь, имеющая сопротивление 200 Ом, питается от источника постоянного напряжения. Для измерения силы тока в цепь включили амперметр с внутренним сопротивлением 1 Ом. Какова была сила тока в цепи до включения амперметра, если амперметр показал ток 5А?

**41.** Многопредельный амперметр высокой точности содержит для каждого предела измерений отдельный шунт. Амперметр включают в сеть на пределе 10 мА, и он показывает силу тока 2,95 мА; когда его переключили на предел 3 мА, он показал 2,90 мА. Какова была сила тока в цепи до подключения амперметра?

**42.** Три одинаковых источника постоянного тока, ЭДС которых равны 6 В, соединены, как указано на рисунке. Определить разность потенциалов между точками А и В. Сопротивлением соединительных проводов пренебречь.



Начало

Содержание

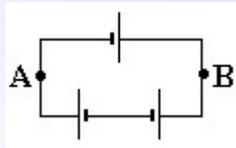


Страница 138 из 163

Назад

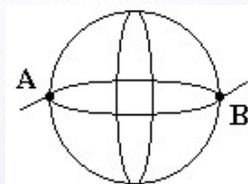
На весь экран

Закреть



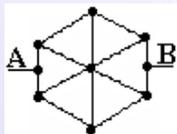
43. Электроплитка содержит три спирали с сопротивлениями 120 Ом каждая, соединённые параллельно друг с другом. Плитка включается в сеть последовательно с сопротивлением 50 Ом. Как изменится время, необходимое для нагревания на этой плитке чайника с водой до кипения, при перегорании одной из спиралей?

44. Из трёх одинаковых проволочных колец сварен каркас, показанный на рисунке. Найти сопротивление между точками А и В, если сопротивление четверти длины каждого кольца равно  $R$ .



45. В сеть напряжением 220 В включены три одинаковых лампочки: две параллельно, а третья последовательно. Определить напряжение на каждой из ламп. В какой из них выделяется наибольшая мощность?

46. Из одинаковых отрезков проволоки сопротивлением  $R$  сварены фигуры в виде шестиугольника. Найти сопротивление между точками А и В.



Начало

Содержание



Страница 139 из 163

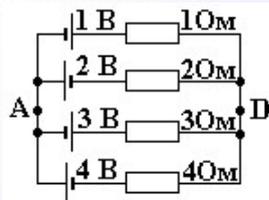
Назад

На весь экран

Заккрыть

47. В старой аккумуляторной батарее, состоящей из  $n$  последовательно соединённых аккумуляторов, резко возросло внутреннее сопротивление одного из аккумуляторов и стало равным  $10r$ , где  $r$  – внутреннее сопротивление нормального аккумулятора. Считая ЭДС всех аккумуляторов одинаковыми, определить, при каких сопротивлениях нагрузки  $R$  мощность, выделяемая на нагрузке, не изменится при коротком замыкании поврежденного аккумулятора.

48. Определить токи, текущие через резисторы. Сопротивлениями источников тока и соединительных проводов пренебречь. Как изменятся токи, если разрезать провода в точках А и D?



49. Кастрюлю, в которую налит один литр воды, никак не удастся довести до кипения при помощи нагревателя мощностью 100 Вт. Определить, за какое время вода остынет на один градус, если отключить нагреватель.

50. К батарее с внутренним сопротивлением 1 Ом подключены последовательно два одинаковых конденсатора. Параллельно одному из них присоединяют резистор сопротивлением 1 кОм, при этом в схеме выделяется некоторое количество теплоты. Какая часть этого тепла выделится на внутреннем сопротивлении батареи?

51. В схеме, указанной на рисунке, лампочка горит одинаково ярко как при замкнутом, так и при разомкнутом ключе К. Сопротивления равны:  $R_1 = R_3 = 90$  Ом,  $R_2 = 180$  Ом, напряжение  $U = 54$  В. Найти напряжение на лампочке.



Начало

Содержание

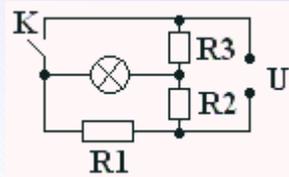


Страница 140 из 163

Назад

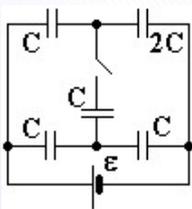
На весь экран

Закреть



**52.** Электрическая цепь состоит из соединённых последовательно источника постоянного напряжения, сопротивления  $500 \text{ Ом}$  и плоского конденсатора, у которого площадь пластин  $4 \text{ см}^2$ , а расстояние между пластинами можно изменять. Если пластины сдвинуты до соприкосновения друг с другом, в цепи течёт ток силы  $0,2 \text{ А}$ . Какой величины заряды будут на пластинах, если пластины раздвинуть на расстояние  $2 \text{ мм}$ ? Внутренним сопротивлением источника пренебречь.

**53.** Какой заряд протечёт через батарею при замыкании ключа на схеме, приведённой на рисунке?



**54.** Лампочка, присоединенная к батарейке, горит три часа, после чего батарейка полностью разряжается. Сделали копию этой батарейки вдвое больших линейных размеров из тех же материалов. Сколько времени будет гореть та же лампочка, подключенная к такой копии? Внутреннее сопротивление батарейки много меньше сопротивления лампочки.

**55.** Определить сопротивление участка АВ цепи, изображённого на рисунке. Цифры указывают сопротивление проводников в Омах.



Начало

Содержание

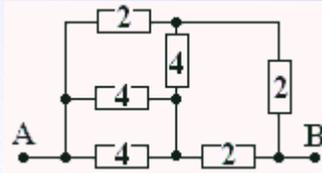


Страница 141 из 163

Назад

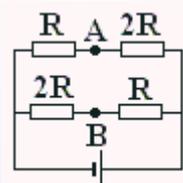
На весь экран

Закрыть



56. Если подключить к источнику ЭДС два одинаковых вольтметра, соединив их параллельно или последовательно, то вольтметры покажут одинаковые напряжения 8 В. Вычислить ЭДС источника.

57. При подключении к точкам А и В схемы вольтметра он показывает 20 В. Что покажет амперметр, если его подключить к тем же точкам вместо вольтметра? Амперметр и вольтметр идеальные.  $R = 50$  Ом, внутренним сопротивлением источника ЭДС пренебречь.



58. Для проведения сварочных работ иногда используют смесь водорода с кислородом, получаемую при электролизе воды. Оценить КПД устройства для электролиза воды, если напряжение между электродами одной его ячейки равно 2 В. Известно, что при сгорании 2 г водорода в кислороде выделяется 0,29 МДж тепла.

59. В сеть включены параллельно электрические чайник и кастрюля, потребляющие мощности 300 Вт и 600 Вт соответственно. Вода в них закипает одновременно через 20 мин. На сколько минут позже закипит вода в кастрюле, чем в чайнике, если их включить в ту же сеть последовательно?



Начало

Содержание



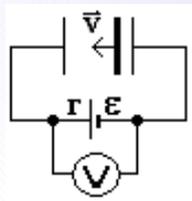
Страница 142 из 163

Назад

На весь экран

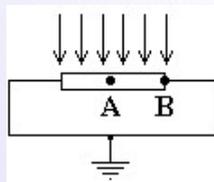
Закрыть

60. В плоский конденсатор, подключенный к источнику с постоянной ЭДС  $\varepsilon$  и внутренним сопротивлением  $r$ , помещена плоская пластина, имеющая заряд  $q$ . Что будет показывать идеальный вольтметр, подключенный к клеммам источника, если двигать пластину с постоянной скоростью  $v$ ? Расстояние между обкладками конденсатора  $d$ .



61. При электрическом разряде в разреженном неоне при комнатной температуре очень небольшая часть атомов неона распадается на электроны и ионы. Масса атома неона  $M$ , масса электрона  $m$ . Длина свободного пробега электронов  $L$ . Газ находится в поле с напряжённостью  $E$ . Оценить температуру электронов, соответствующую их средней кинетической энергии.

62. На однородный стержень, оба конца которого заземлены, падает пучок электронов, причем на каждый сантиметр длины стержня попадает одно и то же число электронов в секунду. Сопротивление стержня  $R$ . Ток на участке заземления равен  $I$ . Найти разность потенциалов между серединой стержня А и его концом В.



63. Потери мощности в линии электропередачи составляют 5% от мощности, получаемой потребителем. Как нужно изменить напряжение на входе линии и



Начало

Содержание



Страница 143 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

сопротивление потребителя для того, чтобы при той же мощности, получаемой потребителем, потери в линии снизить до 1%?

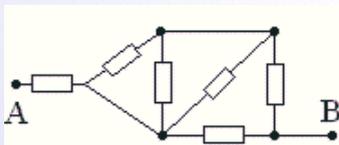
**64.** Два одинаковых вольтметра, соединенных последовательно, при подключении к источнику постоянного тока показывают напряжение 4,5 В каждый. Один вольтметр, подключенный к тому же источнику, показывает напряжение 8 В. Определить ЭДС источника.

**65.** Линия электропередачи должна передать мощность 100 кВт на расстояние 100 км. Потери энергии не должны превышать 2%. Какое минимальное сечение провода с удельным сопротивлением  $1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м пригодно для этой цели, если передаваемое напряжение 5 кВ? Во сколько раз можно уменьшить сечение провода при увеличении напряжения в 10 раз?

**66.** Сколько времени нужно производить электролиз воды, чтобы получить 1 л водорода  $H_2$  при температуре  $27^\circ C$  и давлении  $10^5$  Па. Ток при электролизе 100 А.

**67.** Два одинаковых чайника, каждый из которых потребляет при напряжении 220 В мощность 400 Вт, закипают при последовательном и параллельном включении за одно и то же время. Чему равно сопротивление подводящих проводов?

**68.** Величина каждого сопротивления в схеме, изображенной на рисунке, 1 Ом. Каково сопротивление цепи между точками А и В?



**69.** Резистор сопротивлением  $R = 45$  Ом и конденсатор соединены последовательно с аккумулятором, при этом заряд на обкладках конденсатора равен  $q_1 = 6 \cdot 10^{-5}$  Кл. Если же резистор и конденсатор подключить к аккумулятору параллельно, то заряд



Начало

Содержание



Страница 144 из 163

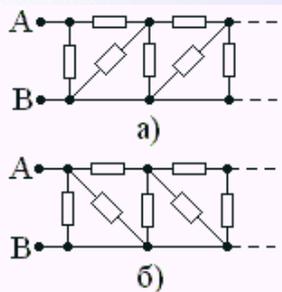
Назад

На весь экран

Закрыть

на обкладках конденсатора будет  $q_2 = 4 \cdot 10^{-5}$  Кл. Найти внутреннее сопротивление аккумулятора.

**70.** Определить сопротивление  $R_{AB}$  бесконечных цепей (рисунки а) и б)), состоящих из периодически повторяющихся одинаковых элементов с сопротивлением  $R$ .



**71.** Один раз сеть постоянного напряжения соединили проводами с резистором  $R_1$ , второй раз с резистором  $R_2$ . При этом в цепи протекали токи силой  $I_1 = 1$  А и  $I_2 = 0,8$  А соответственно. Если в сеть подключить только соединительные провода, то какой силы ток по ним потечёт? Известно, что  $R_2/R_1 = 1,5$ .

**72.** Два электрода – металлические шары диаметра 30 см – висят в море на изолированных кабелях на глубине 60 м. Расстояние между шарами 300 м. Удельная проводимость морской воды 4 См/м. Оценить сопротивление между шарами.

**73.** Атенюатор представляет собой специальный делитель напряжения, схема которого представлена на рисунке. Каковы должны быть сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , чтобы на каждом следующем вертикальном сопротивлении напряжение было в 10 раз меньше, чем на предыдущем?

**74.** Динамомашинa с ЭДС 12 В и внутренним сопротивлением 0,2 Ом заряжает батарею аккумуляторов с ЭДС 10 В и внутренним сопротивлением 0,6 Ом. Параллельно батарее включена лампочка с сопротивлением 3 Ом. Определить токи в батарее и лампочке.



Начало

Содержание

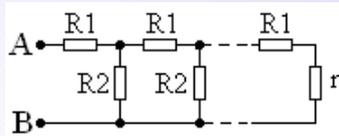


Страница 145 из 163

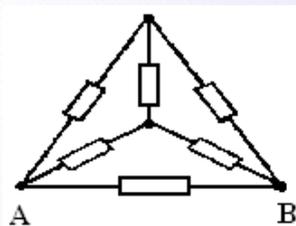
Назад

На весь экран

Закрыть



75. Проводники сопротивлением 1 Ом каждый соединены так, как представлено на рисунке. Найти сопротивление между точками А и В?



76. Электрический чайник закипает через 15 мин после включения его в сеть. Нагревательный элемент намотан из 6 м проволоки. Как нужно переделать нагревательный элемент, чтобы тот же чайник закипал через 10 мин после включения? Потерями тепла в окружающее пространство пренебречь.

77. Батарея из двух одинаковых гальванических элементов, соединенных последовательно, нагружена на внешний резистор 2 Ом, через который за некоторое время протекает заряд 20 Кл. Какой величины заряд протечёт за то же время через каждый элемент, если их соединить параллельно и нагрузить на тот же резистор? Внутреннее сопротивление каждого элемента 0,1 Ом.

78. Из куска однородной проволоки изготовлен замкнутый контур, имеющий форму квадрата ABCD. Батарею подключают сначала к вершинам квадрата А и В, а затем к вершинам А и С. В первом случае сила тока, протекающего через батарею, оказывается в 1,2 раза больше, чем во втором. Определить внутреннее сопротивление батареи, если известно, что сопротивление проволоки, из которой



Начало

Содержание



Страница 146 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

изготовлен квадрат, равно 4 Ом.

**79.** Конденсатор ёмкостью 10 мкФ разряжается через цепь из двух параллельно включенных сопротивлений 10 Ом и 40 Ом. Какое количество тепла выделится на меньшем из сопротивлений, если конденсатор был заряжен до напряжения 100 В?

**80.** Батарея из двух одинаковых параллельно соединенных элементов нагружена на внешнее сопротивление 1 Ом. После того, как элементы соединили последовательно, мощность, выделяемая во внешнем сопротивлении, увеличилась в 2 раза. Чему равно внутреннее сопротивление каждого из элементов?

**81.** Чему равно внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи, если при её разряде через внешнюю цепь с сопротивлением 3 Ом во внешней цепи выделяется 90% запасённой энергии?



Начало

Содержание



Страница 147 из 163

Назад

На весь экран

Закреть

## ОТВЕТЫ

- $I = \varepsilon_0(\varepsilon - 1) a U v / d = 1,1 \text{ нА.}$
- $1 : 4.$
- $t = 2 \text{ с.}$
- $I = 0,09 \text{ А.}$
- $Q = \frac{\varepsilon^2 R_1 R_2 C}{2(R_1 + r)(R_1 r + R_2 r + R_1 R_2)}.$
- $I = 80 \text{ А.}$
- $I = 19 \text{ мА, } R = 148,3 \text{ Ом.}$
- $m = \frac{kt(2I_1 + I_2)}{4} = 2,253.$
- $Q = 200 \text{ Дж.}$
- $I = 2 \text{ А.}$
- $N = 10 \text{ батарей, } \varepsilon = 1 \text{ В.}$
- $R = 8/3 \text{ Ом.}$
- $I = 0,5 \text{ А.}$
- $U_{EM} = U/3.$
- $U_{\Sigma} = 304 \text{ В.}$
- Через сопротивление “без пары” – 4 А, через остальные – 2 А.*
- $E = \frac{2kI}{r} \sqrt{\frac{m}{2qE}} = 0,32 \text{ кВ/м, } \Delta\varphi = 2kI \sqrt{\frac{m}{2qE}} = 0,8 \text{ В.}$
- $R_{AB} = 6 \text{ Ом.}$
- $k = \frac{mn - 1}{m + n - 2}.$
- $R_{\text{шунта}} = 25 \text{ Ом.}$
- $R_0 = \sqrt{2}(r + R).$
- $R_{CD} = \frac{2\pi a r}{\pi + 4}.$



Начало

Содержание



Страница 148 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

23.  $\frac{Q_2}{Q_1} = 2 \left( \frac{R+r}{R+2r} \right)^2 = 1,62.$

24.  $\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1 R_3 + \varepsilon_3 R_1}{R_1 + R_3}.$

25.  $T = 580^\circ\text{C}.$

26.  $I = 0,02 \text{ A}$ , слева направо.

27.  $q = I\varepsilon_0(\rho_1 - \rho_2).$

28.  $d = 19,7 \text{ мкм}.$

29.  $q = 7 \text{ мкКл}.$

30.  $r_1 = 2 \text{ Ом}, r_2 = 1 \text{ Ом}.$

31.  $r = 0,5 \text{ Ом}.$

32.  $t = 4 \text{ ч}.$

33.  $R = 21 \text{ Ом}.$

34.  $r = 0,4 \text{ Ом}.$

35.  $R_{AB} = 0,5r.$

36.  $R = 2,4 \text{ кОм}.$

37.  $I = 3 \text{ A}.$

38.  $U = 110 \text{ В}.$

39.  $U = 8,6 \text{ В}.$

40.  $I_0 = 5,025 \text{ A}.$

41.  $I_0 = 2,97 \text{ mA}.$

42.  $\Delta\varphi_{AB} = -4.$

43.  $t = \frac{242}{243}t_0.$

44.  $R_{AB} = R/2.$

45. 73 В, 73 В, 147 В, в третьей.

46.  $R_{AB} = R.$

47.  $R = 9(n-1)r.$

48. Все токи равны 1 А в обоих случаях.



Начало

Содержание



Страница 149 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

49.  $t = 42 \text{ с.}$

50.  $1/4000.$

51.  $U = 6 \text{ В.}$

52.  $q = 0,2 \text{ нКл.}$

53.  $q = \frac{\varepsilon C}{66}.$

54.  $t = 24 \text{ ч.}$

55.  $R_{AB} = 2 \text{ Ом.}$

56.  $\varepsilon = 24 \text{ В.}$

57.  $I = 0,9 \text{ А.}$

58.  $\eta = 75\%.$

59.  $\Delta t = 135 \text{ мин.}$

60.  $U = \varepsilon + \frac{qvr}{d}.$

61.  $T = \frac{eEL}{6k} \sqrt{\frac{M}{m}}.$

62.  $U_{AB} \approx \frac{IR}{8}.$

63. Увеличить в  $\sqrt{5}$  раз.

64.  $\varepsilon = 10 \text{ В.}$

65.  $S = 7 \text{ см}^2$ , в 100 раз.

66.  $t = 77 \text{ с.}$

67.  $R = 30,25 \text{ Ом.}$

68.  $R_{AB} = 11/7 \text{ Ом.}$

69.  $r = 22,5 \text{ Ом.}$

70. а)  $R_{AB} = R/\sqrt{3}$ , б)  $R_{AB} = \frac{\sqrt{3}-1}{2}R.$

71.  $I = 2 \text{ А.}$

72.  $R = 0,13 \text{ Ом.}$

73.  $R_1/R_2 = 8,1.$



Начало

Содержание



Страница 150 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

74.  $I_1 = 3,65 \text{ A}$ ,  $I_2 = 1,58 \text{ A}$ .  
75.  $R_{AB} = 0,5 \text{ Ом}$ .  
76. Укоротить проволоку до 4 м.  
77.  $q_2 = 5,4 \text{ Кл}$ .  
78.  $r = 0,5 \text{ Ом}$ .  
79.  $Q = 40 \text{ мДж}$ .  
80.  $r = 0,316 \text{ Ом}$ .  
81.  $r = 1/3 \text{ Ом}$ .



Начало

Содержание



Страница 151 из 163

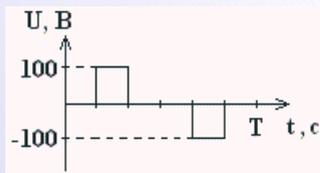
Назад

На весь экран

Закреть

## ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

1. Конденсатор ёмкостью  $4 \text{ мкФ}$  последовательно соединён с катушкой индуктивности  $3 \text{ Гн}$  и сопротивлением  $50 \text{ Ом}$  и подключен к источнику переменного тока напряжением  $220 \text{ В}$  (частота  $50 \text{ Гц}$ ). Чему равно полное сопротивление цепи, падение напряжения на конденсаторе и катушке?
2. Лампочку мощностью  $60 \text{ Вт}$ , рассчитанную на напряжение  $120 \text{ В}$ , необходимо включить в цепь переменного тока напряжением  $220 \text{ В}$  (частота  $50 \text{ Гц}$ ). Найти ёмкость конденсатора, который необходимо подключить последовательно с лампочкой в цепь.
3. Переменное напряжение, действующее значение которого  $220 \text{ В}$  (частота  $50 \text{ Гц}$ ), подано на катушку с индуктивностью  $31,8 \text{ мГн}$  и активным сопротивлением  $10 \text{ Ом}$ . Найти количество теплоты, выделяющееся в катушке за  $1 \text{ с}$ . Как изменится количество теплоты, если последовательно с катушкой подключить конденсатор ёмкости  $319 \text{ мкФ}$ ?
4. В сеть напряжением  $220 \text{ В}$  включены последовательно лампочка мощностью  $200 \text{ Вт}$ , рассчитанная на напряжение  $240 \text{ В}$ , катушка с индуктивностью  $0,15 \text{ Гн}$  и конденсатор. Какова его ёмкость, если активная мощность, выделяемая в цепи, равна половине полной мощности? Найти силу тока и напряжения на всех элементах цепи.
5. Генератор образует прямоугольные импульсы, изображённые на рисунке, с максимальной амплитудой  $100 \text{ В}$ . Какое эффективное напряжение покажет вольтметр, подсоединённый к клеммам генератора?



Начало

Содержание



Страница 152 из 163

Назад

На весь экран

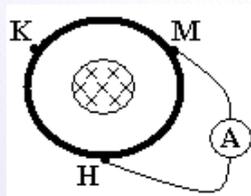
Заккрыть

6. Электрическая лампочка включена в сеть 60 Гц последовательно с катушкой, индуктивность которой 1 Гн. Параллельно лампочке подключили конденсатор неизвестной ёмкости, и оказалось, что лампочка горит при этом с той же яркостью, что и без конденсатора. Определить его ёмкость.

7. Активное сопротивление колебательного контура 0,33 Ом. Какую мощность потребляет контур при поддержании в нём незатухающих колебаний с амплитудой силы тока 30 мА?

8. Дроссель с сопротивлением 20 Ом, индуктивностью 0,05 Гн и реостат сопротивлением 60 Ом соединены параллельно и включены в сеть переменного тока частотой 50 Гц. Какой ток пойдёт по дросселю, если по реостату идёт ток 1,7 А?

9. Проволочное кольцо МНК, сопротивление которого  $R$ , пронизывается магнитным потоком  $\Phi = \Phi_0 \cos \omega t$ , где  $\Phi_0$ ,  $\omega$  – некоторые постоянные величины,  $t$  – время. Магнитное поле сосредоточено в узкой области в центре кольца. Точки М, Н и К делят кольцо на три равные части. Что покажет амперметр переменного тока с сопротивлением  $r$ , если его подсоединить к точкам М и Н? Сопротивлением проводов пренебречь.



10. Концы цепи, состоящей из последовательно включенных конденсатора и активного сопротивления 110 Ом, подсоединили к переменному напряжению с амплитудой 110 В. При этом амплитуда установившегося тока в цепи равна 0,50 А. Найти разность фаз между током и подаваемым напряжением.

11. Катушка и безындукционное сопротивление 25 Ом подключены параллельно к сети переменного напряжения. Найти тепловую мощность, выделяемую в катушке,



Начало

Содержание



Страница 153 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

если из сети потребляется ток  $0,9\text{ A}$ , а через катушку и сопротивление текут токи  $0,5\text{ A}$  и  $0,6\text{ A}$  соответственно.

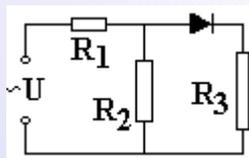
**12.** Электрический паяльник мощности  $50\text{ Вт}$  рассчитан на включение в сеть переменного тока с напряжением  $127\text{ В}$ . Какая мощность будет выделяться в паяльнике, если его включить в сеть переменного тока с напряжением  $220\text{ В}$  последовательно с идеальным диодом? Сопротивление паяльника считать постоянным.

**13.** Лампочку для карманного фонаря, рассчитанную на напряжение  $3,5\text{ В}$  и силу тока  $0,28\text{ А}$ , и конденсатор соединили последовательно и включили в сеть переменного тока с действующим значением напряжения  $220\text{ В}$  (частота  $50\text{ Гц}$ ). Каким должна быть ёмкость конденсатора, чтобы накал лампочки был нормальным?

**14.** В сеть переменного тока с частотой  $50\text{ Гц}$  включили электроплитку, а затем последовательно с ней подключили катушку, в результате чего мощность плитки уменьшилась в  $3$  раза. Рабочее сопротивление плитки  $60\text{ Ом}$ . Активное сопротивление катушки  $2\text{ Ом}$ . Найти индуктивность катушки.

**15.** К генератору переменного напряжения  $36\text{ В}$  (частота  $50\text{ Гц}$ ) подключены параллельно соединённые конденсатор и катушка индуктивности. Ёмкостное сопротивление равно  $2\text{ Ом}$ , индуктивное сопротивление составляет  $4\text{ Ом}$ . Определить силу тока через катушку и конденсатор, а также общую силу тока.

**16.** В схеме, показанной на рисунке,  $R_1 = 10\text{ Ом}$ ,  $R_2 = 20\text{ Ом}$ ,  $R_3 = 15\text{ Ом}$ , напряжение в сети переменного тока  $U = 10\text{ В}$ . Определить мощность, которая выделяется на резисторах с сопротивлением  $R_2$  и  $R_3$ .



Начало

Содержание



Страница 154 из 163

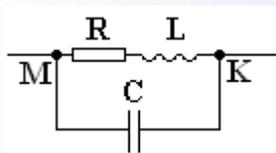
Назад

На весь экран

Заккрыть

17. В сеть переменного тока с напряжением 220 В и частотой 50 Гц подключены последовательно два конденсатора ёмкостью 1 мкФ каждый. Параллельно одному из конденсаторов включен резистор с сопротивлением 100 кОм. Найти тепловую мощность.

18. По участку МК цепи, изображённой на рисунке, течёт ток, который изменяется по закону  $I = At$ . Здесь  $I$  – ток (в амперах),  $t$  – время (в секундах),  $A = 0,01$  А/с – постоянный коэффициент. Омическое сопротивление цепи 0,01 Ом, индуктивность 0,01 Гн, ёмкость 0,1 мкФ. Найти заряд на конденсаторе в момент времени 1 с.



19. Сопротивление 220 Ом и конденсатор подсоединены параллельно к переменного тока с частотой 400 Гц. Найти ёмкость конденсатора, если амплитудное значение тока через сопротивление равно 1 А, а через конденсатор – 2 А.

20. В однородном магнитном поле с индукцией 0,2 Тл равномерно вращается вокруг оси, перпендикулярной полю, квадратная рамка со стороной 20 см. Определить частоту вращения рамки, состоящей из ста витков, если при подключении её к катушке с индуктивностью 0,5 Гн действующее значение напряжения на катушке 20 В. Сопротивление рамки 5 Ом. Активным сопротивлением катушки пренебречь.

21. К магистрали переменного тока с действующим значением напряжения 120 В через дроссель с индуктивностью 0,05 Гн и активным сопротивлением 1 Ом подключена осветительная сеть квартиры (частота 50 Гц). Каково напряжение на входе в квартиру, если потребляемый ток 2 А? Индуктивностью и ёмкостью электрической цепи квартиры можно пренебречь.

22. Цепь подключена к сети переменного тока с напряжением 220 В. Каково напряжение между точками А и В?



Начало

Содержание

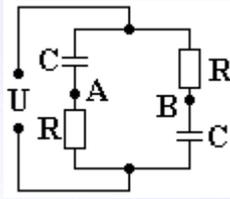


Страница 155 из 163

Назад

На весь экран

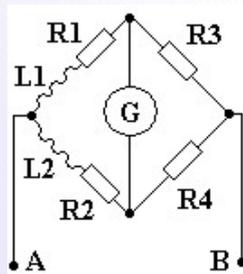
Закрыть



23. Цепь состоит из ключа, а также последовательно соединённых катушки индуктивности  $L$ , источника тока с ЭДС, равной  $\varepsilon$ , и конденсатора ёмкости  $C$ . Найти максимальный ток в цепи и максимальное напряжение на конденсаторе при замыкании ключа.

24. Неоновая лампа включена в сеть переменного тока с частотой 50 Гц и действующим напряжением 127 В. Продолжительность вспышки лампы составляет  $1/200$  с. Напряжения зажигания и гашения лампы одинаковы. Найти эти напряжения.

25. В схеме, изображенной на рисунке,  $R_2 = 90 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 300 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 60 \text{ Ом}$ ,  $L_2 = 90 \text{ Гн}$ . Каковы значения  $R_1$  и  $L_1$ , если через гальванометр  $G$  ток не идет независимо от того, подключен к клеммам А и В источник постоянного или переменного тока?



26. Через нагревательную спираль с постоянным сопротивлением пропускают постоянный ток. На сколько процентов изменится среднее количество тепла,



Начало

Содержание



Страница 156 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

выделяющегося в спирали ежесекундно, если через неё пропускать одновременно ещё и переменный (синусоидальный) ток, амплитудное значение которого составляет 10% от величины постоянного тока?

**27.** Колебательный контур с периодом колебаний 1 мкс имеет индуктивность 0,2 Гн и активное сопротивление 2 Ом. На сколько процентов уменьшится энергия этого контура за время одного колебания? На протяжении нескольких колебаний ток можно считать синусоидальным.

**28.** Первоначально незаряженный конденсатор ёмкости  $C$  подключают к последовательно соединённым батарее с напряжением  $U_0$  и катушке с индуктивностью  $L$ . Ток через катушку вначале увеличивается, а затем уменьшается. В тот момент, когда ток становится равным нулю, конденсатор отключают от схемы и подключают вновь, поменяв местами его выводы. Какой максимальный ток будет после этого течь через катушку? Как изменится этот ток, если процесс переключения повторить  $n$  раз? Сопротивлением цепи пренебречь.

**29.** Напряжение на конденсаторе в идеальном колебательном контуре изменяется по закону  $U = 50 \cos(10^5 t)$  (В) и при этом максимальное значение заряда конденсатора равно  $q_m = 5$  мкКл. Определить индуктивность катушки контура.

**30.** Действующее значение напряжения сети в вечерние часы может падать от 220 до 190 В. Для поддержания мощности кипятильника на прежнем уровне последовательно с ним рекомендуется включать регулируемый источник постоянного напряжения. Каким должно быть его напряжение при минимальном напряжении сети?

**31.** Электродвигатель переменного тока содержит две одинаковые обмотки (индуктивность каждой 1 Гн). Для нормальной работы необходимо, чтобы токи в обмотках были одинаковыми, но сдвиг фаз между ними составлял  $\pi/2$ . При включении в сеть 220 В (частота 50 Гц) одну из обмоток подключают к сети непосредственно, а другую – через последовательно соединённые конденсатор ёмкостью  $C$  и резистор сопротивлением  $R$ . Найти необходимые величины  $R$  и  $C$ .



Начало

Содержание



Страница 157 из 163

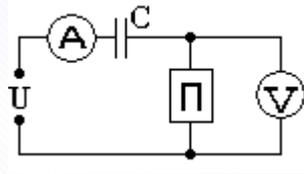
Назад

На весь экран

Закрыть

Тепловыми потерями пренебречь.

**32.** Электрический прибор  $\Pi$  подключен к сети переменного тока с напряжением 220 В через конденсатор ёмкостью 0,5 мкФ. Амперметр показывает ток 0,01 А, показание вольтметра 180 В. Найти мощность, потребляемую от сети прибором. Считать амперметр и вольтметр идеальными.



**33.** К батарее напряжением 4 В последовательно подключены два конденсатора, ёмкости которых 1 мкФ и 3 мкФ. Катушку индуктивностью 1 Гн подключают параллельно конденсатору с меньшей ёмкостью. Найти амплитуду тока в катушке. К моменту подключения катушки напряжения на конденсаторах считать установившимися. Потери в цепи пренебречь.

**34.** Электрический вентилятор с асинхронным двигателем, включенный в сеть 220 В, развивает частоту 1800 об/мин. Чтобы он не гудел так громко, его подключают через автотрансформатор к напряжению 127 В. С какой частотой он будет вращаться? Считать, что нагрузка на лопасти вентилятора определяется перегоняемым воздушным потоком. Трением в подшипниках пренебречь. Силу тока в обмотках статора считать зависящей только от приложенного напряжения.

**35.** Неподалеку от включенного в сеть трансформатора поместили замкнутый виток из медной проволоки. Ток в нём оказался сдвинутым по фазе на  $\pi/4$  относительно тока в обмотке трансформатора. Во сколько раз изменится мощность, рассеиваемая в витке, если сделать его не из меди, а из нихрома, сохранив все размеры неизменными? Удельное сопротивление у нихрома в 65 раз выше, чем у меди. Амплитуду тока в обмотке трансформатора считать одинаковой в обоих



Начало

Содержание



Страница 158 из 163

Назад

На весь экран

Закрыть

случаях.

**36.** К батарее напряжением  $U$  подключают последовательно соединенные конденсатор ёмкостью  $C$  и катушку индуктивностью  $L$ . В некоторый момент параллельно катушке подключают ещё один конденсатор ёмкостью  $C$ . Каким может быть максимальный заряд этого конденсатора? Сопротивлением проводов и внутренним сопротивлением батареи пренебречь.

**37.** Заряженный до напряжения 100 В конденсатор подключают к катушке индуктивностью 0,5 Гн. При какой ёмкости конденсатора сила тока в катушке через 0,01 с окажется не меньше 0,03 А?

**38.** К батарее напряжением 12 В подключают последовательно соединённые конденсатор ёмкостью 1 мкФ и катушку индуктивностью 1 Гн. В тот момент, когда ток через катушку максимален, параллельно ей подключают резистор сопротивлением 1 МОм, а когда ток через катушку снова становится максимальным и течёт в ту же сторону, резистор отключают. Какое количество теплоты выделится при этом в резисторе? Какой заряд через него протечёт?

**39.** При включении первичной обмотки трансформатора в сеть переменного тока во вторичной обмотке возникает напряжение 30 В. При включении в эту же сеть вторичной обмотки на клеммах первичной возникает напряжение 120 В. Во сколько раз число витков первичной обмотки больше числа витков вторичной обмотки?

**40.** Источник переменного напряжения частоты  $\omega$  имеет внутреннее сопротивление  $R$ . Известно, что максимальную мощность в нагрузке можно получить в том случае, когда сопротивление нагрузки в точности равно внутреннему сопротивлению источника. Однако сопротивление нагрузки составляет  $5R$ . Как нужно включить в цепь катушку индуктивности и конденсатор, и какими они должны быть, чтобы мощность в нагрузке оказалась максимально возможной?

**41.** Конденсатор ёмкостью  $C$  подключают к параллельно соединённым катушкам, индуктивности которых  $L_1$  и  $L_2$ . В начальный момент конденсатор не заряжен, через первую катушку течёт ток  $I_0$ , ток второй катушки равен нулю. Найти максимальный



Начало

Содержание



Страница 159 из 163

Назад

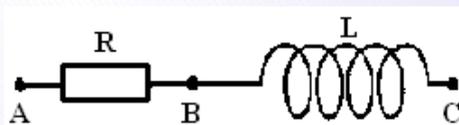
На весь экран

Закрыть

заряд и максимальную величину тока через вторую катушку.

**42.** Катушка индуктивности подключена параллельно конденсатору, и они присоединены к источнику переменного напряжения. Измеренный в цепи источника ток равен 1 А, ток через конденсатор при этом составляет 0,8 А. Во сколько раз нужно изменить частоту источника, чтобы наступил резонанс?

**43.** По участку ABC протекает синусоидальный ток. На участке АВ амплитуда напряжения составляет 30 В, а на участке ВС она равна 40 В. Определить амплитуду напряжения на участке АС.



**44.** Найти мощность, теряемую в проводах, идущих от электростанции к потребителю, при следующих данных: полная мощность тока 100 кВт, эффективное напряжение станции 220 В, сопротивление проводов 0,05 Ом, сдвиг фаз между силой тока и напряжением  $30^\circ$ .

**45.** К источнику переменного напряжения  $u = 300 \sin(200\pi t)$  (В) подключены последовательно катушка индуктивностью  $L = 0,5$  Гн, конденсатор ёмкостью  $C = 10$  мкФ, активное сопротивление  $R = 100$  Ом. Определить амплитудное значение силы тока, сдвиг фаз между током и напряжением, коэффициент мощности и потребляемую мощность.



[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 160 из 163](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Заккрыть](#)

## ОТВЕТЫ

1. 154 Ом, 1137 В, 1346 В.
2.  $C = 8,6 \text{ мкФ}$ .
3.  $Q_1 = 2,4 \text{ кДж}$ ,  $Q_2 = 2Q_1$ .
4. 5,83 мкФ, 0,38 А, 109,4 В, 207,5 В, 17,9 В.
5.  $U = 57,8 \text{ В}$ .
6.  $C = 20 \text{ мкФ}$ .
7.  $P = 0,15 \text{ мВт}$ .
8.  $I = 4 \text{ А}$ .
9.  $I = \frac{3\Phi_0\omega}{\sqrt{2}(9r + 2R)}$ .
10. Ток опережает на  $60^\circ$ .
11.  $P = 2,5 \text{ Вт}$ .
12.  $P = 75 \text{ Вт}$ .
13.  $C = 4 \text{ мкФ}$ .
14.  $L = 0,27 \text{ Гн}$ .
15. 18 А, 9 А, 20 А.
16.  $P_2 = 1,6 \text{ Вт}$ ,  $P_3 = 0,7 \text{ Вт}$ .
17.  $P = 0,12 \text{ Вт}$ .
18.  $q = CA(Rt + L) = 20 \text{ пКл}$ .
19.  $C = 36 \text{ нФ}$ .
20.  $\nu = 5,7 \text{ Гц}$ .
21.  $U = 114 \text{ В}$ .
22.  $U = 220 \text{ В}$ .
23.  $I = \varepsilon\sqrt{\frac{C}{L}}$ ,  $U = 2\varepsilon$ .
24.  $U = 127 \text{ В}$ .
25.  $L_1 = 450 \text{ Гн}$ ,  $R_1 = 450 \text{ Ом}$ .



Начало

Содержание



Страница 161 из 163

Назад

На весь экран

Заккрыть

26. 0,5%.

27. 0,001%.

$$28. I_n = (2n + 1)U_0\sqrt{\frac{C}{L}}.$$

29.  $L = 1$  мГн.

30.  $U = 110$  В.

31.  $C = 10$  мкФ,  $R = 314$  Ом.

32.  $P = 1,53$  Вт.

33.  $I = 6$  мА.

34.  $n = 1260$  об/мин.

$$35. \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{32,5}.$$

$$36. q = \frac{CU}{\sqrt{2}}.$$

37.  $C = 45$  нФ.

38.  $Q = 0,9$  мкДж,  $q = 75$  нКл.

39. В 2 раза.

$$40. L = \frac{2R}{\omega}, C = \frac{1}{2,5\omega R}.$$

$$41. q = I_0\sqrt{\frac{CL_1L_2}{L_1 + L_2}}, I_2 = \frac{2I_0L_1}{L_1 + L_2}.$$

42. Увеличить в 1,5 раза.

43.  $U_{AC} = 50$  В.

44.  $P_0 = 13,77$  кВт.

45. 1,6 А, 57°, 0,54, 1134 Вт.



Начало

Содержание



Страница 162 из 163

Назад

На весь экран

Закреть

# ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

Тест



*Начало*

*Содержание*



*Страница 163 из 163*

*Назад*

*На весь экран*

*Закреть*