

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

Электротехника с основами электроники

Электронное учебно-методическое пособие
для специальности:
2-36 01 01 «Технология машиностроения (по направлениям)»

Минск 2019

Авторы:

Цепелев Д.В., Гутько Е.С.

Рецензенты:

Богородова М.Л., преподаватель спецдисциплин филиала БНТУ «МГПК»,
Белая О.Н., канд. физ.- мат. наук, доцент кафедры физики и методики преподавания
физики учреждения образования «Белорусский государственный педагогический
университет имени Максима Танка»

Учебно-методическое пособие предназначено для самостоятельного и дистанционного изучения учебной дисциплины «Электротехники с основами электроники» учащимися специальности 2-36 01 01 «Технология машиностроения (по направлениям)». В учебно-методическом пособии представлен теоретический и практический материал, а также материал, обеспечивающий контроль знаний для проведения текущей и итоговой аттестации.

Белорусский национальный технический университет.

Филиал БНТУ “Минский государственный политехнический колледж”.

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

Тел.: (017) 292-13-42 Факс: 292-13-42

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

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

Регистрационный № БНТУ/ МГПК- 29.2019

© БНТУ, 2019

© Цепелев Д.В., Гутько Е.С. 2019

Содержание

Пояснительная записка

Вспомогательный раздел

Пояснительная записка

Выписка из учебного плана

Междисциплинарные связи

Типовая учебная программа

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

Литература

Перечень существенных и несущественных ошибок

Примерный перечень оснащения кабинета (лаборатории)

Теоретический раздел

Введение. Общие сведения об учебной дисциплине. Электрическая энергия.

Способы получения.

Раздел 1. Общая электротехника.

Тема 1.1 Электрическое поле.

Тема 1.2 Электрические цепи постоянного тока.

Тема 1.3 Электромагнетизм.

Тема 1.4 Электрические машины постоянного тока.

Тема 1.5 Электрические измерения.

Тема 1.6 Однофазные электрические цепи переменного тока

Тема 1.7 Трёхфазные электрические цепи

Тема 1.8 Трансформаторы

Тема 1.9 Электрические машины переменного тока.

Тема 1.10 Электропривод и аппаратура управления

Тема 1.11 Передача и распределение электроэнергии.

Раздел 2. Основы электроники.

Тема 2.1 Полупроводниковые приборы.

Тема 2.2 Фотоэлектронные приборы.

Тема 2.3 Электронные выпрямители.

Тема 2.4 Электронные усилители

Тема 2.5 Электронные генераторы и приборы отображения информации

Тема 2.6 Интегральные схемы

Обучающий раздел

Методические указания и материалы для проведения лабораторных и практических работ

Лабораторная работа №1. Сборка цепей и исследование схем соединения резисторов.

Лабораторная работа №2. Снятие регулировочной характеристики двигателя постоянного тока, построение графика

Лабораторная работа №3. Измерение сопротивления резисторов различными методами.

[Лабораторная работа №4. Составление схемы и исследование работы неразветвленной цепи переменного тока с активным сопротивлением и индуктивностью.](#)

[Лабораторная работа №5. Сборка и исследование работы трехфазной цепи при соединении потребителей энергии звездой.](#)

[Лабораторная работа №6. Составление схемы и исследование работы однофазного трансформатора.](#)

[Лабораторная работа №7. Составление и исследование схем электромагнитного пускателя.](#)

[Лабораторная работа №8. Снятие статических характеристик биполярного транзистора. Построение графиков.](#)

[Лабораторная работа №9. Исследование формы и значения напряжения в выпрямителях с фильтром и без него.](#)

[Практическая работа №1. Расчет электрических цепей постоянного тока.](#)

[Практическая работа №2. Изучение правил сборки электрических цепей, мер безопасности при работе с электрооборудованием.](#)

[Практическая работа №3. Изучение электромеханических измерительных приборов.](#)

[Практическая работа №4. Расчет неразветвленных однофазных цепей переменного тока. Построение векторных диаграмм.](#)

[Практическая работа №5. Расчет разветвленных цепей переменного тока. Построение векторных диаграмм.](#)

[Практическая работа №6. Расчет параметров диодов, выбор диодов для различных схем выпрямления.](#)

[Раздел контроля знаний](#)

[Перечень тем к входному контролю](#)

[Перечень вопросов к тематическому контролю №1](#)

[Перечень вопросов к тематическому контролю №2](#)

[Перечень вопросов к обязательной контрольной работе №1](#)

[Перечень вопросов к обязательной контрольной работе №2](#)

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программой учебной дисциплины «Электротехника с основами электроники» предусматривается изучение процессов, происходящих в электрических цепях постоянного и переменного тока; устройства, принципа действия электроизмерительных приборов, электромагнитных аппаратов, электрических машин и их практического применения; устройства и принципа действия электронных, фотоэлектронных и полупроводниковых приборов.

Учебная дисциплина изучается в тесной связи с такими учебными дисциплинами общеобразовательного компонента, специального и общепрофессионального циклов, как «Физика», «Химия», «Математика», «Охрана окружающей среды и энергосбережение», «Охрана труда», «Экономика организации», «Технологическое оборудование отрасли», «Автоматизация технологических процессов».

При изложении учебного материала необходимо использовать наглядные пособия: образцы приборов, машин и аппаратов, макеты, плакаты, схемы и диаграммы.

Для закрепления и углубления теоретических знаний учащихся программой предусматривается проведение лабораторных и практических занятий. Перед лабораторными занятиями учащимся даются указания о целях и методах проведения работ, о мерах безопасности труда. Лабораторные работы рекомендуется выполнять непосредственно после изучения соответствующей темы.

Тематика лабораторных и практических работ может быть изменена учреждением образования. В программе приведен дополнительный перечень практических и лабораторных работ.

По всем темам программы сформулированы основные цели их изучения на основе деятельности обучаемого и уровней усвоения содержания изучаемого материала, прогнозируются конкретные результаты достижения этих целей.

В результате изучения учебной дисциплины учащиеся *должны знать на уровне представления:*

физические принципы действия основных электротехнических и электронных приборов;

классификацию электроизмерительных приборов;

обозначения по стандартам электротехнических величин и устройств;

основные единицы измерения электрических величин;

основные схемы электроснабжения промышленных предприятий;

знать на уровне понимания:

основные законы электротехники;

закономерности построения электрических схем;

устройство и принцип действия электропривода оборудования;

технические способы и средства, обеспечивающие электробезопасность;

уметь:

анализировать назначение и принцип действия электрических и магнитных машин, аппаратов, электроприводов;

подбирать по назначению электроизмерительные приборы;

пользоваться электрическими аппаратами и приборами.

В программе приведены примерные критерии оценки результатов учебной деятельности учащегося по учебной дисциплине, которые разработаны на основе десяти-

балльной шкалы и показателей оценки результатов учебной деятельности обучающихся в учреждениях, обеспечивающих получение среднего специального образования (постановление Министерства образования Республики Беларусь от 29 марта 2004 г. № 17).

Приведенный в программе тематический план является примерным. Предметная (цикловая) комиссия может вносить обоснованные изменения в содержание программного материала, в распределение часов по темам с обязательным сохранением общего количества часов, выделенных учебным планом на учебную дисциплину. Изменения, вносимые предметной (цикловой) комиссией в программу, должны быть утверждены заместителем руководителя учреждения образования по учебной работе.

Вспомогательный раздел

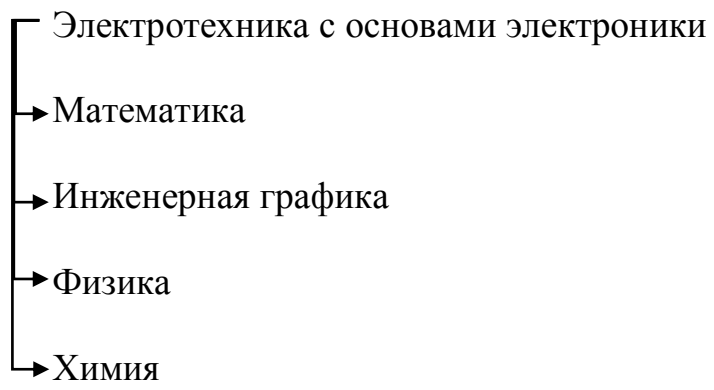
Выписка из учебного плана

по специальности 2-36 01 01 «Технология машиностроения (по направлениям)»

Учебная дисциплина «Электротехника с основами электроники» изучается на протяжении 2 семестров (дневная форма обучения)

Виды работ	Количество часов	
	3 семестр обучения	4 семестр обучения
Всего часов	36	66
Из них: практических занятий	8	4
лабораторных работ	6	12
курсовое проектирование	-	-
Количество: тематических контрольных работ	1	1
Обязательных контрольных работ	-	2
Экзамен	-	-

Междисциплинарная связь



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

Отметка в баллах	Показатели оценки
1 (один)	Узнавание отдельных объектов изучения программного учебного материала, предъявленных в готовом виде (основных электротехнических терминов, понятий, определений и т. д.); наличие многочисленных существенных ошибок, исправляемых с непосредственной помощью преподавателя
2 (два)	Различение объектов изучения программного учебного материала, предъявленных в готовом виде (основных электротехнических терминов, понятий, определений и т. д.); осуществление соответствующих практических действий (элементарный расчет цепей постоянного и однофазного переменного тока, расчет параметров полупроводниковых диодов и т. д.); наличие существенных ошибок, исправляемых с непосредственной помощью преподавателя
3 (три)	Воспроизведение части программного учебного материала по памяти (фрагментарный пересказ и перечисление основных законов цепей постоянного тока, однофазного и трехфазного переменного тока; назначения и применения трансформаторов, электрических машин переменного тока, электронно-лучевой трубки; устройства и применения полупроводниковых, фотоэлектронных приборов и т. д.); осуществление умственных и практических действий по образцу (элементарный расчет цепей постоянного и однофазного переменного тока, определение назначения электроизмерительных приборов, расчет параметров полупроводниковых диодов и т. д.); наличие отдельных существенных ошибок
4 (четыре)	Воспроизведение большей части программного учебного материала (описание с элементами объяснения основных параметров электрического поля, проводников, диэлектриков, полупроводников, закона Ома, законов Кирхгофа, явления электромагнитной индукции, классификации электроизмерительных приборов, параметров однофазного и трехфазного переменного тока; устройства и применения трансформаторов, электрических машин переменного тока, электронно-лучевой трубки, полупроводниковых и фотоэлектронных приборов и т. д.); применение знаний в знакомой ситуации по образцу (расчет цепей постоянного тока, подбор по назначению электроизмерительных приборов, расчет параметров полупроводниковых диодов и т. д.); наличие единичных существенных ошибок
5 (пять)	Осознанное воспроизведение большей части программного учебного материала (описание основных параметров электрического поля, проводников, диэлектриков, полупроводников, закона Ома, законов Кирхгофа, основных параметров магнитного поля; принципа действия электрических машин постоянного тока; классификации электроизмерительных приборов; электромагнитного пускателя; назначения и применения электронно-лучевой трубки, электронных выпрямителей, электронных усилителей; описание с

Отметка в баллах	Показатели оценки
	<p>объяснением сущности электромагнитной индукции, самоиндукции; параметров однофазного и трехфазного переменного тока; устройства и применения полупроводниковых и фотоэлектронных приборов и т. д.); применение знаний в знакомой ситуации по образцу (расшифровка условных обозначений на шкале прибора, подбор по назначению электромеханических измерительных приборов, расчет цепей постоянного и однофазного переменного тока, параметров полупроводниковых диодов и т. д.); наличие несущественных ошибок</p>
6 (шесть)	<p>Полное знание и осознанное воспроизведение всего программного учебного материала; владение программным учебным материалом в знакомой ситуации (описание и объяснение характеристик электрического поля, характеристик проводников, диэлектриков и полупроводников, закона Ома, законов Кирхгофа; основных параметров магнитного поля; явления электромагнитной индукции, самоиндукции; принципа действия электрических машин постоянного тока; классификации электроизмерительных приборов; параметров однофазного переменного тока, трехфазного тока; назначения, применения, принципа действия трансформаторов, электрических машин переменного тока, электромагнитного пускателя; устройства и принципа действия электронно-лучевой трубки, полупроводниковых и фотоэлектронных приборов; назначения и области применения электронных выпрямителей, усилителей, интегральных микросхем; выявление и обоснование выбора схем включения потребителей в трехфазную цепь, трансформаторов, электрических машин переменного тока, полупроводниковых и фотоэлектронных приборов для применения в различных устройствах и т. д.), выполнение заданий по образцу, на основе предписаний: расшифровка условных обозначений на шкале прибора, подбор по назначению электромеханических измерительных приборов, чтение схем включения в цепь различных измерительных приборов, определение цены деления приборов, расчет цепей постоянного и однофазного переменного тока, параметров полупроводниковых диодов, составление схем выпрямителей и т. д.); наличие несущественных ошибок</p>
7 (семь)	<p>Полное, прочное знание и воспроизведение программного учебного материала; владение программным учебным материалом в знакомой ситуации (развернутое описание и объяснение характеристик электрического поля, проводников, диэлектриков и полупроводников, закона Ома, законов Кирхгофа; основных параметров магнитного поля; принципа действия электрических машин постоянного тока; классификации электроизмерительных приборов; параметров однофазного переменного тока, трехфазного тока; назначения, применения, принципа действия трансформаторов, электрических машин переменного тока, электромагнитного пускателя; устройства и принципа действия электронно-лучевой трубки, полупроводниковых и фотоэлектронных приборов; назначения и области применения электронных выпрямителей, усилителей, интегральных микросхем и т. д.; раскрытие сущности явлений электромагнитной индукции, самоиндукции; обоснование величин однофазного тока, формулирование выводов и т. д., недостаточно самостоятельное выполнение заданий: расшифровка условных обозначений на шкале прибора, выбор по назначению электромеханических измерительных приборов, чтение схем включения в цепь различных измерительных приборов, определение цены деления приборов, расчет цепей постоянного и однофазного переменного тока, параметров полупроводниковых диодов,</p>

Отметка в баллах	Показатели оценки
	составление схем выпрямителей и т. д.); наличие единичных несущественных ошибок
8 (восемь)	<p>Полное, прочное, глубокое знание и воспроизведение программного учебного материала; оперирование программным учебным материалом в знакомой ситуации (развернутое описание и объяснение характеристик электрического поля, проводников, диэлектриков и полупроводников, закона Ома, законов Кирхгофа; основных параметров магнитного поля; принципа действия электрических машин постоянного тока; классификации электроизмерительных приборов; параметров однофазного переменного тока, трехфазного тока; назначения, применения, принципа действия трансформаторов, электрических машин переменного тока, электромагнитного пускателя; устройства и принципа действия электронно-лучевой трубки, полупроводниковых и фотоэлектронных приборов; назначения и области применения электронных выпрямителей, усилителей, интегральных микросхем; раскрытие сущности явлений электромагнитной индукции, самоиндукции; обоснование величин однофазного тока, формулирование выводов и т. д.; самостоятельное выполнение заданий: расшифровка условных обозначений на шкале прибора, выбор по назначению электромеханических измерительных приборов, чтение схем включения в цепь различных измерительных приборов, определение цены деления приборов, расчет цепей постоянного и однофазного переменного тока, параметров полупроводниковых диодов, составление схем выпрямителей и т. д.); наличие единичных несущественных ошибок</p>
9 (девять)	<p>Полное, прочное, глубокое системное знание программного учебного материала; оперирование программным учебным материалом в частично измененной ситуации (применение учебного материала для составления схем смешанного соединения резисторов, параллельного соединения потребителей энергии разного характера в однофазных цепях переменного тока, соединения потребителей энергии треугольником в трехфазной цепи и т. д.; выдвижение предположений о возможности использования электрических машин постоянного и переменного тока в автоматических устройствах оборудования отрасли и т. д., наличие действий творческого характера для расчета параметров полупроводниковых приборов и т. д.)</p>
10 (десять)	<p>Свободное оперирование программным учебным материалом; применение знаний и умений в незнакомой ситуации (самостоятельные действия по описанию и объяснению устройства и принципа действия новых типов трансформаторов, электрических машин постоянного и переменного тока, полупроводниковых приборов и интегральных микросхем и т. д., выполнение творческих заданий по расчету электрических цепей постоянного тока, однофазного и трехфазного переменного тока, полупроводниковых приборов и т. д.)</p>

Литература

1. Усс Л.В. Общая электротехника с основами электроники: учеб. пособие для среднеспециальных учебных заведений / Л.В. Усс, А.С. Красько, Г.С. Климович – Минск : Высшая школа, 1990. – 415 с. : ил.
2. Евдокимов Ф.Е. Теоретические основы электротехники: Учебник для техникумов/ Ф.Е. Евдокимов. — Москва : Высшая школа, 1994. — 488 с. : ил.
3. Криштафович А.К. Основы промышленной электроники / А.К. Криштафович, В.В. Трифонюк — Москва : Высшая школа, 1994. -287 с. : ил.
4. Данилов И.А. Общая электротехника с основами электроники / И.А. Данилов, П.М. Иванов — Москва : Высшая школа, 2000. - 752 с. : ил.
5. Шандриков А.С. Электротехника с основами электроники: учеб. пособие / А.С. Шандриков, —Минск: РИПО, 2016. — 318 с. : ил.
6. Березкина Т.Ф. Задачник по общей электротехнике с основами электроники: учеб. Пособие для неэлектротехн. спец. техникумов. / Т.Ф.Березкина, Н.Г.Гусев, В.В.Масленников — Москва : Высшая школа, 1991 – 380 с. : ил.

**Перечень существенных и несущественных ошибок
по учебной дисциплине «Электротехнике с основами электроники»
для специальностей**

2-36 01 01 «Технология машиностроения (по направлениям)».

Существенные ошибки:

В изложении теоретического материала:

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

При выполнении практических работ:

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

Несущественные ошибки:

В изложении теоретического материала:

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

При выполнении практических работ:

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

Примерный перечень оснащения кабинета (лаборатории)

Наименование	Количество
Технические средства обучения	
Технические устройства*	
Доска интерактивная	1
Персональный компьютер	1
Мультимедийный комплекс	1
Дидактическое обеспечение	
Презентации	Комплект
Слайды электронные	Комплект
Учебные видеофильмы	Комплект
Методические указания для проведения практических и лабораторных работ	15
Электронные средства обучения	
Программное обеспечение	
Программа для создания, редактирования и просмотра презентаций	1
Программное обеспечение для просмотра веб-сайтов	1
Электронный эмулятор электрических цепей	1
Электронно-учебное пособие по учебной дисциплине «Электротехника с основами электроники»	1
Печатные средства обучения	
Плакаты	Комплект
Комплект учебно-календарных пособий по учебной дисциплине «Электротехника с основами электроники»	15
Объёмные средства обучения	
Натуральные образцы	
Асинхронный двигатель	1
Электромагнитный пускатель	1
Тепловое реле	1
Трансформатор	1
Учебно-производственное оборудование	
Стенд лабораторный «Теоретические основы электротехники» НТЦ-01.07	16
Стенд лабораторный «Электрические машины» НТЦ – 23.100.00 ПС	16
Электромагнитный пускатель	12

Асинхронный двигатель	6
Кнопочный пост	6
Тепловое реле	6
Соединительные провода	Комплект
Биполярный транзистор	6
Милиамперметр	6
Микроамперметр	6
Вольтметр	12
Реостат	12
Блок питания	6
Осциллограф	6
Диод	30
Конденсатор	18
Резистор переменный	6
Катушка индуктивности с магнитопроводом	6
Регулятор	36
Резистор	12
Трансформатор	6
Инструмент	
Индикатор фазы	1
Мультиметр	1

*При отсутствии использовать специализированную аудиторию технических средств обучения.

Теоретический раздел

Введение

В современном мире электрическая энергия является основой развития базовых отраслей промышленности, определяющих прогресс общественного производства во всех сферах деятельности человека: в промышленности, сельском хозяйстве, науке, космосе и быту.

Определяющая роль электроэнергетики опережали темп других отраслей. Определяющая роль электроэнергетики в жизни современного общества объясняется:

- *разнообразием и относительно невысокой стоимостью способов и технических средств получения электрической энергии;

- *удобством передачи электрической энергии на большие расстояния с большой скоростью и малыми потерями и распределения ее между потребителями;

- *сравнительной простотой и высоким коэффициентом полезного действия (КПД) преобразования электрической энергии в другие виды энергии;

- *Способностью электрической энергии плавно менять потребление от нуля до максимума в зависимости от хода производственного процесса или нагрузки рабочего механизма;

- *Простой надежностью и безопасностью методов измерения и контроля электрических величин и управления режимами работы электрических устройств, агрегатов и систем;

- *Простой и эффективностью автоматизации процессов получения, передачи и потребления электрической энергии.

В промышленной, сельском хозяйстве, сфере обслуживания и в быту электрическая энергия применяется для привода станков и различных механизмов, а также непосредственно в технологических процессах для нагрева изделий, плавления металлов, сварки, электролиза, получения плазмы, новых материалов с помощью электрохимии, очистки материалов и газов и т.д.

В современных средствах связи и информационных технологиях вся работа основана на применении электрической энергии. Без нее невозможно было бы развитие кибернетики, вычислительной техники, космических аппаратов.

Большое количество электрической энергии потребляет электрифицированный городской и железнодорожный транспорт. Эксплуатация электрифицированного железнодорожного транспорта позволяет увеличивать пропускную способность железных дорог за счет увеличения скорости движения поездов, повышать экономию топлива, снижать себестоимость перевозок, к тому же электрический транспорт не загрязняет окружающую среду.

Электрическая энергия в быту является основой обеспечения комфортабельной жизни людей, в частности, практически единственным видом энергии для искусственного освещения.

Таким образом, электроэнергетика является важной частью жизнедеятельности человека. Уровень ее развития отражает уровень развития производительных сил общества и возможности научно-технического прогресса.

Электротехника — отрасль науки и техники, связанная с получением, преобразованием и использованием электрической энергии в практической деятельности человека, охватывающая вопросы применения электромагнитных явлений в различных отраслях промышленности и в быту.

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Электроэнергетика Республики Беларусь - это объединенная энергетическая система, которая представляет собой постоянно развивающийся высокоавтоматизированный комплекс, объединенный общим режимом работы и единым централизованным диспетчерским управлением. Отрасль надежно и бесперебойно осуществляет выработку, передачу и распределение электрической и тепловой энергии.

Современное состояние электроэнергетики Беларуси сформировалось благодаря интенсивному развитию отраслей топливно-энергетического комплекса в 1960—1970-х гг. В этот период были построены несколько электростанций, электрических и тепловых сетей газо- и не тепловых сетей, газо- и нефтепроводов.

Производственный потенциал энергосистемы Беларуси включает 27 крупных электростанций; 25 районных котельных; 260 тыс. км линий электропередачи напряжением 0,4—750 кВ; 6,8 тыс. км линий электропередачи напряжением 220—750 кВ (эти линии являются системообразующими и обеспечивают межсистемные связи с энергосистемами России, Украины, Литвы и Польши); около 5 тыс. тепловых сетей.

Республика Беларусь не только производит, но и импортирует электрическую энергию. Импорт электрической энергии в объеме общего потребления свидетельствует об экономической целесообразности ее приобретения, что обусловлено отставанием цен на газообразное топливо по сравнению с мазутом, а также высокой степенью интегрированности белорусской и российской энергосистем.

На тепловые электроцентралы, производящие комбинированную выработку электрической и тепловой энергии, приходится 52,5% всей вырабатываемой электроэнергии, а тепловой государственные районные электростанции (ГРЭС и ТЭС), производящие электрическую энергию, вырабатывают 25 малых гидроэлектростанций (ГЭС) общей установленной мощностью 11,9 МВт и 19 блок-станций установленной мощностью 163,1 МВт.

Наиболее крупными ГЭС в Беларуси являются Осиповичская на р. Свислочь (2,2 тыс. кВт) и Чигирская на р. Друть (1,5 тыс. кВт); наиболее крупными тепловыми электростанциями – Березовская ГРЭС (995 МВт), Новополоцкая ТЭС (505 МВт), Минская ТЭС-4 (1030 МВт), Гомельская ТЭС (540 МВт).

На Оршанской ТЭС принята в эксплуатацию парогазовая установка мощностью 67 МВт – первая не только в РБ, но и в странах ближнего зарубежья, что позволило повысить КПД станции почти до 60%.

Значительный прирост мощности энергосистемы РБ и повышение эффективности ее функционирования произошли за счет ввода в эксплуатацию Минской ТЭС-5, новых турбоустановок вместо демонтированных на Пинской ТЭС (6 МВт), могилевских ТЭС-1 (6 МВт) и ТЭС- 2 (60 МВт). Особое внимание было уделено полному переводу теплоэлектроцентралей с мазута на газ.

Важную роль для экономии электроэнергии играет автоматизация производственных процессов и отдельных технологических установок. Активное внедрение описанных и других энергосберегающих мероприятий и своевременная замена устаревшего энергетического оборудования позволили сократить удельные расходы топлива на отпущенную электрическую и тепловую энергию и вывести из а уровень ведущих мировых аналогов.

Определенное внимание в электроэнергетике Беларуси уделяется внедрению нетрадиционных источников энергии. Так, был осуществлен пуск ветроэнергетической

установки (ВЭУ) в дер. Дружная Мядельского района Минской области. Однако массовое использование существующих способов получения электроэнергии с помощью традиционных лопастных ВЭУ в условиях Беларуси экономически не оправдано из-за характерных для страны слабых континентальных ветров.

В течение нескольких последних лет на республиканском уровне разработаны и одобрены Концепция Национальной стратегии устойчивого развития и Основные направления энергетической политики Республики Беларусь.

В развитие и уточнение этих документов с учетом изменения внутренних и внешних факторов развития Республики Беларусь был разработан топливно-энергетический баланс страны на период до 2020 г., в котором также большое место отведено вопросам дальнейшего развития электроэнергетики.

Потребление электроэнергии в республике в 2020 г. Вырастет до 41 млрд кВт·ч (на 23% выше уровня 2000 г.) Импорт электроэнергии не превысит 4 млрд кВт·ч и зависимости от конъюнктуры рынка может быть прекращен, поскольку установленная мощность собственных генерирующих источников позволит обеспечить необходимый объем производства электроэнергии.

Прогноз структуры потребления электрической и тепловой энергии по отраслям экономики на 2020г. определен исходя из динамики макроэкономических показателей развития народного хозяйства и реализации потенциала энергосбережения в республике. Ожидается уменьшение потребления электроэнергии станет коммунально-бытовой сектор.

Следует отметить, что в перспективе до 2020 г. основным видом топлива для производства электроэнергии и тепла останется природный газ. Однако его доля должна быть снижена до 60% от общего потребления детально-печного топлива за счет увеличения потребления электроэнергетической мазута до 4,2 млн т условного топлива (у. т.), использования 1,75 млн т у. т. угля, 3,7 млн т у.т. дров, гидроэнергетических ресурсов.

В настоящее время в г. Островце Гродненской области ведется строительство атомной электростанции (Белорусской АЭС). Строительство Белорусской АЭС осуществляется по проекту «АЭС - 2006», который полностью соответствует международным нормам и рекомендациям Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ). Белоруссии АЭС будет состоять из двух энергоблоков суммарной мощностью до 2400 (2X1200) МВт Первый энергоблок планируется ввести в эксплуатацию в 2018 г, второй – 2020г.

Введение в строй Белорусской АЭС позволит:

- укрепить энергическую безопасность страны;
- снизить себестоимость производства электроэнергии;
- уменьшить темпы роста трафика на отпуск электроэнергии. По расчетам ученых Национальной академии наук (НАН) Беларуси с пуском Белорусской АЭС себестоимость электроэнергии в целом по энергосистеме снизится примерно на 20 %
- сократить выбросы парниковых газов в атмосферу.
- вынесли из действия устаревшие и малоэффективные генерирующие мощности;
- сократить годовой объем закупок природного газа на 4-5 млрд м³;
- прекратить закупки электроэнергии за рубежом.

Раздел 1. Электротехника

Тема 1.1 Электрическое поле. Закон Кулона

Разноименно заряженные частицы или тела притягиваются друг к другу, одноименно заряженные – отталкиваются (рис.1.1).

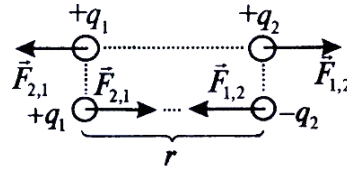


Рисунок 1.1 – Взаимодействие зарядов в электрическом поле

Закон Кулона: сила взаимодействия двух неподвижных тел с зарядами Q_1 и Q_2 прямо пропорциональна произведению этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними:

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi\epsilon_a r^2}$$

где Q_1, Q_2 – заряды, Кл.

r – расстояние между зарядами, м.

В данной формулы учитываются диэлектрические свойства среды, характеризующиеся абсолютной диэлектрической проницаемостью ϵ_a . В вакууме $\epsilon_a = \epsilon_0$, где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ – электрическая постоянная.

Графически электрическое поле изображают силовыми линиями. Силовые линии начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных или уходят в бесконечность. На рисунке 1.2 изображены линии напряженности положительного (а), отрицательного (б) полей и системы положительного и отрицательного зарядов (в).

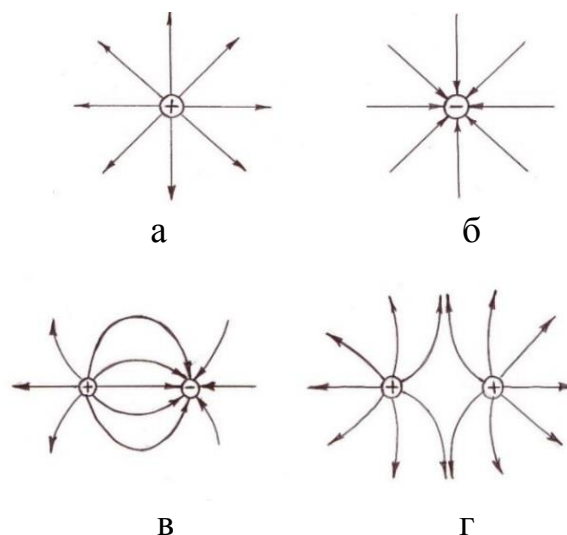


Рисунок 1.2 – Силовые линии электрического поля

Проводники, диэлектрики и полупроводники

Проводники – это вещества, в которых имеются носители заряда – свободные электроны. Различают твердые, жидкие и газообразные проводники. Твердыми проводниками являются металлы.

Диэлектрики (изоляторы) – это вещества, в которых отсутствуют свободные заряды, однако при воздействии высоких температур или сильных электрических полей в диэлектриках возможны расщепление молекул на ионы и потеря ими диэлектрических свойств. Диэлектрики широко используются в электротехнических установках в качестве изоляторов.

Полупроводники по своей электропроводности занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками. Основная особенность полупроводников заключается в том, что их электропроводимость в значительной степени зависит от температуры, освещенности, наличия и интенсивности электрического поля, количества примесей. Полупроводники с электронной проводимостью называют полупроводниками n-типа (негативные), а с дырочной проводимостью – p-типа (позитивные).

Конденсаторы. Соединение конденсаторов.

Конденсатор представляет собой систему двух разноименно заряженных проводников, разделенных диэлектриком (например, воздухом).

Величина заряда q пропорциональна напряжению $q = CU$.

Емкость конденсатора равна отношению заряда одной из пластин Q к напряжению между ними U :

$$C = Q/U.$$

где C – емкость, Ф.

U – напряжение, В.

Энергия заряженного плоского конденсатора W_K равна работе A , которая была затрачена при его зарядке или совершается при его зарядке:

$$A = \frac{CU^2}{2} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{QU}{2} = W_K.$$

На рисунке 1.3 представлены условные графические обозначения некоторых наиболее часто используемых типов конденсаторов.

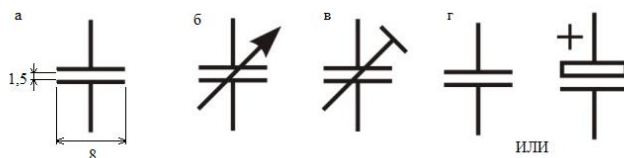


Рисунок 1.3 - Условные графические обозначения конденсаторов:
 а – общее обозначение и размеры; б – переменный конденсатор; в – подстроечный конденсатор; г – электролитический (полярный) конденсатор.

При отсутствии конденсатора нужной емкости или требуемого номинального напряжения для получения нужных параметров можно использовать несколько конденсаторов, соединив их последовательно (см. рис. 1.4, а) или параллельно (см. рис. 1.4, б).

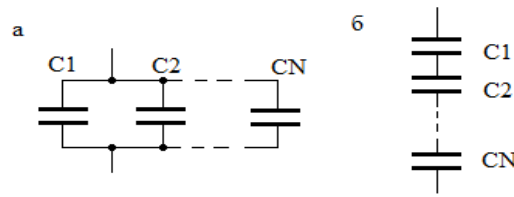


Рисунок 1.4 - Соединение конденсаторов: рисунок а – параллельное, рисунок б – последовательное.

При последовательном соединении на пластинах всех конденсаторов будут одинаковые по значению заряды $Q_1=Q_2=..=Q_i=..=Q_n$.

Общее напряжение цепи равно сумме напряжений на отдельных конденсаторах:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_i + \dots + U_n$$

При последовательном соединении конденсаторов величина, обратная общей емкости, равна сумме обратных величин емкостей конденсаторов:

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

При параллельном соединении напряжения на всех конденсаторах одинаковы:

$$U_1=U_2=..=U_i=..=U_n.$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_i + \dots + Q_n$$

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_i + \dots + C_n.$$

При параллельном соединении конденсаторов их общая емкость равна сумме емкостей отдельных конденсаторов.

В случае смешанного соединения конденсаторов возможно бесчисленное множество комбинаций разного количества конденсаторов, поэтому нельзя вывести общую для всех случаев формулу вычисления эквивалентной емкости.

Контрольные вопросы и задания.

1. Поясните как ведут себя одноименно и разноименно заряженные частицы по отношению друг от друга.
2. Дайте краткую характеристику проводникам.
3. Объясните, почему одни материалы являются проводниками, а другие изоляторами.
4. Приведите примеры проводников и диэлектриков.
5. Сформулируйте и поясните закон Кулона.
6. Сформулируйте закон сохранения заряда.

7. Дайте определение напряженности электрического поля.

Тема 1.2 Электрические цепи постоянного тока. Общие сведения об электрических цепях

Основными элементами установок являются источники и приемники электрической энергии, а также преобразовательные устройства.

Электрическая цепь – это совокупность соединенных между собой источников электрической энергии, ее приемников и соединяющих их проводов (линия передачи).

Источники электрической энергии – это устройства, в которых происходит преобразование различных видов энергии в электрическую.

Приёмник – это устройство, в котором происходит преобразование электрической энергии в другой вид энергии для ее использования.

Электродвижущая сила источника и напряжение. Электрический ток. Закон Ома

ЭДС – это полная энергия, которую источник может расходовать на перемещение каждого единичного заряда по всей замкнутой цепи. Численно ЭДС равна отношению электрической мощности источника к его электрическому току.

В цепях постоянного тока ЭДС прямо пропорциональна мощности и обратно пропорциональна силе тока.

$$E = \frac{P}{I}$$

где E – ЭДС источника, В.

P – активная мощность, Вт.

I – сила тока, А.

ЭДС и напряжение измеряются в вольтах (В). Для измерения ЭДС и напряжения используются вольтметр (рис.1.5).

Электрический ток – это движение электронов в проводнике под действием электрического поля.

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

где t – время прохождения тока.

Электрический ток обозначается буквой I (или i). Величина электрического тока измеряется в амперах (А).

На ряду с силой тока при расчетах электрических цепей используется плотность тока J – отношение силы тока I к площади поперечного сечения S проводника:

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

где S – площадь поперечного сечения, мм².

Плотность тока в проводах обычно измеряется в А/мм². Плотность тока характеризует способность проводника выдерживать требуемую нагрузку.

$$U = I \cdot R$$

где R – сопротивление, Ом.

Данное выражение называется законом Ома для участка цепи, не содержащего источника энергии.

Закон Ома для полной цепи: сила тока в цепи пропорциональна ЭДС и обратно пропорционально полному сопротивлению цепи .

Полное сопротивление содержит внешнюю R и внутреннюю r цепь источника ЭДС:

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

где r – внутреннее сопротивление, Ом.

Электрическое сопротивление и проводимость

Сопротивление обозначается буквой R или r и измеряется в омах (Ом).

Сопротивление проводника зависит от его геометрических параметров и выражается формулой

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

где ρ – удельное сопротивление Ом*мм²/м;

l – длина проводника, м;

S – площадь поперечного сечения, мм².

Величина сопротивления проводников зависит также и от температуры. В пределах 0-100С эта зависимость выражается формулой

$$R_2 = R_1 + R_1 \alpha (T_2 - T_1),$$

где R_1 – начальное сопротивление проводника при температуры T_1 ;

R_2 – конечное сопротивление проводника при температуре T_2 ;

α – температурный коэффициент сопротивления, 1/°С.

Проводимость – это способность проводника пропускать через себя электрический ток.

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

Единица проводимости (g) – сименс (См).

Работа и мощность электрической цепи. Закон Джоуля-Ленца.

Используя формулу $U = I \cdot R$ закона Ома для участка цепи, выражение $I = \frac{Q}{t}$ можно представить в следующем виде:

$$W_{\text{ПР}} = I^2 \cdot R \cdot t = \frac{U_{ab}^2}{R} \cdot t$$

Работа, совершаемая в единицу времени, называется мощностью:

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

Мощность обозначается буквой P и измеряется в ваттах (Вт). Электрическая работа измеряется в джоулях (Дж), но согласно выражению $W = (U + \Delta U)It$ или $W = ItU + \Delta UIt$ имеет $W = Pt$, откуда $1\text{Дж}=1\text{Вт}\cdot 1\text{с}$.

Используя закон Ома для участка цепи, согласно выражению $U = I \cdot R$ можно получить еще две формулы для вычисления мощности

$$P = I^2 \cdot R \text{ и } P = \frac{U^2}{R}$$

Количество теплоты, выделяемой в проводнике, определяется по формуле:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

где Q – количество теплоты, Дж.

Приведенная зависимость носит название закона Джоуля-Ленца: количество теплоты, выделяемой при прохождении тока в проводнике, пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока.

Режимы работы электрических цепей

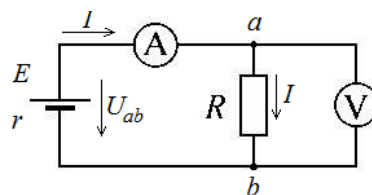


Рисунок 1.5 – Простейшая электрическая цепь

Режимы работы электрической цепи рассмотрим по схеме, представленной на рисунке 1.5.

Нагрузочный режим – основной режим работы электрической цепи. Из формулы ($I = \frac{E}{R+r}$) следует, что при неизменных значениях ЭДС E и внутреннего сопротивления r источника величина тока I в цепи зависит от сопротивления R приемника – с уменьшением сопротивления ток возрастет. Напряжение U источника (в данной цепи равно напряжению приемника) меньше ЭДС на величину внутреннего падения напряжения. Из формулы ($I = \frac{E}{R+r}$)

$$E = IR + Ir$$

откуда

$$IR = E - Ir \text{ или } U_{ab} = E - Ir$$

Из формулы следует, что с увеличением тока падение напряжения на приемнике U_{ab} уменьшается. Эта зависимость называется внешней характеристикой источника энергии.

График внешней характеристики источника $U_{ab}=f(I)$ приведен на рисунке 1.6.

Мощность приемника этом сначала увеличивается, а затем, после достижения $R=r$, уменьшается. График зависимости $P_{пр}=f(I)$ приведена на рисунке 1.7 КПД источника определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_{пр}}{P}$$

где $P=E_1 I$ – мощность, вырабатываемая источником.

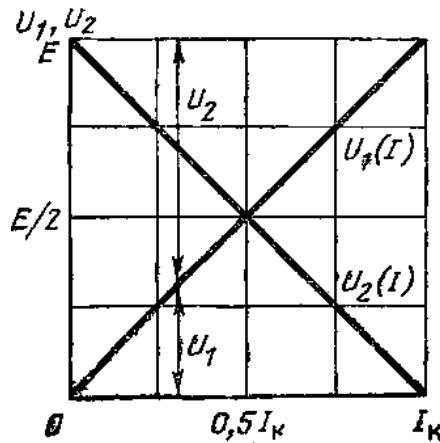


Рисунок 1.6 – внешняя характеристика источника энергии и график потерь напряжения

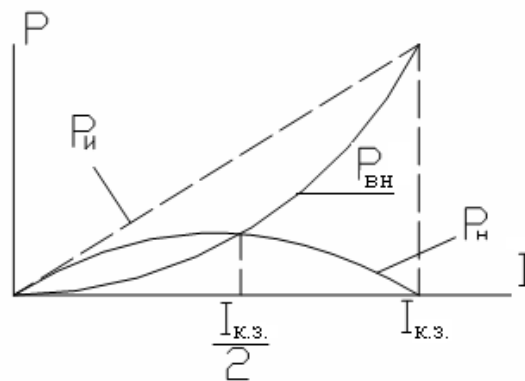


Рисунок 1.7 – Графики мощностей источника, приемника и потерь мощности

Номинальный режим – это разновидность нагрузочного режима, при котором напряжение, ток и потребляемая приемником мощность соответствует расчетным значениям, полученным в процессе проектирования.

Согласованный режим является ещё одно разновидностью нагрузочного режима и наступает при равенстве сопротивления нагрузки и внутреннего сопротивления источника ($R=r$). В этом случае мощность $P_{пр}$, потребляемая приемником, достигает своего максимального значения τ равна мощности потерь ΔP в источнике (см. рисунке). Напряжение на концах приемника $U_{ab}=E\sqrt{2}$ (см. рисунок 1.6). В этом режиме КПД источник $\eta=0.5$.

Режим холостого хода наступает при отключение приемника от источника (рисунок 1.8, а). Сопротивление внешней части цепи при этом $R=\infty$, тогда ток в цепи $I=0$, а следовательно, и $U_{ab}=E$. Мощность источника $P_{х.х.}$ и мощность приемника $P_{пр.}$ в режиме холостого хода: $P_{х.х.}=P_{пр.}=0$ (см.рис.1.7). В этом режиме КПД источника $\eta=1$.

Режим короткого замыкания наступает, когда сопротивление приемника становится равным нулю ($R=0$) (рис. 1.8, б). Следствием этого явления может быть замыкание между выводами внутри приемника или пробой изоляции между соединительными проводами (рисунок). В любом случае ток пройдет по участку с нулевым сопротивлением и, как результат, достигнет максимального значения $I = E/r$, напряжение на выводах приемника источника $U_{ab} = 0$. Ток короткого замыкания может в десятки и сотни раз превышать номинальный ток цепи, что может вызвать тепловые и механические повреждение ее отдельных элементов. По этой причине в электрической цепях необходимо использовать плавкие предохранители.

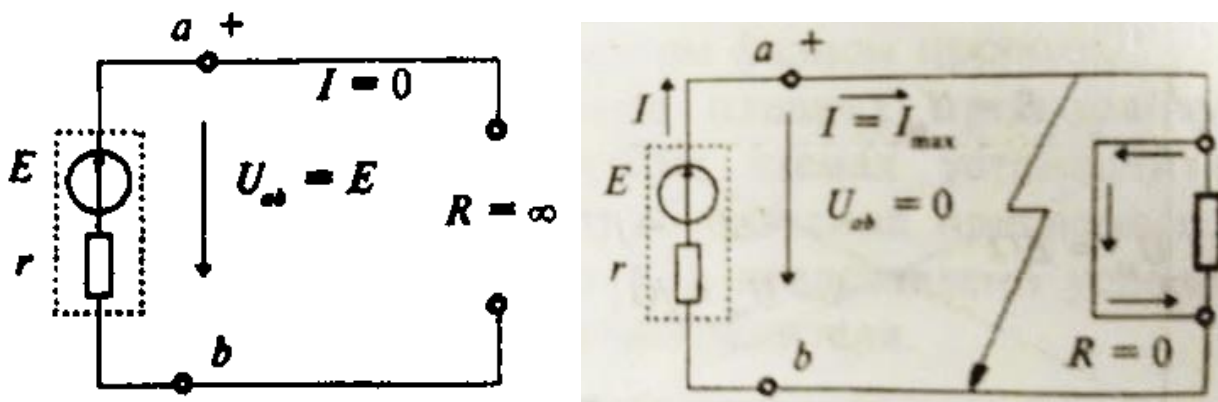


Рисунок 1.8 – Схема электрическая в режиме: а) холостого хода; б) короткого замыкания.

Последовательное и параллельное соединение резисторов

Вспомним свойства данных соединений

	Последовательное соединение	Параллельное соединение
Схема		
Сила тока	$I = I_1 = I_2$	$I = I_1 + I_2$
Напряжение	$U = U_1 + U_2$	$U = U_1 = U_2$
Сопротивление	$R = R_1 + R_2$	$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

Законы Кирхгофа

Ветвь электрической цепи – это участок цепи, по которому протекает один и тот же ток.

Узел электрической цепи – точка соединения трех и более ветвей.

Контур электрической цепи – это замкнутый участок цепи, где одна и та же узловая точка является началом и концом.

Сумма токов, входящих в узел, равна сумме токов, выходящих из узла.

Существует и другая формулировка первого закона Кирхгофа: **алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:**

$$\sum_{i=1}^i I_i = 0$$
$$\sum I = 0$$

Токи, входящие в узел, принято считать положительным, а выходящие из узла – отрицательными.

Если направление тока получится отрицательным, то это означает, что его действительное направление противоположно выбранному.

Второй закон Кирхгофа выражает соотношение между суммой падений напряжений на каждом приемнике и суммой ЭДС в замкнутом контуре.

Формулировка второго закона Кирхгофа: **в замкнутой электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений на всех приемниках электрической энергии.**

$$\sum_{i=1}^m E_i = \sum_{j=1}^n I_j R_j$$

При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа:

- ❖ ЭДС записывается со знаком «плюс», если ее направление совпадает с произвольно выбранным направлением обхода контура. В противном случае ЭДС записывается со знаком «минус»;
- ❖ Падение напряжения на сопротивлении записывается со знаком «плюс», если направление тока в нем совпадает с направлением обхода контура.

Правильность выполненного расчета проверяется составлением **баланса мощностей**, вытекающего из закона сохранения энергии – **сумма мощностей источников должна быть равна сумме мощностей потребителей:**

$$\sum_{i=1}^m E_i I_i = \sum_{j=1}^n I_j^2 R_j$$

Контрольные вопросы и задания.

1. Дайте определение электрической цепи. Перечислите из каких элементов она состоит.
2. Укажите в каких единицах выражают ЭДС, напряжение и ток.
3. Перечислите от каких параметров зависит сопротивление металлического проводника.
4. Сформулируйте закон Ома для замкнутой цепи и для ее участка.
5. Запишите чему равны работа и мощность электрического тока и в каких единицах они выражаются.
6. Сформулируйте закон Джоуля-Ленца.
7. Поясните назначение плавких предохранителей. В чем особенность автоматических предохранителей.
8. Поясните работу электрической цепи в нагрузочном режиме. Что такое номинальный режим.
9. Укажите какой режим работы электрической цепи называется согласованным.
10. Поясните состояние электрической цепи в режимах холостого хода и короткого замыкания.
11. Объясните какое соединение резисторов называется последовательным, параллельным, смешанным.
12. Поясните чему равны общее сопротивление и проводимость цепи при последовательном соединении резисторов? при параллельном соединении резисторов.
13. Поясните как определяется общее сопротивление цепи со смешанным соединением резисторов.
14. Дайте определение ветви, узлу и контуру электрической цепи.
15. Сформулируйте первый закон Кирхгофа.
16. Сформулируйте второй закон Кирхгофа.
17. Поясните порядок расчета сложной электрической цепи с применением законов Кирхгофа.

Тема 1.3 Электромагнетизм. Магнитное поле электрического тока

Единицей измерения магнитной индукции является тесла (Тл). Значение магнитной индукции определяется по формуле

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

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость;

μ_0 – магнитная постоянная ($\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – абсолютная магнитная проницаемость вакуума);

r – расстояние от проводника до рассматриваемой точки магнитного поля.

Абсолютная магнитная проницаемость – физическая величина, характеризующая магнитные свойства среды. Единицей измерения магнитной проницаемости является генри на метр (1 Гн/м).

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

$$\mu = \mu_a / \mu_0$$

Направление магнитных силовых линий, создаваемых токов, а следовательно, и направление вектора \vec{B} определяют с помощью правила буравчика (рис.1.9).

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

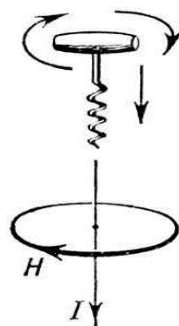


Рисунок 1.9 - Правило буравчика

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

$$\Phi = BS$$

где Φ – магнитный поток, Вб,

B – магнитная индукция, Тл.

Единицей измерения магнитного потока является вебер (Вб).

Электромагнитная сила

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

$$F = BIl \sin \alpha$$

где α – угол между направлением тока I и вектора магнитной индукции;

l – длина проводника.

Если ладонь левой руки расположить так, чтобы линии вектора магнитной индукции входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока, то большой палец, отогнутый на 90° , укажет направление силы Ампера.

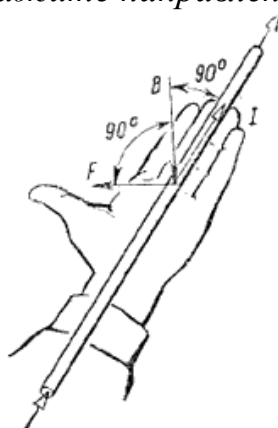


Рисунок 1.10 - Правило левой руки

Ферромагнитные материалы

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

✓ Ферромагнитные – вещества, сильно притягивающиеся к магниту (железо, сталь, чугун, никель, кобальт и некоторые сплавы). Относительная магнитная проницаемость этих веществ имеет величину от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч;

✓ Парамагнитные – вещества, слабо притягивающиеся к магниту (алюминий, магний, олово, пластина, марганец и др.). Относительная магнитная проницаемость этих веществ немного больше единицы.

✓ Диамангнитные – слабо отталкивающиеся от магнита (цинк, ртуть, свинец, медь, хлор, серебро, вода). Относительная магнитная проницаемость этих веществ немного меньше единицы.

График зависимости $B=f(H)$ называется **кривой намагничивания**, пример которой представлен на рис. 1.11.

Участок 0-1 называется **кривой первоначального намагничивания**. На этом участке показано изменение магнитной индукции в размагниченной катушке. Конечная точка 1 этого участка называется **точкой насыщения**.

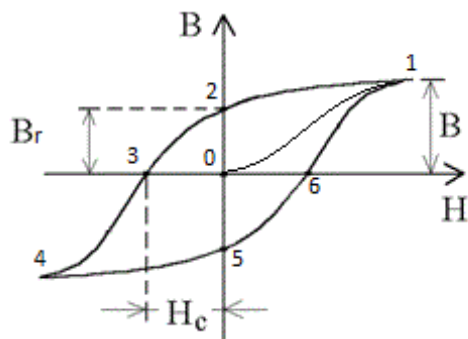


Рисунок 1.11 - Петля гистерезиса

После насыщения (точки 1) напряженность магнитного поля уменьшается до нуля (участок 1-2). При этом сердечник остается намагниченным на величину остаточной намагниченности B_r . Это явление называется **магнитным гистерезисом**. Остаточная намагниченность объясняется тем, что в ферромагнитных материалах существуют сильные магнитные связи между молекулами, благодаря которым создаются беспорядочно направленные магнитные моменты. Под воздействием внешнего поля они принимают его направление, а после снятия поля отдельные магнитные моменты остаются направленными. Поэтому вещество остается в намагниченном состоянии.

После изменения направления тока в катушке размагничивание продолжается (участок 2-3) до пересечения с осью абсцисс. Участок 3-0 называется **коэрцитивной силой H_c** . Это величина, которая необходима для уничтожения поля в сердечнике.

Затем на участке 3-4 происходит намагничивание сердечника до насыщения, а на участке 4-5 и 5-6 – размагничивание с последующим намагничиванием на участке 6-1. Весь график называется **петлей магнитного гистерезиса**.

Электромагнитная индукция

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

Индуктированная ЭДС определяется по формуле

$$E = Blv \cos \alpha$$

где α – угол между направлением перемещения проводника и направлением магнитных силовых линий (рис. 1.12).

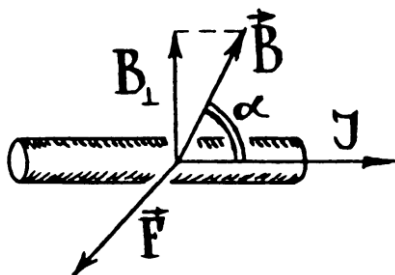


Рисунок 1.12 – Угол между направлениями силовых линий магнитного поля и движения проводника.

Если правую руку расположить таким образом, чтобы магнитные силовые линии магнитного поля входили в ладонь, а отогнутый большой палец был направлен

в сторону движения проводника, то четыре вытянутых пальца укажут направление индуцированной ЭДС и тока (рис.1.13).



Рисунок 1.13 – Определение напряжения индуцированной ЭДС

Самоиндукция. ЭДС самоиндукции. Индуктивность.

На рисунке 1.14 представлена электрическая цепь, потребителем энергии в которой является катушка индуктивности L .

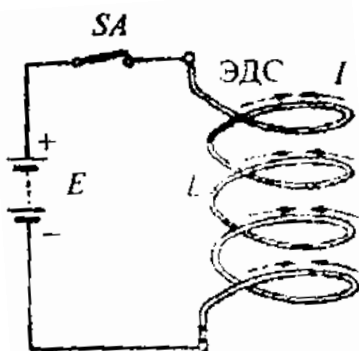


Рисунок 1.14 – Электрическая цепь с катушкой индуктивности

При замкнутом выключателе SA по цепи потечет электрический ток, а вокруг катушки образуется постоянное магнитное поле. При размыкании цепи ток быстро уменьшается до нуля. Одновременно с убыванием тока исчезает и магнитное поле, магнитные силовые линии втягиваются внутрь катушки и пересекают при этом ее витки. По закону электромагнитной индукции в витках катушки наводится ЭДС.

Аналогичное явление произойдет и при замыкании цепи, в результате чего ток возрастает от нуля до какого-то определенного значения. Возрастание тока приводит к увеличению магнитного поля, силовые линии которого наводят в витках катушки ЭДС. Таким образом, индуцированная ЭДС может быть получена в проводнике только при изменении в нем электрического тока. В рассмотренном явлении ЭДС индуцируется с помощью постороннего магнитного поля, а в результате изменения магнитного поля, созданного самим проводником, т.е. в результате самоиндукции.

ЭДС самоиндукции – это ЭДС, возникающая в проводнике при изменении в нем электрического тока.

Величина ЭДС самоиндукции e_L зависит от скорости изменения тока $\frac{\Delta i}{\Delta t}$: чем быстрее возрастает или убывает ток, тем больше будет ЭДС самоиндукции.

На величину ЭДС самоиндукции влияют и другие факторы: длина проводника, количество витков катушки и ее размеры, наличие или отсутствие стального сердечника. Все эти факторы учитываются коэффициентом L , который называется индуктивностью:

$$e_L = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Знак «минус» в формуле (1.75) объясняется тем, что, согласно правилу Ленца, ЭДС самоиндукции всегда препятствует тому изменению тока, которое вызвало эту ЭДС. Так, если цепь замыкается, то ЭДС самоиндукции препятствует увеличению тока. По этой причине ток в цепи возрастает в течение некоторого промежутке убыванию тока и поддерживает его некоторое время в разомкнутой цепи. По этой причине в момент размыкания цепи между контактами выключателя возникает искра.

Индуктивность измеряется в генри (Гн).

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение магнитной индукции.
2. Объясните в чем разница магнитной проницаемостью и абсолютной магнитной проницаемостью.
3. Назовите формулу вычисления электромагнитной силы.
4. Сформулируйте правило левой руки.
5. Перечислите какие вещества являются ферромагнитными.
6. Перечислите какие вещества являются парамагнитными.
7. Перечислите какие вещества являются диамагнитными.
8. Поясните график зависимости $B=f(H)$.
9. Укажите от чего зависит величина индуктированной ЭДС.
10. Дайте определение ЭДС самоиндукции.
11. Сформулируйте правило правой руки.

Тема 1.4 Электрические машины постоянного тока

Классификация электрических машин постоянного тока по назначению

По назначению электрические машины постоянного тока разделяются на генераторы и двигатели.

Генератор постоянного тока — это электрическая машина, преобразующая механическую энергию в электрическую энергию постоянного тока.

Двигатель постоянного тока — это электрическая машина, преобразующая электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию.

Устройство и принцип действия машин постоянного тока. Обратимость машин постоянного тока

Генераторы и двигатели постоянного тока устроены одинаково и содержат неподвижную и подвижную части, называемые соответственно *статором* и *ротором*. В статоре создается магнитное поле возбуждения, поэтому его называют *индуктором*. Часть ротора, в которой индуцируется ЭДС, называется *якорем*.

Статор состоит из станины 7 (рис. 1.15), магнитных полюсов 2, подшипниковых щитов 3 и подшипников 4. Станина является несущей частью машины. Магнитный полюс состоит из сердечника, полюсного наконечника и обмотки возбуждения 9. Кроме магнитных полюсов 2 имеются дополнительные полюса, состоящие из цельного сердечника 11 с выполненной на нем обмоткой. Внутри статора находится ротор, состоящий из сердечника якоря 8, коллектора 7, вала ротора 5 и вентилятора 6. Опорой ротора служат подшипники 4, укрепленные в боковых щитах 3.

При протекании постоянного тока по обмотке возбуждения создается основной магнитный поток Φ , который замыкается по магнитной цепи, образованной сердечниками полюсов N и S , сердечником якоря, станиной и двумя воздушными зазорами б. Так как станина является частью магнитопровода, ее выполняют из ферромагнитного материала, обычно из литой стали.

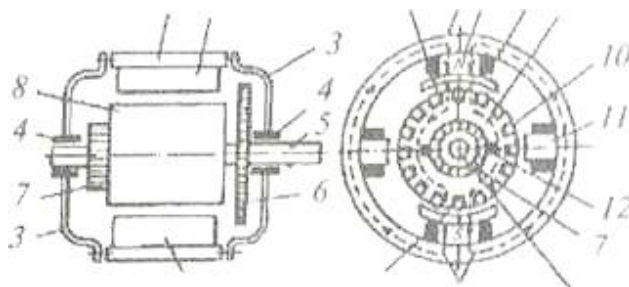


Рисунок 1.15 - Устройство машины постоянного тока

Коллектор 7 выполняется из медных пластин, к которым присоединяются начала и концы секций 10. Число пластин равно количеству секций обмотки. Коллекторные пластины изолированы друг от друга и от других деталей электроизоляционными mica (сланцевыми) прокладками.

К рабочей поверхности коллектора прилегают угольно-графитовые или металлоугольные щетки 12, закрепленные в специальных щеткодержателях.

Принцип работы электрических машин постоянного тока рассмотрим на примере простейшей модели генератора постоянного тока.

В постоянном магнитном поле размещена рамка с возможностью свободного вращения между полюсами N и S (рис. 1.16, а). Концы рамки присоединены к двум полукольцам, вращающимся вместе с рамкой, в которой возникает переменная ЭДС.

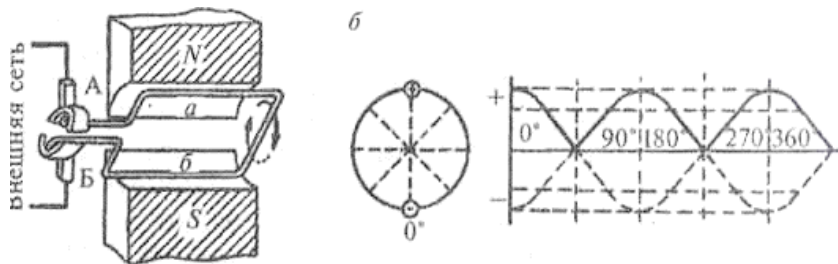


Рисунок 1.16 - Получение переменной ЭДС

Предположим, что рамка вращается по часовой стрелке. Тогда ток в проводнике, находящемся под северным полюсом, направлен от нас за плоскость чертежа, а в проводнике, находящемся под южным полюсом, — к нам. Пока проводник *a* расположен под северным полюсом, соединенное с проводником полукольцо имеет контакт с неподвижной щеткой *A*. Соответственно проводник *b* имеет контакт через свое полукольцо со щеткой *B*. По щетке *A* течет ток положительного направления, а по щетке *B* — отрицательного.

Когда проводники находятся на нейтральной линии, т. е. ЭДС в них равна нулю, щетки замыкают оба полукольца накоротко. Пройдя нейтральную линию, проводник *a* попадает в зону южного полюса, направление тока в нем изменяется на обратное («к нам»), но в это время данный проводник входит в контакт со щеткой *B*. Следовательно, несмотря на то, что направление тока в проводнике изменилось, направление тока в щетке *B* не меняется и по-прежнему остается отрицательным. Аналогичный процесс происходит и с проводником *b* после перехода в зону действия северного полюса. Таким образом, по внешней цепи направление тока сохраняется постоянным, т. е. коллектор обеспечивает постоянство направления электрического тока независимо от положения рамки между полюсами магнита. График тока, полученного описанным генератором, представлен на рисунке 1.16, б. На графике ток протекает через нагрузку в одном направлении, а его величина изменяется от нуля до определенного максимального значения. В тот момент, когда рамка занимает вертикальное положение, ток достигает максимального значения. По мере вращения рамки значение тока уменьшается и становится равным нулю при горизонтальном положении рамки, магнитного потока. После прохождения этого нейтрального положения значение тока в рамке вновь возрастает и цикл повторяется, т. е. по своему значению электрический ток в рамке является пульсирующим.

Классификация машин постоянного тока по способу возбуждения. Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением

Возбуждение — это процесс создания в электрической машине постоянного магнитного поля, необходимого для получения ЭДС (в генераторах) или вращения ротора (в двигателях).

Классификация машин постоянного тока по способу возбуждения приведена на рисунке 1.17.

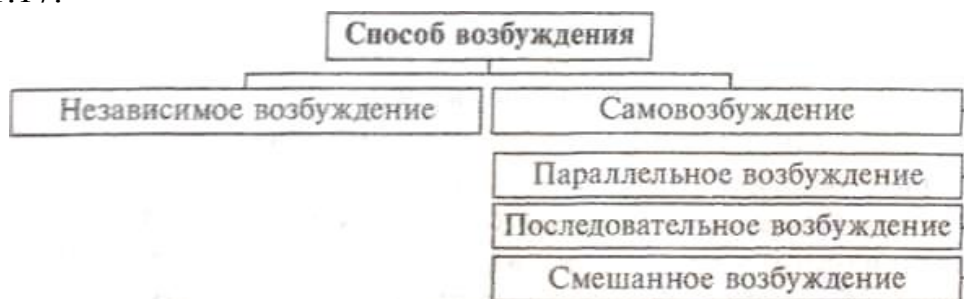


Рисунок 1.17 - Классификация машин постоянного тока по способу возбуждения

В машинах с независимым возбуждением магнитное поле создается обмоткой возбуждения, подключенной к постороннему источнику постоянного тока (рис. 1.18, а). Из-за необходимости иметь посторонний источник эти машины не получили широкого распространения.

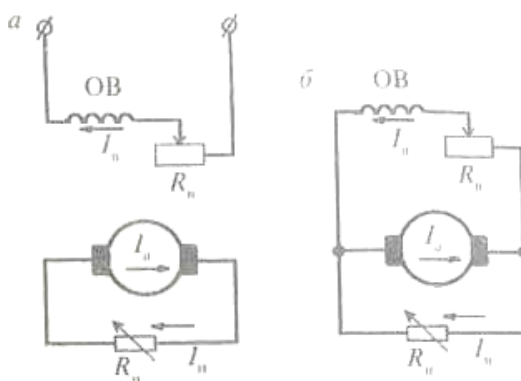


Рисунок 1.18 - Машины постоянного тока с независимым (а) и параллельным (б) возбуждением

В машинах с самовозбуждением обмотка возбуждения (ОВ) соединена с обмоткой якоря. В зависимости от способа соединения обмоток якоря и возбуждения различают машины с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.

В машинах с параллельным возбуждением обмотка возбуждения соединена параллельно с обмоткой якоря (рис. 1.18, б).

Рассмотрим принцип работы генератора с параллельным возбуждением.

В момент пуска якорь неподвижен и ток I_a в его обмотках отсутствует. Вследствие остаточного магнетизма стали станина и полюсы генератора сохраняют очень слабое магнитное поле, оставшееся после заводских испытаний или последнего включения генератора. Когда якорь начинает вращаться, его обмотки пересекают это остаточное поле и в них наводится небольшая по величине ЭДС. При этом в обмотке якоря индуцируется ток I_a . Последний от положительной щетки растекается по двум параллельным ветвям: внешней цепи с нагрузкой R_H и обмотке возбуждения. Ток I_b в обмотке возбуждения вызывает усиление магнитного поля, что в свою очередь приводит к увеличению ЭДС якоря и к еще большему увеличению тока возбуждения и т. д. Этот процесс протекает очень быстро и длится до тех пор, пока ток возбуждения, магнитное поле и напряжение на зажимах генератора не достигнут нормальной рабочей величины, и только после этого к зажимам генератора подключают нагрузку R_H .

Как следует из схемы соединения обмоток якоря и возбуждения, в процессе работы генератор сам обеспечивает питание своей обмотки возбуждения. Напряжение на зажимах генератора регулируется реостатом R_{ω} включенным в цепь обмотки возбуждения.

Генераторы параллельного возбуждения используются для питания электрооборудования автомобилей и тракторов, зарядки аккумуляторов на зарядных станциях, в качестве источников постоянного тока в тепловозах и т. д. Основным их достоинством является то, что их напряжение мало зависит от мощности подключенных к ним потребителей.

Электродвигатели постоянного тока

Принцип действия электродвигателей постоянного тока основан на взаимодействии тока, протекающего в обмотке якоря, и магнитного поля, создаваемого полюсами электромагнитов. В результате такого взаимодействия проводник с током выталкивается из магнитного поля. Так как проводник выполнен в виде рамки, то, как было отмечалось в подпункте 1.4.2, рамка начнет вращаться. Направление вращения рамки зависит от полярности приложенного к полукольцам со щетками напряжения.

Если к щетке A (см. рис. 1.16, a) подключить отрицательный полюс источника напряжения, а к щетке B — положительный, то ток в проводнике a потечет «от нас», а в проводнике b — «к нам». Согласно правилу левой руки рамка повернется по часовой стрелке. Когда проводники a и b займут горизонтальное положение, вращающий момент, создаваемый выталкивающими силами, исчезнет, но рамка проходит это положение по инерции и направление тока в ее проводниках изменится на противоположное. Эта ситуация будет повторяться через каждые 180° поворота. С помощью правила левой руки можно определить, что направление вращения рамки осталось прежним. Таким образом, чтобы рамка непрерывно вращалась в магнитном поле, необходимо изменять в ней направление тока. В отличие от генератора постоянного тока, в котором коллектор является выпрямителем переменного тока в рамке, в электродвигателях постоянного тока коллектор используется для преобразования постоянного тока источника напряжения в переменный ток, протекающий по рамке.

Пуск электродвигателя постоянному тока

На рисунке 1.19 приведена схема пуска и регулирования частоты вращения электродвигателя параллельного возбуждения.

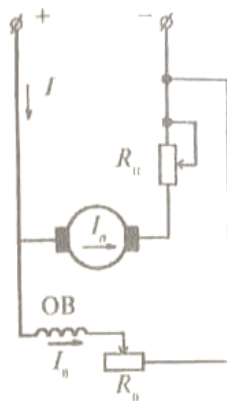


Рис. 1.19. Схема пуска и регулирования электродвигателя

Последовательно с якорем включен пусковой реостат а последовательно с обмоткой возбуждения — регулировочный реостат $K_{\text{Д}}$. При подключении электродвигателя к источнику постоянного напряжения ток обмотки возбуждения создает магнитное поле, которое, взаимодействуя с током $I_{\text{я}}$, вызовет вращение якоря. В первый момент пуска, когда якорь неподвижен и только начинает набирать обороты, в цепи якоря протекает очень большой ток $I_a = (10^{-1} - 100)I_{\text{ном}}$. Это приводит к искрению на коллекторе, а сам электродвигатель и соединенный с ним механизм испытывают сильный механический толчок. Пусковой реостат обеспечивает уменьшение пускового тока и предотвращает механический толчок. Перед пуском электродвигателя сопротивление пускового реостата должно быть максимальным. Затем, по мере возрастания частоты вращения якоря, ток в нем уменьшается и сопротивление пускового реостата плавно уменьшается. Когда частота вращения якоря достигнет номинального значения, сопротивление пускового реостата должно быть сведено к нулю.

Пусковые реостаты используются для пуска электродвигателей мощностью более 6 кВт. Электродвигатели меньшей мощности имеют сравнительно небольшой пусковой ток и поэтому могут запускаться без пусковых реостатов. Сопротивление пускового реостата K_n должно быть таким, чтобы для машин большой и средней мощности пусковой ток был равен $I_n = (1,5 - 1,8)I_{\text{ном}}$, а для машин малой мощности $I_n = (2,0 - 2,5)I_{\text{ном}}$.

Частота вращения якоря (об/мин) всех электродвигателей постоянного тока определяется по формуле

$$n = \frac{U - I_a R_a}{BK}$$

где U — напряжение сети, В;

I_a — ток якоря, А;

R_a - сопротивление обмотки якоря, Ом;

B - индукция магнитного поля основных полюсов, Тл;

K - коэффициент, учитывающий конструктивные особенности электродвигателя.

Напряжение сети, ток якоря и коэффициент K являются постоянными величинами, следовательно, регулировать частоту вращения якоря можно двумя способами:

1) изменением сопротивления цепи якоря;

2) изменением индукции магнитного поля основных полюсов.

Для реализации первого способа последовательно с якорем необходимо включить специальный регулировочный реостат или использовать пусковой реостат $R_{п}$. Этот способ не очень удобен, так как реостаты должны быть рассчитаны на большие рабочие токи якоря и поэтому получаются громоздкими и дорогими. Кроме того, при длительном прохождении тока в реостатах расходуется большое количество электроэнергии на бесполезное выделение тепла.

Второй способ наиболее распространен, так как лишен недостатков первого способа. Частота вращения якоря обратно пропорциональна индукции магнитного поля основных полюсов, поэтому при необходимости, например, увеличить частоту вращения якоря n требуется уменьшить ток возбуждения $I_{в}$ и наоборот, для уменьшения частоты вращения якоря ток возбуждения нужно увеличить.

Частота вращения якоря электродвигателя постоянного тока может регулироваться в очень широких пределах.

Реверсирование двигателя (изменение направления вращения якоря) осуществляется одним из двух способов: изменением полярности включения в сеть обмотки якоря. Данный способ реверсирования может применяться под напряжением; изменением полярности включения в сеть обмотки возбуждения. Данный способ реверсирования под напряжением не применяется, так как при отключении от сети обмотки возбуждения в ней наводится значительная ЭДС самоиндукции, опасная для целостности изоляции обмотки.

Электродвигатели с последовательным возбуждением применяются в качестве тяговых двигателей электропоездов, поездов метрополитена, трамвая, электрических подъемных кранов.

Контрольные вопросы и задания

- 1) Назовите назначение генератора и двигателя постоянного тока.
- 2) Поясните устройство машины постоянного тока.
- 3) Поясните принцип работы генератора постоянного тока.
- 4) Приведите классификацию электрических машин по способу возбуждения.
- 5) Поясните принцип работы двигателя постоянного тока.
- 6) Объясните как осуществляется пуск электродвигателя постоянного тока?
- 7) Объясните как регулируется частота вращения якоря электродвигателя постоянного тока?
- 8) Объясните как осуществляется пуск электродвигателя постоянного тока?
- 9) Объясните как осуществляется реверсирование электродвигателя постоянного тока?
- 10) Каковы область применения электродвигателей постоянного тока?

Тема 1.5 Электрические измерения

Измерение - нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Технические средства, которые служат для измерения электрических величин, называются **электроизмерительными приборами**.

Классификация электроизмерительных приборов

Электроизмерительные приборы предназначены для измерения электрических и магнитных параметров электрооборудования.

Различного назначения, а также неэлектрических величин путем их преобразования в электрические.

Классификация электроизмерительных приборов осуществляется по пяти основным признакам:

1) **по методу измерения различают:**

а) метод непосредственной оценки, когда в процессе измерения сразу оценивается измеряемая величина;

б) метод сравнения служит основой действия приборов сравнения (измерительные мосты, компенсаторы);

2) **роду измеряемой величины** различают приборы для измерения: напряжения; тока; мощности; энергии; угла сдвига фаз или косинуса угла сдвига фаз; частоты переменного тока; сопротивления;

роду ток: различают приборы: постоянного тока; переменного тока; постоянного и переменного тока;

3) **принципу действия** различают приборы следующих систем: магнитоэлектрической; электромагнитной; электродинамической; индукционной; тепловой; термоэлектрической; вибрационной; детекторной; электростатической; электронной.

Степени точности. Степень точности указан в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Относительная погрешность электроизмерительных приборов

Класс точности	1	2	3	4	5	6	7	8
Относительная погрешность, %	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0	4,0

Номер класса точности означает наибольшую допустимую погрешность этого прибора в процентах. Чем выше номер класса, тем больше погрешность электроизмерительного прибора.

Если класс точности обозначается *латинскими буквами*, то он определяется пределами *абсолютной погрешности*

Электроизмерительные приборы первых трех классов называются лабораторными, а остальных классов техническими.

Методы и погрешности измерения

Точность измерения характеризуется его возможными погрешностями. Последние при каждом конкретном измерении не должны превышать некоторого определенного значения. В зависимости от способа числового выражения различают погрешности абсолютные и относительные, а применительно к показывающим приборам приведенные.

Абсолютная погрешность - это разность между измеренным $A_{\text{изм}}$ и действительным A значениями измеряемой величины:

$$\Delta = A_{\text{изм}} - A.$$

Относительная погрешность измерения δ определяется обычно в процентах к истинному значению A , но так как отклонения Δ от $A_{\text{изм}}$ сравнительно малы, то можно считать, что

$$\delta = \frac{\Delta}{A} 100 \%.$$

Поскольку величина A_N при измерении может принимать любые значения в пределах от 0 до $A_{\text{изм}}$ (верхний предел диапазона измерения прибора (номинальное значение)), то оценить качество прибора по значению абсолютной или относительной погрешности невозможно, поэтому было введено понятие **приведенной погрешности**:





$$\gamma = \frac{\Delta}{A_N}$$













Абсолютная погрешность A_N у стрелочных электроизмерительных приборов имеет обычно один и тот же порядок вдоль всей шкалы. При постоянной абсолютной погрешности с уменьшением измеряемой величины быстро растет относительная погрешность δ , поэтому показания прибора будут тем точнее, чем ближе будет расположена стрелка к концу шкалы электроизмерительного прибора.

Условные обозначения электроизмерительных приборов

Каждый электроизмерительный прибор имеет на шкале условные обозначения (табл. 1.2), которые служат его характеристикой.

Таблица 1.2 – Условные обозначения.

Обозначение	Пояснение обозначения
	Прибор магнитоэлектрической системы с подвижной рамкой
	Прибор магнитоэлектрической системы с подвижным магнитом
	Прибор электромагнитной системы
	Прибор электродинамической системы

	Прибор ферродинамической системы
	Прибор индукционной системы
	Прибор электростатической системы
	Измерения проводятся при горизонтальном положении шкалы
	Измерения проводятся при вертикальном положении шкалы
	Измерения проводятся при наклонном положении шкалы
2,0	Класс точности при нормировании погрешности в процентах от диапазона изменения
	Класс точности при нормировании погрешности в процентах от длины шкалы
	Прибор для измерения в цепях постоянного тока
	Прибор для измерения в цепях переменного тока
	Прибор для измерения в цепях постоянного и переменного тока
	Прибор для измерения в цепях трехфазного переменного тока
	Прочность изоляции прибора (измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 кВ)
A	Амперметр
mA	Миллиамперметр
μA	Микроамперметр
V	Вольтметр
W	Ваттметр
Ω	Омметр

Измерительные механизмы электроизмерительных приборов

Магнитоэлектрический измерительный механизм (рис. 1.20, а) выполнен в виде постоянного магнита 1, снабженного полюсными наконечниками 5, между которыми укреплен стальной сердечник 4. В воздушном зазоре, образованном полюсными наконечниками и сердечником, помещена подвижная катушка 2, намотанная на алюминиевый каркас 6 (рис. 1.20, б). Катушка выполнена из очень тонкого провода и укреплена на оси, связанной со стрелкой спиральными пружинами 3 или растяжками. Через эти же пружины или растяжки осуществляется подвод тока к катушке.

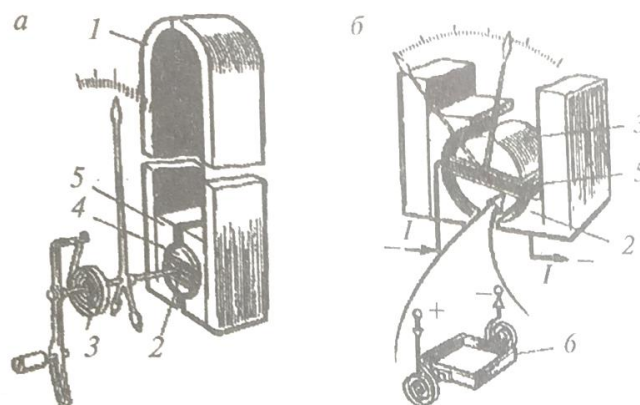


Рисунок 1.20 - Устройство магнитоэлектрического измерительного механизма

При прохождении тока I по катушке на каждый из ее проводников будет действовать электромагнитная сила. Суммарное действие всех электромагнитных сил создает вращающий момент M , стремящийся повернуть катушку и связанную с ней стрелку прибора на некоторый угол и. Так как индукция B магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом, неизменна и не зависит от тока I , то

$$M=c_1 I,$$

где c_1 - постоянная величина, зависящая от конструктивных параметров данного прибора (число витков катушки, ее размеры, индукция B в воздушном зазоре).

Повороту подвижной части измерительного механизма препятствует противодействующий момент $M_{пр}$, создаваемый спиральными пружинами или растяжками. Этот момент пропорционален углу закручивания, т. е. углу поворота и подвижной части, при этом

$$M_{пр}=c_2 \alpha$$

где c_2 — постоянная величина, зависящая от жесткости спиральных пружин или растяжек.

Поворот подвижной части измерительного механизма и стрелки будет продолжаться до тех пор, пока вращающий момент M , создаваемый током I не уравновесится противодействующим моментом $M_{пр}$. Из равенства $M = M_{пр}$ получим

$$\alpha = \frac{c_1}{c_2} I = kI$$

где k - постоянная величина.

Угол α поворота подвижной части пропорционален измеряемому току I , поэтому электроизмерительные приборы магнитоэлектрической системы имеют равномерную шкалу. Электроизмерительные приборы магнитоэлектрической системы обладают высокой чувствительностью и точностью, малым потреблением электроэнергии. Такие приборы широко применяются в цепях постоянного тока в качестве амперметров, вольтметров (рис. 1.21).



Рисунок 1.21 - Вольтметр магнитоэлектрической системы

При измерении направления тока в катушке действующие на нее силы также изменят направление на противоположное. В результате указательная стрелка станет отклоняться в обратную сторону, что исключает возможность использования прибора

для измерения переменного тока и во многих случаях приводит к неисправности прибора.

К недостаткам магнитоэлектрических приборов относятся:

- невозможность измерений электрических величин в цепях переменного тока, так как направление отклонения стрелки зависит от направления тока;
- слабая перегрузочная способность (при длительной 20-процентной нагрузке перегорают пружинки или обмотка катушки).

На рисунке 1.22 представлена функциональная схема электронного вольтметра постоянного тока.

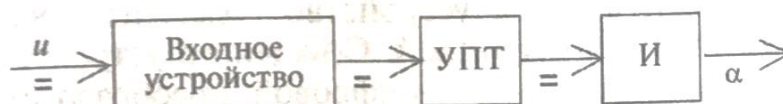


Рисунок 1.22 – Функциональная схема

Измеряемое напряжение подается на входное устройство, а затем поступает на усилитель постоянного тока (УПТ) и с выхода УПТ на измерительный прибор И магнитоэлектрической системы. В зависимости от величины сигнала, поступающего на измерительный прибор, стрелка последнего отклоняется на угол α .

Среди электронных измерительных приборов в последние годы в основном используют электронные вольтметры.

Цифровые измерительные приборы - это вид электронных измерительных приборов, в которых измеряемый аналоговый сигнал преобразуется в дискретную форму и отсчитывается в цифровом виде. В настоящее время такие приборы наиболее широко используются в радиоэлектронной технике для измерения силы тока, напряжения постоянного и переменного тока, частоты переменного тока, мощности и электроэнергии.

На рисунке 1.23 представлена упрощенная структурная схема цифрового вольтметра.



Рисунок 1.23 - Упрощенная структурная схема цифрового вольтметра.

На входное устройство поступает измеряемое напряжение, и, Входное устройство содержит делитель напряжения. В вольт-метрах постоянного тока входное устройство содержит преобразователь переменного тока в постоянный. С входного устройства напряжение поступает на аналоговый цифровой преобразователь (АЦП), представляющий собой сложную электронную схему, собранную на цифровых микросхемах. АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровой код. Процесс аналогово-цифрового преобразования составляет сущность любого цифрового прибора.

После преобразования цифровой код поступает на цифровое отсчетное устройство (ЦОУ). Использование в АЦП двоично-десятичного кода облегчает обратное преобразование кода в десятичное число. ЦОУ регистрирует измеряемое напряжение. Управляющее устройство координирует работу всех узлов вольтметра.

Измерение тока в цепи

Для измерения тока в цепи или отдельной ее ветви служат амперметры. Они включаются последовательно с другими элементами ветви, в которой производится измерение тока. Для того чтобы при подключении амперметра величина тока в элементах ветви не изменилась, сопротивление обмотки измерительного механизма должно быть очень малым.

На рисунке 1.24 показана схема подключения амперметров для измерения тока. Амперметры A_2 и A_3 измеряют токи в ветвях R_2 и R_3 соответственно, амперметр A_1 измеряет ток в неразветвленной части цепи, т. е. ток, потребляемый всей цепью.

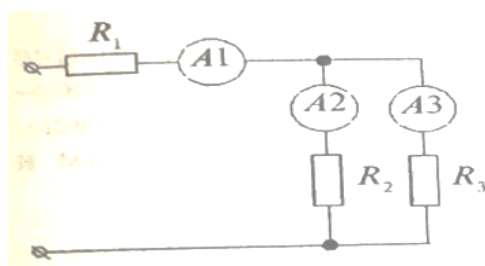


Рисунок 1.24 - Подключение амперметров для измерения тока

Каждый амперметр имеет определенный предел измерения. Для того чтобы измерить ток, превышающий предельно допустимое значение, необходимо расширить предел измерения амперметра.

Для расширения пределов измерения тока применяются шунты. Шунт представляет собой сопротивление, включаемое в цепь измеряемого тока параллельно амперметру (рис. 1.25).

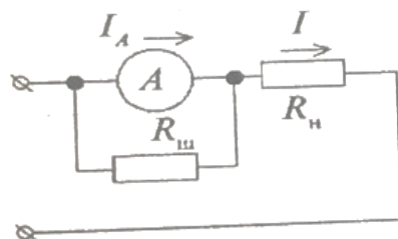


Рисунок 1.25 - Схема подключения шунта

Измеряемый ток цепи I и ток измерительного механизма амперметра связаны соотношением

$$I_A = I \frac{r_{ш}}{r_{ш} + r_A} \text{ или } I = \left(\frac{r_A}{r_{ш}} + 1 \right) I_A$$

где $p = \left(\frac{r_A}{r_{\text{ш}}} + 1\right)$ - коэффициент шунтирования, показывающий, во сколько раз измеряемый ток больше тока, проходящего по обмотке измерительного механизма амперметра, т. е. насколько расширяется предел измерения тока.

$$r_{\text{ш}} = \left(\frac{r_A}{p-1} + 1\right)$$

т. е. для расширения предела измерения в p раз необходим шунт с сопротивлением в $(p-1)$ раз меньшим сопротивления измерительного механизма.

Например, требуется определить сопротивление шунта к амперметру с предельным значением измеряемого тока 5 А и сопротивлением обмотки измерительного механизма 0,006 Ом для расширения предела измерения до 20 А:

$$r_{\text{ш}} = \frac{0,006}{20/5-1} = 0,002 \text{ (Ом)}$$

На токи до 100 А шунты помещают внутри прибора, на большие токи шунты делают наружными и присоединяют к клеммам амперметра при помощи проводов с точно выверенным сопротивлением, так как в противном случае распределение токов будет другим и результат измерения — неправильным.

Измерение напряжения

Для измерения напряжения на каком-либо участке цепи необходимо подключить вольтметр параллельно этому участку. На рисунке 1.26 представлена схема подключения вольтметров V_1 и V_2

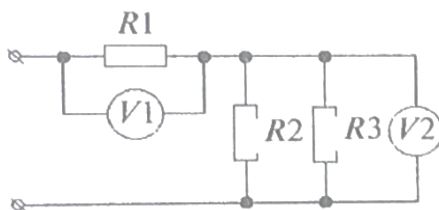


Рисунок 1.26 - Подключение вольтметров для измерения напряжения

Сопротивление обмотки измерительного механизма вольтметра должно иметь как можно большее значение, чтобы подключение вольтметра не повлияло на работу цепи, питающей нагрузку. С этой целью обмотка измерительного механизма выполняется из провода очень малого сечения и имеет большое количество витков.

Для измерения напряжений более нескольких сотен вольт и расширения пределов измерения вольтметры подключаются к измеряемому участку с добавочным сопротивлением. Вольтметр и добавочное сопротивление соединяются последовательно (рис. 1.27).

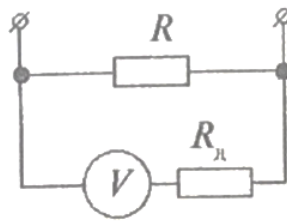


Рисунок 1.27 - Схема соединения вольтметра с добавочным сопротивлением R_d

Измеряемое напряжение U и напряжение на обмотке измерительного механизма связаны соотношением

$$U = U_v + U_d$$

откуда добавочное сопротивление

$$r_d = \frac{I_v r_v p - I_v r_v}{I_v} = r_v (p - 1)$$

где p — коэффициент, показывающий, во сколько раз расширяется предел измерения вольтметра.

Например, требуется определить добавочное сопротивление к вольтметру, имеющему предел измерения 20 В и сопротивление обмотки измерительного механизма 120 Ом, чтобы расширить предел измерения этого вольтметра до 220 В.

$$r_d = 120 \cdot (220 / 20 - 1) = 120 (11 - 1) = 1200 \text{ (Ом)}.$$

Размещая внутри прибора наборы шунтов и добавочных сопротивлений, получают многопредельные комбинированные электроизмерительные приборы (мультиметры). На рисунке 1.28 показан внешний вид портативного мультиметра.



Рисунок 1.28 - Портативный цифровой мультиметр

Измерение электрической мощности.

Для измерения электрической мощности применяют ваттметры (рис. 1.29).



Рисунок 1.29 - Ваттметр лабораторный

Электрическая мощность представляет собой произведение тока и напряжения, поэтому ваттметр имеет две обмотки. Одна из них (токовая) включается в цепь последовательно с нагрузкой. Вторая обмотка (обмотка напряжения) включается параллельно нагрузке. Схема включения ваттметра для измерения мощности постоянного и переменного тока приведена на рисунке 1.30.

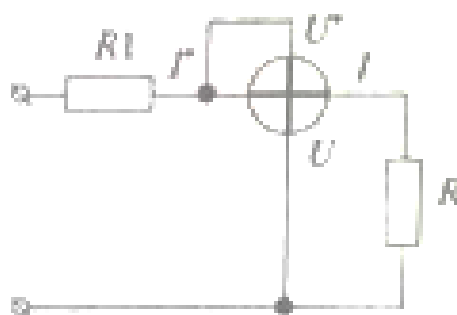


Рисунок 1.30 - Схема включения ваттметра

Измерение электрического сопротивления

Измерение сопротивлений различных компонентов электрических цепей можно осуществить несколькими методами.

Метод амперметра и вольтметра. Сопротивление резистора R_x можно определить, измерив проходящий по нему ток и напряжение на его зажимах.

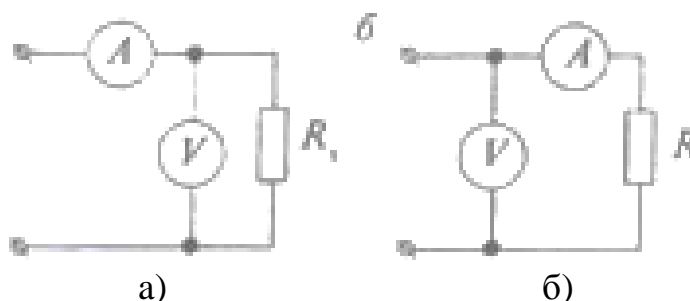


Рисунок 1.31 – Измерение сопротивления методом амперметра и вольтметра

Для определения сопротивления резистора этим методом используют две схемы подключения измерительных приборов. В первой из них (рис. 1.31, а) амперметр покажет значение тока, равное сумме токов I и I_y проходящих по резистору R_x и вольтметру, а вольтметр — напряжение непосредственно на зажимах резистора. Для того

чтобы получить максимально точный результат, необходимо последовательно с вольтметром подключить амперметр (точнее, миллиамперметр, так как обмотка вольтметра обладает большим сопротивлением и через вольтметр будет проходить незначительный ток) или заранее знать величину сопротивления обмотки вольтметра. Сопротивление резистора R_x в этом случае определяется по формуле

$$R_x = \frac{I}{U} = \frac{U}{I - I_v}$$

Данная схема применяется для определения сопротивлений, значительно меньших сопротивления обмотки вольтметра, и тогда значением тока I_v можно пренебречь.

Во второй схеме (рис. 1.31, б) вольтметр показывает сумму напряжений на резисторе R_x и на обмотке амперметра, а амперметр - ток, проходящий по резистору. В этом случае сопротивление определяется по формуле

$$R_x = \frac{U}{I} = \frac{U - U_A}{I}$$

где U_A — падение напряжения на обмотке амперметра;

R_A — сопротивление амперметра.

Данная схема используется для измерения больших сопротивлений, многократно превышающих сопротивление обмотки амперметра. В этом случае падением напряжения на обмотке амперметра можно пренебречь.

Мостовой метод основан на сравнении величин измеряемого сопротивления R_x и известного сопротивления R_0 (рис. 1.32).

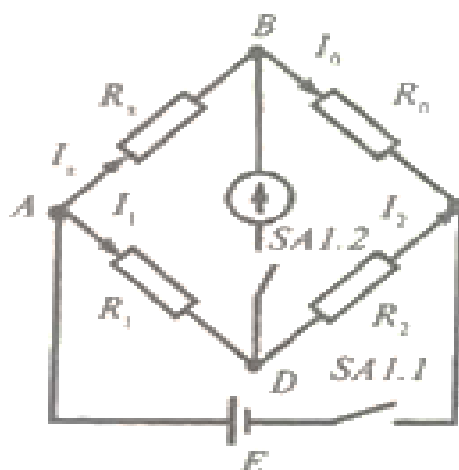


Рисунок 1.32 - Измерение сопротивлений мостовым методом

Измеряемое сопротивление R_x и три переменных сопротивления R_0 , R_1 и R_2 соединяются, образуя замкнутый четырехугольник $ABCD$, в одну диагональ которого ($A-C$) включен источник питания а в другую ($B-D$)— гальванометр.

Очевидно, что в точке $О$ потенциал имеет промежуточное значение между потенциалами точек A и C , поэтому, если изменять сопротивления R_1 и R_2 , можно добиться того, что потенциал точки $О$ будет равен потенциалу точки B . При этом ток в гальванометре будет равен нулю. Состояние, когда ток в гальванометре отсутствует, называют равновесием моста.

При равновесии моста $\varphi_B = \varphi_C$, поэтому

$$R_x I_x = R_1 I_1; \quad R_0 I_0 = R_2 I_2$$

Так как $I_1 = I_2$ и $I_x = I_0$, то получим

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{R_1}{R_2} \text{ или } R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2}$$

Данное выражение позволяет определить сопротивление R_x , если значения сопротивлений R_0 , R_1 , и R_2 известны. Поэтому в качестве резисторов R_0 , R_1 , и R_2 используют магазины сопротивлений.

На рисунке 1.33 представлена другая схема моста сопротивлений. Между точками А и С натянута калиброванная проволока (реохорд), по которой скользит контакт D. Между точками В и С включен магазин сопротивлений, а между точками А и В — измеряемое сопротивление R_x . Значение сопротивления R_x определяется по формуле

$$R_x = R_0 \frac{L_1}{L_2}$$

где $\frac{L_1}{L_2}$ — отношение длин участков калиброванной проволоки, которое указывается на шкале моста.

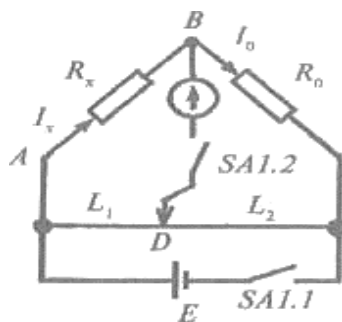


Рисунок 1.33 - Мостовая схема для измерения сопротивлений с использованием реохорда

Приборы для измерения сопротивлений. Принцип действия таких приборов основан на том, что, согласно закону Ома, величину сопротивления в любой цепи можно определить по величине тока при неизменном напряжении. Для измерения сопротивлений используется прибор магнитоэлектрической системы, обладающий высокой чувствительностью. Применяя эталонные сопротивления, включаемые в цепь, шкалу прибора можно отградуировать непосредственно в омах.

Различают приборы для измерения сопротивления проводников (омметры) и приборы для измерения сопротивления изоляционных материалов (мегомметры) (рис. 1.34).



а



б

Рисунок 1.34 - Омметр (а) и мегомметр (б)

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите сферы применения электрических измерений.
2. Приведите классификацию электроизмерительных приборов.
3. Объясните что такое «класс точности» и «относительная погрешность» электроизмерительного прибора.
4. Охарактеризуйте электроизмерительный прибор по условным обозначениям на его шкале.
5. Поясните устройство и принцип действия магнитоэлектрического измерительного механизма.
6. Поясните устройство и принцип действия электромагнитного измерительного механизма.
10. Объясните каким образом можно расширить предел измерений амперметра и вольтметра.
11. Приведите и поясните схемы для измерения сопротивлений методом амперметра и вольтметра.
12. Объясните на чем основан принцип действия приборов для измерения сопротивлений.

Тема 1.6 Однофазные электрические цепи переменного тока. Переменный электрический ток. Получение переменного тока. Параметры переменного тока

Электрический ток, который через определенные промежутки времени изменяется по величине и направлению, называется **переменным током**. На практике главным образом используется переменный ток, изменяющийся с течением времени по синусоидальному закону – **синусоидальный (периодический) переменный ток**.

Полный цикл изменения значений ЭДС или тока (один оборот рамки) происходит за время T (рис. 1.35), которое называется **периодом**.

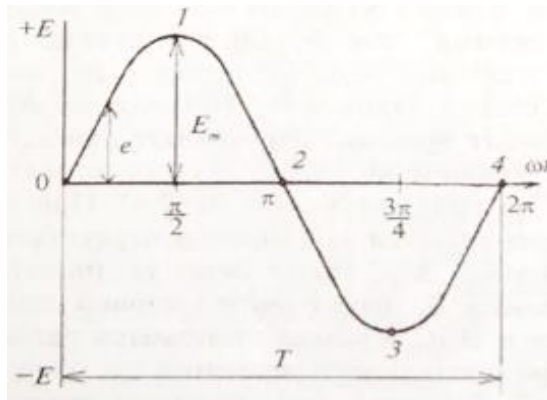


Рисунок 1.35 - График изменения ЭДС в течение периода

Количество циклов в течение секунды называется **частотой** переменной ЭДС или переменного тока и определяется выражением

$$f = 1 / T.$$

Частота измеряется в единицах в секунду (c^{-1}) и выражается в герцах (Гц). Изменение величины угла поворота в течение 1 с называется **угловой (циклической) частотой** переменного тока и обозначается греческой буквой ω . Угловая частота измеряется в радианах.

Текущие значения e , соответствующие различным моментам времени, называются **мгновенными значениями** ЭДС.

Значение E_m – максимальное значение ЭДС, называется **амплитудным значением** или **амплитудой**.

Мгновенные значения переменных величин, изменяющихся по синусоидальному закону, определяются по формулам

$$E = E_m \sin \omega t; u = U_m \sin \omega t; I = I_m \sin \omega t.$$

Действующее значение переменного тока соответствует значению постоянного тока, который за время одного периода оказывает такое же тепловое (механическое и др.) действие, как и данный переменный ток. Действующие значения переменных ЭДС, напряжения и тока обозначаются соответственно буквами E , U и I , точно так же, как и в цепях постоянного тока.

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

Аналогично получаются выражения

$$E = E_m / \sqrt{2} \text{ и } U = U_m / \sqrt{2}$$

Помимо действующих ЭДС и токов в электролите рассматриваются и средние значение этих величин. Для несинусоидальных ЭДС, токов и напряжений среднее значение за полный период равно нулю, так как площади отрицательных и положительных полуволн синусоид по величине и различны по знаку.

Для периодических величин, кривые которых симметричны относительно оси времени, принято определять среднее значение за положительный полупериод. Например, среднее значение синусоидального тока

В процессе вращения рамки изменяется угол ее поворота. Этот переменный угол $\alpha = \omega t$ называется **фазой ЭДС**. Фазами ЭДС и тока являются аргументы синуса $\omega t + \psi_e$ и $\omega t + \psi_i$. Величины ψ_e и ψ_i , определяющие значение ЭДС и тока в начальный момент времени ($t = 0$), называются **начальными фазами** ЭДС и тока. На рисунке 1.36 приведен график синусоидальной ЭДС с начальной фазой $\psi_e = 0$, а на рисунке 1.96 – с начальной фазой $\psi_i \neq 0$.

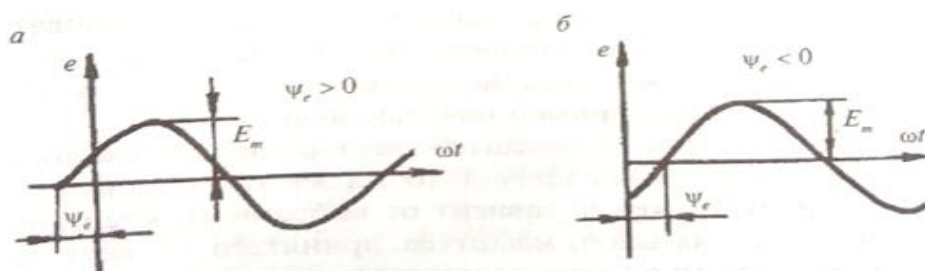


Рисунок 1.36 - График синусоидальных ЭДС с положительной (а) и отрицательной (б) начальной фазой

На рисунке 1.37 приведены графики синусоидальных напряжения и тока, имеющих различные фазы ψ_u и ψ_i .

Разность фаз ЭДС и тока одинаковой частоты называется **сдвигом по фазе** между ЭДС и током и обозначается буквой φ .

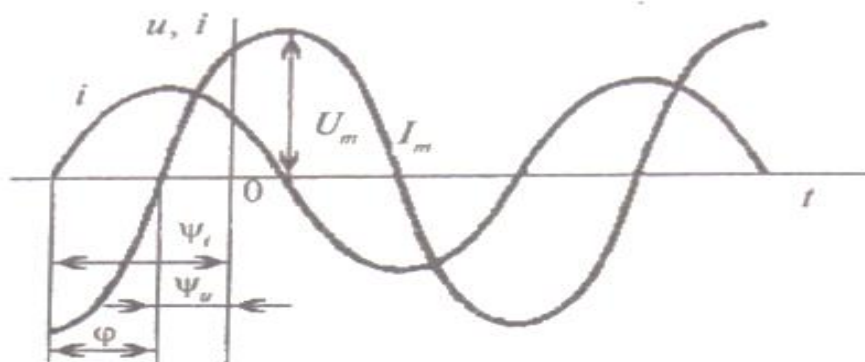


Рисунок 1.37 - График синусоидальных ЭДС и тока со сдвигом по фазе φ

Графическое изображение переменных величин

На рисунке 1.97 приведен график изменения синусоидальных ЭДС и тока, имеющих разные начальные фазы, а следовательно, между ними будет иметь место сдвиг по фазе. Как видно из графика, напряжение опережает ток на угол сдвига φ . Заменяем графики ЭДС и тока векторами. Примем начальную фазу тока $\psi_i = 0$ и отложим в некото-

ром заданном масштабе вектор тока по оси абсцисс, а вектор напряжения – из начальной точки вектора тока под углом φ . Длина вектора напряжения зависит от выбранного масштаба, при этом он может отличаться от масштаба, принятого для вектора тока. Результат произведенной замены приведен на рисунке 1.38.

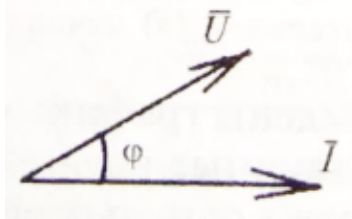


Рисунок 1.38 - Векторная диаграмма ЭДС и тока

Полученное графическое изображение переменных ЭДС и тока в виде векторов называется *векторной диаграммой*.

Цепь переменного тока с активным сопротивлением

Сопротивление резистора в цепи переменного тока будет больше, чем сопротивление этого же резистора в цепи постоянного тока при одинаковых значениях постоянного и действующего напряжений. Это происходит за счет неравномерного распределения тока в проводнике и потерь энергии в окружающую среду. Поэтому в отличие от сопротивления постоянному току сопротивление r в цепи переменного тока называется *активным*. К нагрузке, обладающей при промышленной частоте только активным сопротивлением, относятся реостаты, электрические лампы, нагревательные приборы и другие подобные устройства.

Рассмотрим цепь, содержащую резистор r (рис. 1.39). Напряжение u изменится по синусоидальному закону $u = U_m \sin \omega t$.

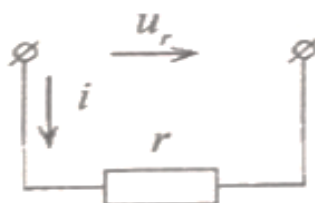


Рисунок 1.39 – Цепь переменного тока с активным сопротивлением

Действующий ток

$$I = U / r.$$

Для цепи, обладающей только активным сопротивлением r , ток и напряжение совпадают по фазе, следовательно, в любой момент времени в течение периода угол сдвига по фазе между векторами тока и напряжения $\varphi = 0$. Это видно из графиков тока и напряжения, представленных на рисунке 1.40. На этом же рисунке изображена векторная диаграмма, из которой так же следует, что направление векторов тока и напряжения совпадают.

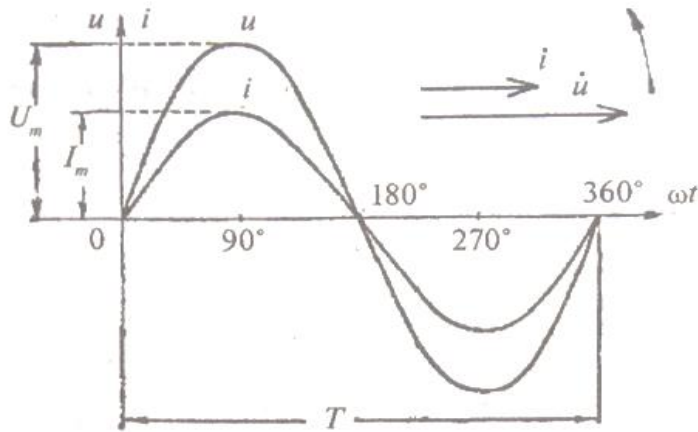


Рис. 1.40. График $u = f(t)$, $i = f(t)$ и векторная диаграмма цепи Переменного тока с активным сопротивлением

Мгновенная мощность цепи равна произведению мгновенных значений тока и напряжения:

$$P = ui = U_m \sin \omega t I_m \sin \omega t = U_m I_m \sin^2 \omega t = 2UI \sin^2 \omega t.$$

Выполнив проверку $U = Ir$, можно записать

$$P = UI = I^2 r$$

Из формулы выше, следует, что средняя мощность в активном сопротивлении преобразуется в тепло. Такая мощность называется **активной мощностью**.

Активную мощность в цепях переменного тока измеряют с помощью ваттметра.

Цепь переменного тока с индуктивным сопротивлением

Предположим, что к источнику переменного напряжения подключена катушка с постоянной индуктивностью L и с активным сопротивлением $r = 0$. Отсутствие активного сопротивления допускается чисто теоретически, только для лучшего переменного тока с индуктивностью.

Переменный ток в цепи с индуктивностью (рис. 1.41) изменяется по синусоидальному закону $I = I_m \sin \omega t$.

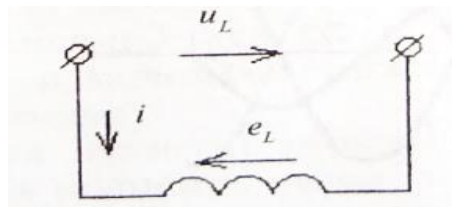


Рисунок 1.41 - Цепь переменного тока с индуктивностью

После дифференцирования выражения выше получим

$$u = \omega L I_m \cos \omega t = \omega L I_m \sin(\omega t + \pi / 2) = U_m \sin(\omega t + \pi / 2)$$

где $U_m = I_m \omega L$.

Ток и напряжение в цепи с индуктивностью изменяется по синусоиде, напряжение опережает ток на 90° .

На векторной диаграмме (рис. 1.42) показаны направления векторов ЭДС самоиндукции, напряжения и тока в произвольный рассматриваемый момент времени.

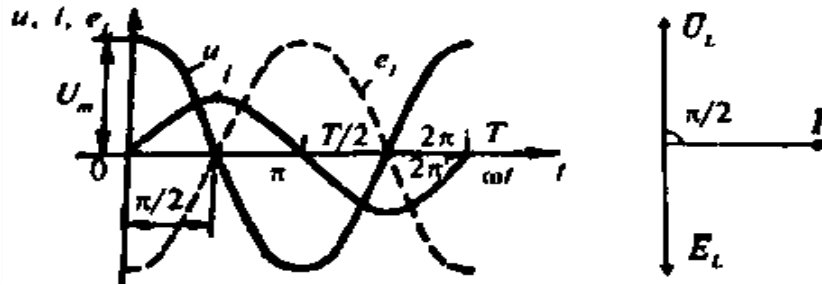


Рисунок 1.42 – Графики $i=f(t)$, $u=f(t)$, $e_L=f(t)$ и векторная диаграмма цепи переменного тока с индуктивным сопротивлением

Для действующих значений тока и напряжения получим формулы закона Ома для цепи переменного тока с индуктивностью:

$$U_L = \omega LI = x_L I \text{ и } I = \frac{U_L}{\omega L} = \frac{U_L}{X_L}.$$

Величина $x_L = \omega L = 2\pi fL$ измеряется в единицах сопротивления (Ом) и называется **индуктивным сопротивлением** цепи. Физически индуктивное сопротивление характеризует влияние ЭДС самоиндукции на величину действующего значения тока в цепи. Индуктивное сопротивление пропорционально частоте.

Мгновенная мощность цепи тока с индуктивностью равна

$$p = ui = I_m \sin \omega t U_m \sin(\omega t + \pi / 2) = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t.$$

График $p = f(t)$ представлен на рисунке 1.43.

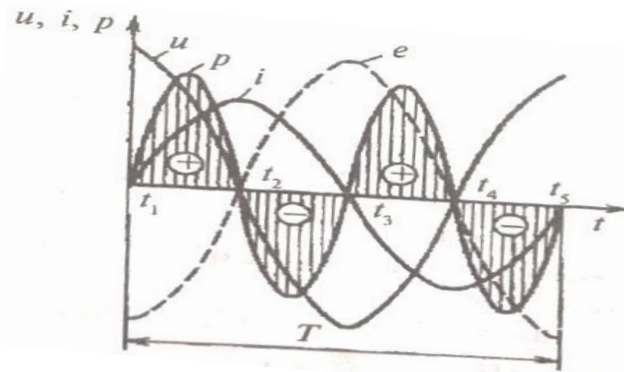


Рисунок 1.43 - График $u = f(t)$, $i = f(t)$, $p = f(t)$

Реактивная мощность цепи с индуктивностью

$$Q_L = UI = \omega L I^2 = \omega W_{L \max}.$$

Единица реактивной мощности называется **вольт-ампер реактивный** и обозначается *вар*.

Цепь переменного тока с емкостью

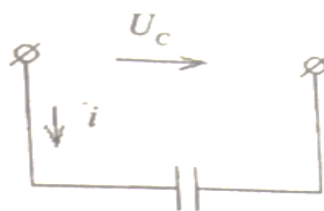


Рисунок 1.44 - Цепь переменного тока с конденсатором

В течение третьей и четвертой четвертей периода сначала происходит зарядка, но на пластинах накапливаются заряды обратного знака, но на пластинах накапливаются заряды обратного знака, а затем – разряд конденсатора. Разделив обе части уравнения $I_m = \omega C U_m$ на $\sqrt{2}$, получим

$$I_m / \sqrt{2} = \frac{\omega C U_m}{\sqrt{2}}, \text{ или } I = \omega C U = \frac{U}{1/\omega C} = U / x_c.$$

Выражение выше представляет собой закон Ома для цепи переменного тока, содержащей емкость. Величина $\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = x_c$ измеряется в омах и представляет собой **емкостное сопротивление**. В физическом смысле емкостное сопротивление отражает влияние емкости на величину действующего значения тока в цепях переменного напряжения. Емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте тока.

Мгновенная мощность в цепи переменного тока с емкостью. Пусть начальная фаза тока в цепи равна нулю, тогда

$$I = I_m \sin \omega t.$$

Так как напряжение на емкости отстает от тока на угла 90° , то

$$u = U_m \sin(\omega t - \pi / 2) \text{ или } u = -U_m \cos \omega t.$$

Энергию, которой обмениваются источник и емкостная нагрузка, характеризуют максимальным значением мгновенной мощности цепи. Такая мощность называется реактивной мощностью:

$$Q_c = UI = \omega W_{c \max}.$$

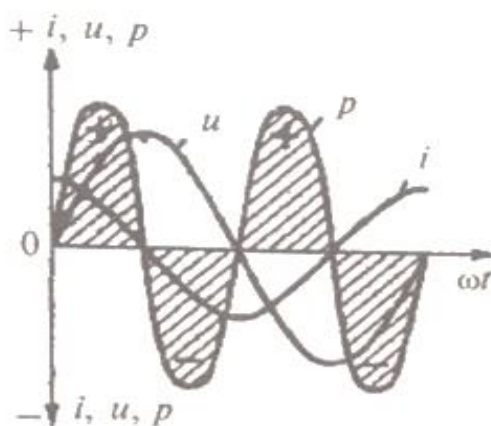


Рисунок 1.45 - График $p = f(t)$ (заштрихованная область) для цепи с емкостью

Цепь переменного тока с реальной катушкой

Реальная катушка любого электротехнического устройства обладает определенным активным сопротивлением r и индуктивностью L (рис.1.46). Значение активного сопротивления катушки зависит от материала, диаметра и длины провода катушки.

Значение индуктивного сопротивления зависит от частоты переменного тока и индуктивности.

В цепи переменного тока с активным сопротивлением происходит процесс образования электрической энергии в другой вид, например, в тепловую энергию. В цепи с индуктивностью происходит обмен энергией между источником напряжения и индуктивностью, т. е. электрическая энергия в другой вид не преобразуется.

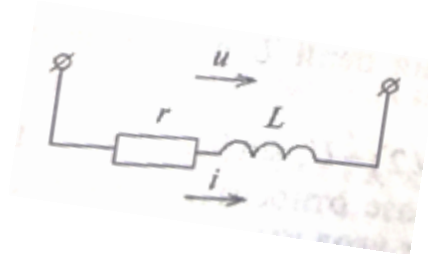


Рисунок 1.46 - Схема замещения реальной катушки индуктивности

Построим векторную диаграмму с реальной катушкой индуктивности (рис. 1.47).

Для цепи с последовательным соединением элементов принято отсчитывать угол φ от вектора I , поэтому сначала отложим по оси абсцисс вектора тока I (рис. 1.47). Вектор активного напряжения U_a совпадает по направлению с вектором тока. Вектор индуктивного сопротивления U_L отложим из начала координат вверх по оси ординат, т. е. под углом 90° к вектору тока I . Результирующий вектор U суммарного напряжения определяется по правилу параллелограмма.

Вектор индуктивного напряжения U_L так же можно отложить из конца вектора активного напряжения U_a , тогда результирующий вектор U суммарного напряжения определяется по правилу треугольника. Векторная диаграмма, построенная таким способом, строго учитывает место расположения отдельных элементов цепи и называется *топографической векторной диаграммой*.

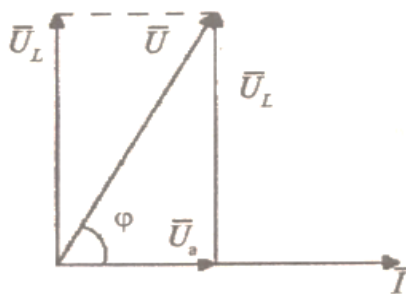


Рисунок 1.47 - Векторная диаграмма напряжения реальной катушки индуктивности

Аналитические значения напряжения цепи U вычисляются по формуле

$$u = u_a + u_L = U_{am} \sin \omega t + U_{Lm} \sin(\omega t + \pi/2) = U_m(\omega t + \varphi).$$

Поскольку вектор U сдвинут по фазе относительно вектора I на угол φ против часовой стрелки, этот угол имеет положительное значение.

Из векторной диаграммы следует, что напряжение цепи U и его составляющие стороны U_L и U_a связаны между собой таким же соотношением, как и стороны прямоугольного треугольника, катетами которого являются активное и индуктивное падения напряжения, а гипотенузой – напряжение цепи.

Для полученного треугольника напряжений по теореме Пифагора имеем

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}.$$

На основании закона Ома выразим активную и индуктивную составляющие напряжения через ток:

$$U_a = Ir; U_L = Ix_L.$$

Подставим полученные выражения выше в формулу $U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}$

$$U = \sqrt{(Ir)^2 + (Ix_L)^2} = I\sqrt{r^2 + x_L^2},$$

откуда

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_L^2}}.$$

Обозначим $\sqrt{r^2 + x_L^2} = Z$, где Z – полное сопротивление цепи. Выражение $I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_L^2}}$ примет вид

$$I = U / Z.$$

Полученная формула представляет собой закон Ома для цепи переменного тока с реальной катушкой индуктивности.

Угол сдвига фаз между вектором тока I и вектором напряжения U можно определить по формуле

$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U} = \frac{Ir}{IZ} = \frac{r}{Z} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + x_L^2}}.$$

Множитель $\cos \varphi$ называется **коэффициентом мощности**.

Мгновенная мощность цепи с реальной катушкой индуктивности

$$p = ui = I_m \sin \omega t U_m \sin(\omega t + \varphi).$$

Средняя мощность за период

$$P_{cp} = UI \cos \varphi = UI(r/Z) = I^2 r = P.$$

Неразветвленная цепь переменного тока с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью

На рисунке 1.48 приведена схема цепи, содержащей активное сопротивление, индуктивность и емкость.

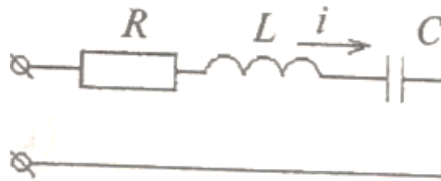


Рисунок 1.48 - Неразветвленная цепь переменного тока с R , L и C

Напряжение на активном сопротивлении и ток совпадают по фазе, напряжение на индуктивности опережает ток на 90° , а напряжение на емкости отстает от тока на 90° . Исходя из этого построим векторную диаграмму данной цепи (рис. 1.49).

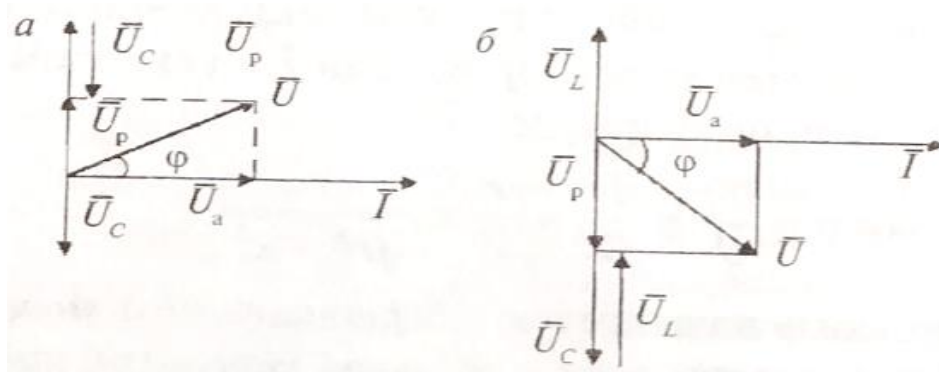


Рисунок 1.49 - Векторная диаграмма неразветвленной цепи переменного тока с R , L и C . a – при $x_L > x_C$; b – при $x_L < x_C$

Векторы U , U_L , U_p образуют стороны треугольника напряжений, для которых имеем

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}; \quad U_a = U \cos \varphi; \quad U_p = U \sin \varphi,$$

где $U_p = U_L - U_C$.

На основании закона Ома выразим активную и реактивную составляющие напряжения через ток

$$U_a = Ir; \quad U_p = I(x_L + x_C).$$

Подставим полученные выражение выше в формулу $U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}$; $U_a = U \cos \varphi$; $U_p = U \sin \varphi$,

$$U = \sqrt{(Ir)^2 + (Ix_L - Ix_C)^2} = I\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2},$$

откуда

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}}$$

Обозначив $\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = Z$, получим аналогичное формуле $U = \sqrt{(Ir)^2 + (Ix_L)^2} = I\sqrt{r^2 + x_L^2}$, выражение закона Ома для неразветвленной цепи переменного тока, содержащей активное сопротивление R , индуктивностью L и емкостью C .

Из формулы $U_a = Ir$; $U_p = I(x_L + x_C)$ следует, что реактивная составляющая U_p напряжения U может принимать положительные, отрицательные значения и может быть равна нулю в зависимости от соотношения индуктивного x_L и емкостного x_C сопротивлений.

Если $x_L > x_C$, то цепь носит активно-индуктивный характер и напряжение U опережает ток по фазе на угол φ (см. рис. 1.49, а).

Если $x_L < x_C$, то цепь носит активно емкостный характер и напряжение U отстает от тока по фазе на угол φ (см. рис. 1.49, б).

В неразветвленной цепи переменного тока, содержащей индуктивность и емкость, напряжения U_L и U_C могут превышать напряжение на входе цепи при условии, что $R < x_L$ и $R > x_C$. В подтверждение этого рассмотрим следующий пример.

Пусть напряжение цепи, представленной на рисунке 1.48, $U = 200$ В, и сопротивлением участков $R = 10$ Ом, $X_L = 100$ Ом, $X_C = 80$ Ом. Определим напряжение на каждом участке этой цепи.

Полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{10^2 + (100 - 80)^2} = 22,36 \text{ (Ом)}.$$

Ток в цепи $I = U/Z = 200/22,36 = 8,94$ (А).

Напряжение на участках цепи, В:

$$U_R = IR = 8,94 \cdot 10 = 89,4;$$

$$U_L = Ix_L = 8,94 \cdot 100 = 894;$$

$$U_C = Ix_C = 8,94 \cdot 80 = 715,2.$$

Полученные результаты показывают, что напряжения на индуктивности и емкости значительно превосходят напряжение источника питания.

Треугольник сопротивлений и мощностей

При делении сторон треугольник напряжением U_a , U_p и U (см. рис. 1.50) на ток I получаем треугольник сопротивлений, подобный треугольнику напряжений (рис. 1.112, а).

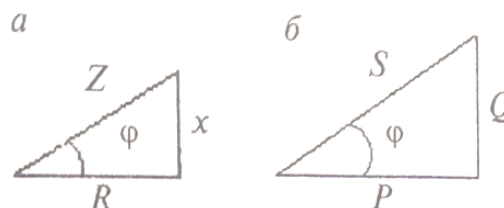


Рисунок 1.50 - Треугольники сопротивлений (а) и мощностей (б)

Стороны треугольника сопротивлений представляют собой отрезки, а не векторы, так как сопротивления, в отличие от напряжения и тока, не изменяют свое значение с

течением времени. Треугольник сопротивлений можно построить непосредственно по известным значениям активного, индуктивного и емкостного сопротивлений. Отрезок R , обозначающий активное сопротивление откладывается параллельно оси абсцисс, а отрезок $x = x_L - x_C$, обозначающий реактивное сопротивление, откладывается параллельно оси ординат и располагается выше или ниже оси абсцисс в зависимости от характера реактивного сопротивления. Если сопротивление носит индуктивный характер ($x_L > x_C$) то сторона x располагается выше оси абсцисс, если сопротивление носит емкостной характер ($x_L < x_C$) – ниже оси абсцисс. Гипотенуза треугольника представляет полное сопротивление Z цепи.

Умножив R , x и Z на I^2 , получим треугольник мощностей (рис. 1.50, б). Стороны треугольника мощностей также представлены отрезками, а не векторами. Треугольник мощностей строится по тому же принципу, что и треугольник сопротивлений: отрезок P , обозначающий активную мощность, располагается по отношению к оси абсцисс в зависимости от характера реактивной мощности. Гипотенуза треугольника мощностей представляет собой полную мощность S цепи.

Из треугольника сопротивлений и мощностей имеет соотношения

$$R = Z \cos \varphi; x = Z \sin \varphi.$$

$$P = S \cos \varphi; Q = S \sin \varphi; S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Резонанс напряжения

Резонанс напряжения – это явления, которое наступает в неразветвленной цепи переменного тока, содержащей активное, индуктивное и емкостное сопротивление при условии, что $x_L = x_C$. В этом случае полное сопротивление цепи равно активному сопротивлению R :

$$Z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2} = \sqrt{R^2} = R.$$

Ток в цепи достигает максимального значения, которое зависит только от величины активного сопротивления R . Напряжения на индуктивности $U_C = Ix_C$ будут равны и взаимно уравновешиваться.

Векторная диаграмма при резонансе напряжений изображена на рисунке 1.51. Из диаграммы видно, что напряжение U и ток I при резонансе напряжений совпадают по фазе, а напряжение на входе цепи U по величине фактически равно падению напряжения на активном сопротивлении U_a благодаря взаимной компенсации индуктивного U_L и емкостного U_C падения напряжения

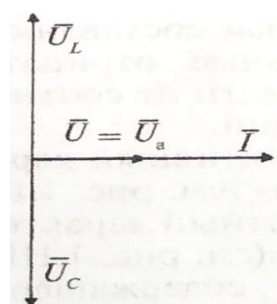


Рисунок 1.51 - Векторная диаграмма цепи переменного тока при резонансе напряжений

Резонанс напряжения можно получить двумя способами: изменением параметров L и C ; изменением частоты источника переменного напряжения.

Цепь переменного тока с параллельными соединениями активного, индуктивного и емкостного сопротивлений

На рисунке 1.52 представлена схема цепи переменного тока, содержащая параллельное соединение активного сопротивления, реальную катушку индуктивности и емкости.

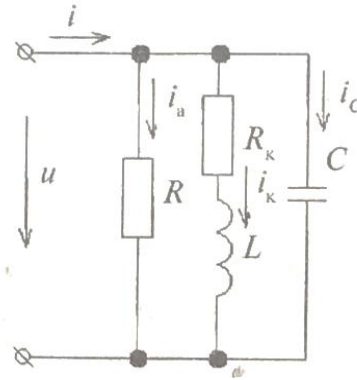


Рисунок 1.52 - Цепь переменного тока с параллельным соединением активного, индуктивного и емкостного сопротивлений

При параллельном соединении ветвей к каждому из них приложено одно и то же направление. Токи в ветвях определяются по закону Ома. Ток в ветви с активным сопротивлением

$$I_a = U / R.$$

Ток в реальной катушке индуктивности

$$I_k = U / Z_k = \frac{U}{\sqrt{R_k^2 + x^2}}$$

следует разложить на две взаимно перпендикулярные составляющие: активную $I_{a.k} = I_k \cos \varphi_k$ и индуктивностью $I_L = I_k \sin \varphi_k$.

Ток в конденсаторе

$$I_C = U / x_c$$

Для цепи с параллельным соединением ветвей принято отсчитывать углы сдвига по фазе в каждой ветви от вектора напряжения. В начале построения векторной диаграммы откладывают в принятом масштабе вектора напряжения U по оси абсцисс. Принимают некоторый масштаб для векторов тока откладывают также по оси абсцисс вектор активной составляющей тока катушки $I_{a.k}$ и вектор тока в активном сопротивлении I_a .

Вектор индуктивной составляющей I_L отстает от вектора на напряжение U на угол 90° , поэтому индуктивную составляющую тока в катушке I_L направляют под углом -90° к вектору напряжения U .

Вектор тока I_c в ветви, содержащий емкость, опережает вектор напряжения U на угол 90° . Ток в неразветвленной части цепи определяется по сумме векторов токов в ветвях

$$I = I_a + I_{a.k} + I_L + I_C$$

Результат построения векторной диаграммы представлен на рисунке 1.53

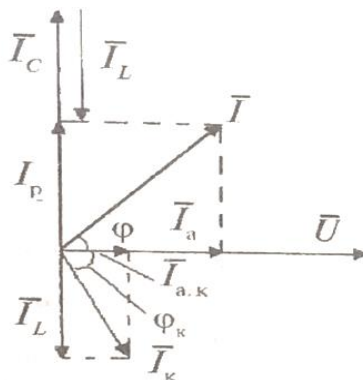


Рисунок 1.53 - Векторная диаграмма цепи переменного тока с параллельным соединением R , L и C

Векторы $(I_a + I_{a.k})$, I_L и I_C образуют стороны треугольников токов, для которого будут справедливы соотношения

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}; \quad I_a = I \cos \varphi; \quad I_p = I \sin \varphi.$$

Если стороны треугольника токов разделить на величину приложенного к цепи напряжения U , то получают подобный *треугольник проводимостей* (рис.1.55).

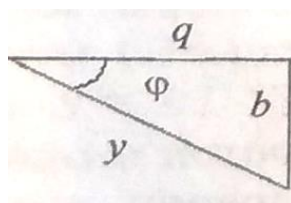


Рисунок 1.55 - Треугольник проводимостей

Стороны треугольника проводимостей, как и стороны треугольника сопротивлений, представляют собой отрезки (рис. 1.55), так как проводимости не изменяют своего значения с течением времени.

Треугольник проводимостей можно построить непосредственно по известным значениям активной q , индуктивной b_L и емкостной b_C проводимостей. Отрезок q , обозначающий активную проводимость, откладывается параллельно оси абсцисс, а отрезок $b = b_L - b_C$, обозначающий реактивную проводимость, откладывается параллельно оси ординат и располагает выше или ниже оси абсцисс в зависимости от характера реактивной проводимости. Если проводимость носит индуктивный характер ($b_L > b_C$), то сторона b располагает ниже оси абсцисс, если проводимость носит емкостный характер ($b_L < b_C$) – выше оси абсцисс.

Для катетов треугольника проводимостей характерны тригонометрические соотношения, а гипотенуза определяется по теореме Пифагора:

$$q = y \cos \varphi; \quad b = y \sin \varphi; \quad y = \sqrt{q^2 + b^2}.$$

Резонанс токов

В зависимости от соотношения индуктивной и емкостной проводимостей угол сдвига по фазе между векторами напряжения U и тока I в неразветвленной части цепи может быть положительным или равным нулю. Последнее имеет место при условии, что $b_L = b_C$. Полная проводимость равна активной проводимости: $y = q$.

$$I = \sqrt{(I_a + I_{a.к})^2 + (I_L - I_C)^2} = I_a + I_{a.к}.$$

Векторная диаграмма резонанса токов в цепи, приведенной на рисунке 1.52, изображена на рисунке 1.56.

Резонанс токов достигается теми же способами, что и резонанс напряжений.

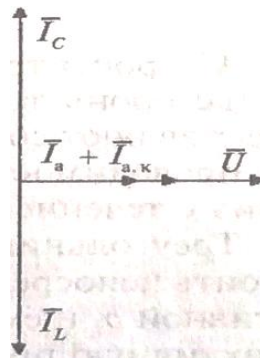


Рисунок 1.56 - Векторная диаграмма цепи при резонансе токов

Расчет однофазных цепей переменного тока

При расчете однофазных цепей переменного тока приходится производить различные математические операции над синусоидами (тока и напряжения) одной и той же частоты, но с различными начальными фазами. Эти операции удобнее всего производить над действующими значениями, рассматривая их как векторы. Величины векторов при этом равны действующим значениям тока (напряжения), а начальная фаза определяет угол между вектором и положительной горизонтальной осью декартовой системы координат. При положительной (опережающей) начальной фазе векторов повернут на соответствующий угол против движения часовой стрелки, а при отрицательной (отстающей) – по направлению движения часовой стрелки.

В цепях синусоидального тока обычно строят топографическую векторную диаграмму, каждая точка которой соответствует определенной точке электрической цепи. Построение векторов топографической векторной диаграммы осуществляется в порядке обхода электрической цепи. Топографическая векторная диаграмма позволяет выполнить сложение напряжений на отдельных участках цепи с последовательным соединением элементов (второй закон Кирхгофа) и токов протекающих в параллельных ветвях (первый закон Кирхгофа).

При построении векторной диаграмм один из векторов принимают за основной (опорный) вектор, который располагают по оси абсцисс в положительном направлении. В этом случае начальная фаза синусоидальной величины (тока или напряжения) равна нулю. Для последовательной цепи за опорной принимают вектор тока, а при параллельной цепи – вектор напряжения.

При расчете однофазных цепей переменного тока обычно требуется определить токи и напряжения на отдельных участках цепи по заданным значениям сопротивлений и напряжения на входе цепи (тока в неразветвленной части цепи) или напряжения на отдельном участке цепи (тока в одной из ветвей цепи). Рассмотрим несколько типичных примеров расчета однофазных цепей переменного тока.

Пример 1

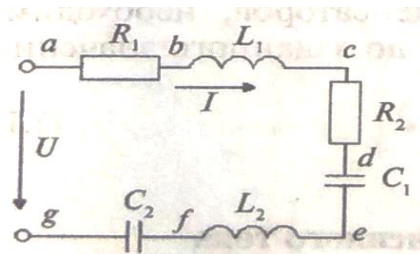


Рисунок 1.57 - Схема для расчета

Для схемы, представленной на рисунке 1.57, известно: напряжение $U = 180$ В; частота сети $f = 50$ Гц; индуктивность $L_1 = 15,9$ мГн, $L_2 = 31,8$ мГн; емкости $C_1 = 637$ мкФ, $C_2 = 159$ мкФ; активное сопротивление $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 10$ Ом.

Определить ток цепи, падения напряжений на отдельных участках, активную, реактивную и полную мощность цепи.

Решение

1. Определить сопротивление реактивных элементов, Ом:

$$X_{L1} = 2\pi f L_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 15,9 \cdot 10^{-3} = 5 \text{ Ом};$$

$$X_{L2} = 2\pi f L_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 31,8 \cdot 10^{-3} = 10 \text{ Ом};$$

$$X_{C2} = \frac{1}{2\pi f C_1 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 637} = 5 \text{ Ом};$$

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi f C_2 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 159} = 20 \text{ Ом}.$$

2. Определить сопротивление цепи, Ом:

а) активное сопротивление цепи $R = R_1 + R_2 = 5 + 10 = 15$ Ом;

б) индуктивное сопротивление цепи $X_L = X_{L1} + X_{L2} = 5 + 10 = 15$ Ом;

в) емкостное сопротивление цепи $X_C = X_{C1} + X_{C2} = 5 + 20 = 25$ Ом;

г) реактивное сопротивление цепи $X = X_L - X_C = 15 - 25 = -10$ Ом;

д) полное сопротивление цепи $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{15^2 + 10^2} = 18$ Ом.

3. Ток, протекающий по цепи $I = U / Z = 180 / 18 = 10$ (А)

4. Падение напряжения на отдельных участках цепи, В:

$$U_{ab} = IR_1 = 10 \cdot 5 = 50 \text{ В};$$

$$U_{bc} = IX_{L1} = 10 \cdot 5 = 50 \text{ В};$$

$$U_{cd} = IR_2 = 10 \cdot 10 = 100 \text{ В};$$

$$U_{de} = IX_{C1} = 10 \cdot 5 = 50 \text{ В};$$

$$U_{ef} = IX_{L2} = 10 \cdot 10 = 100 \text{ В};$$

5. Активная мощность цепи $P = UI \cos \varphi = 180 \cdot 10 \cdot 0,883 = 1499,4$ (Вт)

6. Реактивная мощность цепи $Q = UI \sin \varphi = 180 \cdot 10 \cdot 0,55 = 990$ (вар)
7. Полная мощность цепи $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{1499,4^2 + 990^2} = 1796,75$ (В · А)

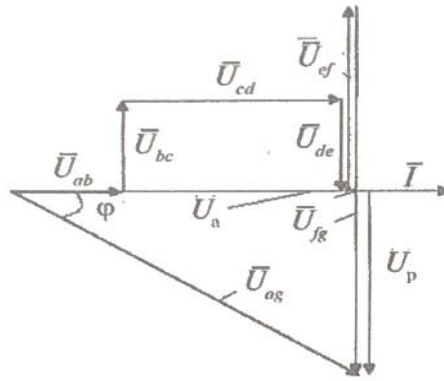


Рисунок 1. 58 - Векторная диаграмма

Векторная топологическая диаграмма, построенная по результатам расчетов на рисунке 1.58. В качестве опорного вектора выбран вектор тока I с начальной фазой $\psi = 0$. Обход цепи осуществляется от точки a по направлению движения часовой стрелки, поэтому построение векторной диаграммы начинается с построения вектора напряжения U_{ab} . Этот вектор представляет падение напряжения на активном сопротивлении R_1 , поэтому его направление совпадает с направлением вектора тока I . Вторым строится вектор U_{bc} , который представляет падение напряжения на индуктивном сопротивлении X_{L1} , поэтому он опережает вектор тока I на угол 90° . Начало вектора U_{bc} исходит из конца вектора U_{ab} . Дальнейшее построение векторов падения напряжения на остальных участках цепи осуществляется аналогично. Начало каждого последующего вектора падения напряжения располагается в конце предыдущего. Последним строится вектор U_{fg} падения напряжения на конденсаторе C_2 . Соединив начало вектора U_{ab} с концом вектора U_{fg} получаем вектор напряжения U_{ag} на входе цепи. На диаграмме также показаны векторы активной U_a и реактивной U_p составляющих этого напряжения. Так как вектор U_{ag} отстает от вектора тока I на угол φ , то можно сделать вывод, что цепь носит активно-емкостный характер.

Пример 2

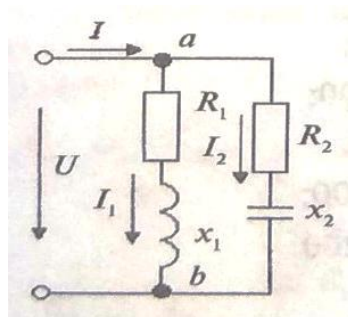


Рисунок 1.59 - Схема для расчета

Для схемы, представленной на рисунке 1.59, известно:

- Напряжение $U = 220$ В;
- Частота сети $f = 50$ Гц;
- Активное сопротивление $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 10$ Ом;
- Реактивные сопротивления $X_1 = 40$ Ом, $X_2 = 60$ Ом.

Определить токи I_1 и I_2 в параллельных ветвях и ток I в неразветвленной части цепи.

Решение

1. Определить сопротивление параллельных ветвей, Ом;

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50 \text{ Ом};$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{80^2 + 60^2} = 100 \text{ Ом}.$$

2. Токи в ветвях, А;

$$I_1 = U / Z_1 = 220 / 50 = 4,4 \text{ А};$$

$$I_2 = U / Z_2 = 220 / 100 = 2,2 \text{ А}.$$

3. Для определения тока в неразветвленной части цепи необходимо определить активные и реактивные составляющие токов I_1 и I_2 А:

а) активные составляющие токов I_1 и I_2 :

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1 = I_1 R_1 / Z_1 = 4,4 \cdot 30 / 50 = 2,64 \text{ А};$$

$$I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2 = I_2 R_2 / Z_2 = 2,2 \cdot 80 / 100 = 1,76 \text{ А};$$

б) реактивная составляющая токов I_1 и I_2 :

$$I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1 = I_1 X_1 / Z_1 = 4,4 \cdot 40 / 50 = 3,52 \text{ А};$$

$$I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2 = I_2 X_2 / Z_2 = 2,2 \cdot 60 / 100 = 1,32 \text{ А}.$$

Согласно первому закону Кирхгофа, активная и реактивная составляющая тока I в неразветвленной части цепи равны сумме активных и реактивных составляющих токов I_1 и I_2 в параллельных ветвях, А:

$$I_a = I_{1a} + I_{2a} = 2,62 + 1,76 = 4,4 \text{ А};$$

$$I_p = I_{1p} - I_{2p} = 3,52 - 1,32 = 2,2 \text{ А}.$$

Ток в неразветвленной части цепи:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{4,4^2 + 2,2^2} = 4,92 \text{ (А)}.$$

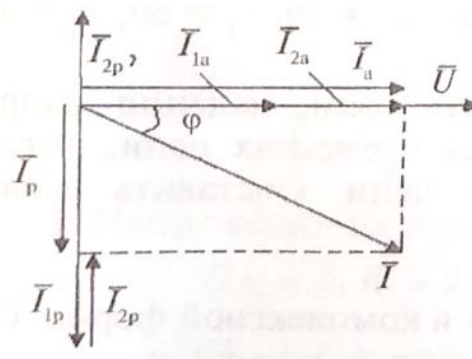


Рисунок 1.60 - Векторная диаграмма

Векторная диаграмма токов представлена на рисунке 1.60. В качестве опорного выбран вектор напряжения U . Направление векторов I_{1a} и I_{2a} совпадают по направлению с вектором напряжения U . Сумму этих векторов представляет собой активную составляющую тока I_a в неразветвленной части цепи. Реактивная составляющая I_{1p} тока первой ветви отстает от вектора напряжения U на угол 90° , так как она носит индуктивный характер. Реактивная составляющая I_{2p} тока второй ветви имеет емкостный

характер, поэтому опережает вектор напряжения U на угол 90° . Разность этих реактивных составляющих дает реактивную составляющую тока I_p в неразветвленной части цепи.

Расчет цепей переменного тока с параллельно-последовательным соединением ветвей, содержащих сопротивления различного характера, представляют собой весьма трудоемкую задачу еще на этапе определения эквивалентных сопротивлений. Существенно снизить трудоемкость таких вычислений можно путем применения комплексных чисел, или символического метода. Выражение закона Ома и аналитическое выражение треугольников сопротивлений комплексными числами позволяет рассчитывать разветвленные цепи переменного тока методом преобразования подобно цепям постоянного тока.

Расчет переменных величин с использованием векторных диаграмм не может обеспечить высокую точность полученных результатов из-за необходимости выполнения многократных геометрических построений. Применение комплексных чисел позволяет заменить векторные операции алгебраическими действиями.

Для технических расчетов инженерных расчетов точность вычислений считается приемлемой, если относительная погрешность их не превышает 1%, следовательно, задача решена верно, так как баланс мощностей соблюдается.

Для построения векторной диаграммы необходимо:

- Выбрать масштабные коэффициенты для векторов тока и напряжения;
- На комплексной координатной плоскости отложить из начала координат векторы токов и напряжения в соответствии с вычисленными значениями – длиной вектора с учетом масштабных коэффициентов и углом поворота относительно оси действительных чисел.

Векторная диаграмма, построенная по результатам расчета, представлена на рисунке 1.61.

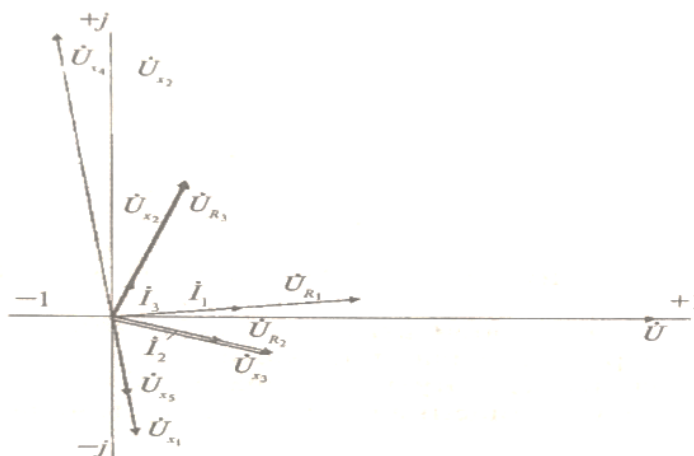


Рисунок 1.61 - Векторная диаграмма по результатам вычислений

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте понятие переменного тока. Дайте определение понятиям: период, частота, угловая частота.
2. Поясните процесс получения переменного тока.
3. Дайте определение понятиям: максимально, мгновенное и действующее значения переменного тока.

4. Дайте определения фазы и сдвиг фаз.
5. Изобразите графически переменный ток и напряжение. Дайте понятие векторной диаграмме.
6. Поясните особенности цепи с активными сопротивлением.
7. Поясните особенности цепи с индуктивными сопротивлениями.
8. Поясните особенности цепи с емкостным сопротивлением.
9. Поясните особенности цепи с активно-индуктивным сопротивлением.
10. Поясните особенности цепи с активно-емкостным сопротивлением.
11. Объясните в каких случаях возникает резонанс напряжений и резонанс токов.
12. Дайте определение коэффициента мощности. Поясните его технико-экономическое значение.
13. Опишите порядок расчета цепей переменного тока. В чем преимущества использования комплексных чисел для расчета цепей переменного тока

Тема 1.7 Трехфазные электрические цепи. Трехфазная ЭДС, трехфазный ток. Получение трехфазной ЭДС.

Трёхфазная система электрических цепей — это совокупность трех электрических цепей, в которых действуют три синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, создаваемые общим источником энергии и сдвинутые по фазе одна относительно другой на угол 120° .

Источником электроэнергии в трехфазной системе является трехфазный генератор, вырабатывающий три ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутые по фазе на угол 120° . На рисунке 1.62 приведена упрощенная схема такого генератора.

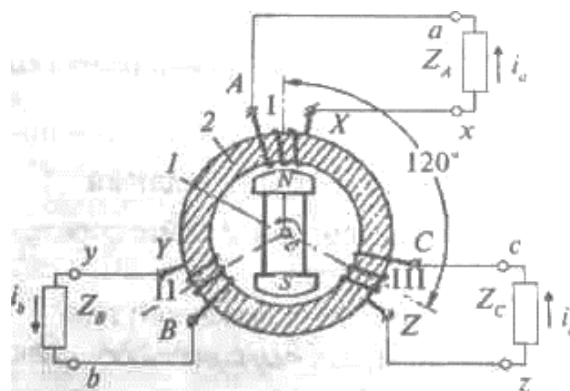


Рисунок 1.62 - Модель трехфазной системы

Генератор имеет ротор 1, приводимый во вращение с круговой частотой ω . На роторе генератора размещена обмотка постоянного тока, создающая постоянный относительно ротора магнитный поток. На статоре 2 размещены три обмотки, пространственно смещенные относительно друг друга на угол 120° . Это фазные обмотки, или *фазы*, которые обозначают буквами *A*, *B* и *C*. Каждая фазная обмотка имеет два вывода (две крайние точки), которые условно называют *началом* и *концом* обмотки. За начало обмотки генератора (источника) обычно принимают тот вывод, к которому направлена положительная ЭДС. Начала фазных обмоток источника обозначаются прописными латинскими буквами *A*, *B*, *C* (как и отдельные фазы трехфазной системы). Концы фазных обмоток источника обозначаются буквами *X*, *Y* и *Z* соответственно. Начала и концы фаз потребителя (приемника) обозначаются строчными латинскими буквами *a*, *b*, *c* и *x*, *y*, *z* соответственно. Аналогичные обозначения имеют трансформаторные подстанции, распределительные щиты и другие промежуточные звенья системы электропитания. Кроме буквенных обозначений применяется цветовая маркировка проводов и шин: фаза *A* обозначается желтым цветом, фаза *B* — зеленым и фаза *C* — красным.

На схемах фазные обмотки источника условно изображают в виде трех индуктивностей. Условно ЭДС фазы *A* присваивают начальную фазу, равную нулю, тогда ЭДС фазы *B* отстает от ЭДС фазы *A* на угол 120° , а ЭДС фазы *C* — на угол 120° от ЭДС фазы *B* и на угол 240° от ЭДС фазы *A* (рис. 1.63):

$$e_A = E_m \sin \omega t,$$

$$\begin{aligned} e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ), \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ). \end{aligned} \quad (1.171)$$

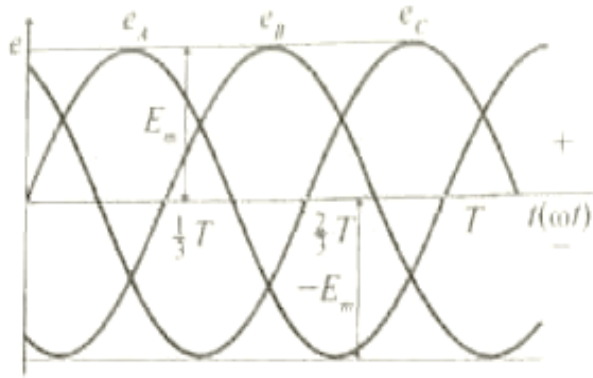


Рисунок 1.63 - Временные диаграммы ЭДС трехфазной системы

Соединение обмоток генератора и потребителей энергии «звездой». Векторная диаграмма напряжений.

Если каждую обмотку трехфазного генератора соединить с отдельным потребителем электрической энергии (см. рис. 1.62), то получим *несвязанную* трехфазную систему с тремя самостоятельными цепями, для работы которых необходимы шесть проводов. Уменьшить количество проводов, соединяющих генератор с потребителем (потребителями) до четырех или до трех, не нарушая режим работы потребителей, можно путем соединения обмоток генератора между собой, и тогда трехфазная система становится *связанной*. Одним из способов такого соединения является соединение «звездой», которое образуется путем Соединения концов обмоток генератора в одну точку (рис. 1.64). Эта точка называется нулевой или нейтральной (нейтралью) и обозначается буквой *N* (реже — буквой *O*).



Рисунок 1.64 - Схема соединения обмоток генератора и нагрузки потребителей «звездой»

Потребители электрической энергии соединяются «звездой» так же, как и генератор — концы фазных потребителей Z_a , Z_b и Z_c соединены в нейтральную точку n .

Фазные и линейные напряжения и токи и соотношения между ними

Провода, соединяющие источник электрической энергии с приемником, называются *линейными*.

Токи, протекающие по линейным проводам, называются *линейными токами* (токи I_A , I_B и I_C (см. рис. 1.127) — линейные).

Токи, протекающие по фазам приемника, называются *фазными токами* (токи I_a , I_b и I_c . (см. рис. 1.127) — фазные).

$$I_A = I_a; I_B = I_b; I_C = I_c$$

или в общем случае

$$I_L = I_\phi$$

Ток нейтрального тока равен:

$$\bar{I}_N = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c$$

т. е. ток в нейтральном проводе равен геометрической сумме фазных токов.

Напряжения между линейными проводами называются *линейными напряжениями*. Напряжения U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} - линейные.

Напряжение между началом и концом фазы называется *фазным напряжением*. Так как начало фазы подключено к линейному проводу, а конец — к нейтральной точке, то определение фазного напряжения можно сформулировать иначе: напряжение между линейным проводом и нейтралью называется фазным напряжением, или напряжение между линейным и нейтральным проводами (при наличии нейтрального провода). Напряжения U_{an} , U_{bn} и U_{cn} — фазные напряжения.

Учитывая положительные направления фазных токов, линейные напряжения со стороны приемника определяются выражениями

$$\begin{aligned}\bar{U}_{ab} &= \bar{U}_b - \bar{U}_a, \\ \bar{U}_{bc} &= \bar{U}_c - \bar{U}_b, \\ \bar{U}_{ca} &= \bar{U}_a - \bar{U}_c,\end{aligned}$$

Итак, действующее значение линейных напряжений равно **векторной разности** соответствующих фазных напряжений.

При построении векторной диаграммы напряжений потенциалы нейтральных точек источника и приемника принимают равными нулю. Векторы фазных напряжений \bar{U}_a , \bar{U}_b и \bar{U}_c направляют от точки N (и) к точкам A , B и C (a, b, c) и располагают по лучам «звезды» со сдвигом на угол 120° относительно друг друга (рис. 1.65).

Для того чтобы определить вектор линейного напряжения \bar{U}_{ab} , необходимо к вектору напряжения \bar{U}_a прибавить вектор напряжения \bar{U}_b с противоположным знаком.

После переноса вектора \bar{U}_{ab} параллельно самому себе он соединит точки A и B на векторной диаграмме фазных напряжений. Аналогично строятся векторы линейных напряжений \bar{U}_{bc} и \bar{U}_{ca} (на рис. 1.65 условно не показаны).



Рисунок 1.65 - Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений

На векторной диаграмме фазные напряжения образуют «звезду», а векторы линейных напряжений - «треугольник». Из этого следует, что векторная сумма линейных напряжений равна нулю, т. е.

$$\bar{U}_{AB} + \bar{U}_{BC} + \bar{U}_{CA} = 0.$$

Из рассмотрения треугольника напряжений, образованного векторами \bar{U}_a , \bar{U}_b и \bar{U}_{ab} , следует, что значение линейного напряжения \bar{U}_{ab} определяется как $U_{ab} = 2U_a \sin \pi / 3 = \sqrt{3} U_a$, следовательно

$$U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_l = \sqrt{3} U_\phi.$$

Расчет трехпроводных и четырехпроводных цепей с различным характером нагрузки

Основной задачей при расчете трехфазной цепи является определение токов в ветвях цепи при заданном напряжении источника. Для *расчета* должны быть заданы система напряжений источника энергии, схема цепи, значение, тип сопротивлений ветвей и их характеристики. Будем считать, что для всех далее рассматриваемых методов расчета система напряжений источника электроэнергии симметрична.

Расчет симметричной трехфазной цепи осуществляется одинаково как для четырех-, так и для трехпроводной системы, так как при симметричной нагрузке ток в нейтральном проводе равен нулю и поэтому необходимость в нейтральном проводе отпадает.

При симметричном режиме токи и напряжения фаз равны по модулю и сдвинуты по фазе по отношению друг к другу на угол 120° . Предположим, что заданы значение линейного напряжения U_l , активные R_ϕ и реактивные x_ϕ сопротивления в фазе и способ их соединения. Требуется определить фазные и линейные токи, активную, реактивную и полную мощность цепи. Расчет такой цепи проводится для одной фазы путем определения:

- фазного напряжения по формуле $U_\phi = U_l / \sqrt{3}$;
- эквивалентного активного сопротивления R_ϕ в фазе Приемника, если фазная нагрузка содержит более одного активного сопротивления. Формула для определения значения R_ϕ зависит от способа соединения активных сопротивлений;
- эквивалентного реактивного сопротивления X_ϕ в фазе приемника, если фазная нагрузка содержит более одного реактивного сопротивления. Формула для

определения значения X_ϕ зависит от способа соединения реактивных сопротивлений и от их характера — индуктивного или емкостного;

- полного сопротивления фазной нагрузки по формуле $Z_\phi = \sqrt{R_\phi^2 + X_\phi^2}$;
- тока в фазе приемника по формуле $I_\phi = U_\phi / Z_\phi$. При соединении «звездой» фазные и линейные токи равны;
- активной, реактивной и полной мощности, потребляемой фазной нагрузкой по формулам

$$P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi = U_\phi I_\phi \frac{R_\phi}{Z_\phi}$$

$$Q_\phi = U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi = U_\phi I_\phi \frac{X_\phi}{Z_\phi}; S_\phi = \sqrt{P_\phi^2 + Q_\phi^2}$$

- активной, реактивной и полной мощности, потребляемой всей нагрузкой. Так как нагрузка симметрична, то полученные значения P_ϕ , Q_ϕ и S_ϕ следует умножить на 3: $P = 3P_\phi$; $Q = 3Q_\phi$; $S = 3S_\phi$

Расчет несимметричной трехфазной цепи производится различными методами в зависимости от наличия или отсутствия нейтрального провода.

При наличии нейтрального провода расчет осуществляется в той же последовательности, что и для цепи с симметричной нагрузкой, с той лишь разницей, что фазные сопротивления, фазные токи, активные и реактивные мощности вычисляются для каждой фазы отдельно:

$$Z_a = \sqrt{R_a^2 + X_a^2}; Z_b = \sqrt{R_b^2 + X_b^2}; Z_c = \sqrt{R_c^2 + X_c^2};$$

$$I_a = \frac{U_\phi}{Z_a}; I_b = \frac{U_\phi}{Z_b}; I_c = \frac{U_\phi}{Z_c};$$

$$P_a = U_a I_a \frac{R_a}{Z_a}; P_b = U_b I_b \frac{R_b}{Z_b}; P_c = U_c I_c \frac{R_c}{Z_c}; P = P_a + P_b + P_c;$$

$$Q_a = U_a I_a \frac{X_a}{Z_a}; Q_b = U_b I_b \frac{X_b}{Z_b}; Q_c = U_c I_c \frac{X_c}{Z_c}$$

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c; S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Ток в нейтральном проводе определяется как векторная сумма фазных токов из векторной диаграммы рисунок 1.66.

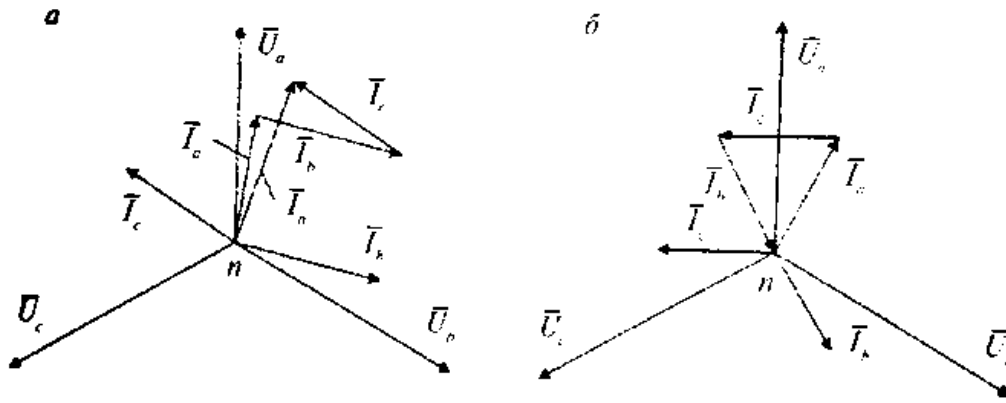


Рисунок 1.66 – Векторная диаграмма фазных напряжений и токов при несимметричной (а) и симметричной (б) нагрузке.

Во избежание необходимости построения Векторной диаграммы расчеты рекомендуется производить, с использованием комплексных чисел.

При отсутствии нейтрального провода напряжения на фазах приемника U_a , U_b и U_c не одинаковы из-за наличия напряжения смещения нейтрали U_N (см. векторную диаграмму на рис. 1.67).

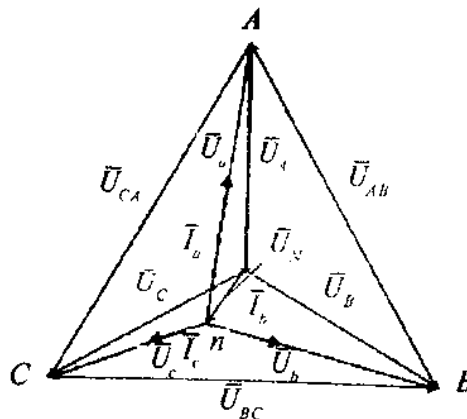


Рисунок 1.67 – Векторная диаграмма напряжений и токов в трехпроводной цепи при несимметричной нагрузке

Разность между фазными напряжениями приемника пропорциональна величине смещения нейтрали. Расчет трехфазной цепи в этом случае выполняется в следующем порядке:

- фазные напряжения источника задаются в символической форме;
- определяются фазные сопротивления приемника и результаты записываются в символической форме;
- вычисляется значение смещения нейтрали;
- вычисляются фазные напряжения приемника;
- вычисляются токи в фазной нагрузке.

Соединение обмоток генератора и потребителей энергии «треугольником»

При соединении фазных обмоток трехфазного источника или приемника электрической энергии по схеме «треугольник» конец K_1 первой фазы AB соединяется с началом H_2 второй фазы BC (рис. 1.68), конец K_2 второй фазы соединяется с началом

H_3 третьей фазы CA и конец K_3 третьей фазы — с началом первой фазы AB . Три линейных провода $A-A'$, $B-B'$ и $C-C'$, соединяющих источник электрической энергии с приемником, подключаются к началам фаз.

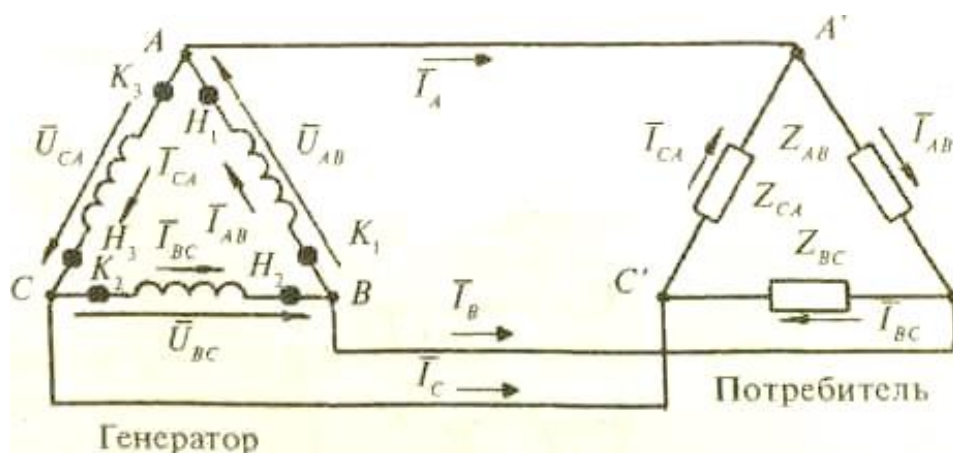


Рисунок 1.68 - Соединение обмоток генератора и нагрузки приемника «треугольником»

Каждая нагрузка в фазах приемника подключается к двум линейным проводам, т. е. включается на линейное напряжение. Исходя из рисунка 1.136, при соединении треугольником между фазным и линейным напряжением имеет место соотношение

$$U_{\phi} = U_{л},$$

т. е. при соединении обмоток источника или фазных нагрузок приемника «треугольником» фазные напряжения U_{ϕ} равным линейным $U_{л}$ и не зависят от сопротивлений Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA} фаз нагрузки.

На рисунке 1.136 обмотки источника и фазных нагрузок соединены по одной и той же схеме, однако на практике источник и приемник могут соединяться по различным схемам.

Рассмотрим соотношение между фазными и линейными токами при соединении приемника «треугольником».

На основании первого закона Кирхгофа для узловых точек A', B' и C' можно составить уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}, \end{aligned}$$

откуда следует, что в общем случае при соединении «треугольником» ток в линейном проводе равен векторной разности двух соответствующих фазных токов.

На рисунке 1.69 приведена векторная диаграмма напряжений и токов трехфазного симметричного приемника с активно индуктивной нагрузкой, соединенного по схеме «треугольник». Если векторная диаграмма построена в масштабе, то линейные токи могут быть определены путем измерения величины соответствующих векторов.

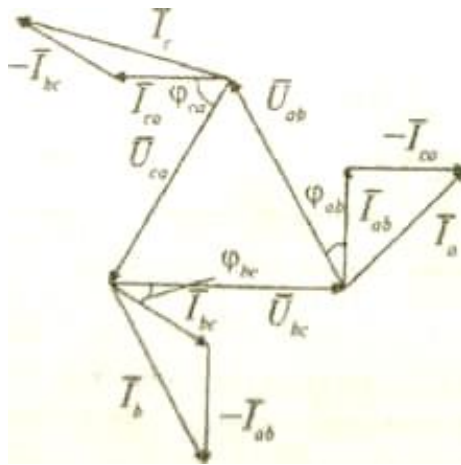


Рисунок 1.69 - Векторная диаграмма токов и напряжений симметричного, соединенного «треугольником» трехфазного приемника

Для получения точных результатов вычисление значений фазных и линейных токов рекомендуется осуществлять символическим методом.

При симметричной нагрузке фазные токи одинаковы и сдвинуты по фазе на угол 120° относительно друг друга. В этом случае треугольники токов равнобедренные и углы при их вершинах составляют 120° , поэтому

$$I_a = 2I_{ab} \cos 30^\circ = \sqrt{3}I_{ab}.$$

Аналогично

$$I_b = \sqrt{3}I_{bc}; I_c = \sqrt{3}I_{ca}.$$

Отсюда следует, что при равномерной нагрузке линейный ток в $\sqrt{3}$ раз больше фазного тока:

$$I_l = \sqrt{3}I_\phi.$$

При соединении приемника «треугольником»:

- обеспечивается номинальный режим работы нагрузки в каждой фазе приемника;
- для работы трехфазного приемника требуется три провода;
- токи в обмотках генератора электрической энергии меньше токов в линейных проводах.

Как недостаток данного соединения можно отметить, что при обрыве линейного провода одна фаза не получает напряжения, а в двух остальных нарушается номинальный режим работы.

Схему «треугольник» применяют в тех случаях, когда номинальное напряжение фазных нагрузок равно линейному напряжению источника. По этой схеме к трехфазной сети подключают электродвигатели, трансформаторы, электрические печи и другую равномерную и неравномерную нагрузку. Наиболее часто трехфазные приемники приходится подключать к источникам с напряжением 380/220 В (обмотки источника соединены «звездой»). В числителе указывают линейные напряжения, а в знаме-

нателе — фазные. Одни и те же потребители с номинальным напряжением 220 В подключаются в сеть 380/220 В по схеме «звезда», а в сеть 220/127 В — по схеме «треугольник». В обоих случаях потребители находятся под номинальным фазным напряжением и получают расчетную мощность.

Контрольные вопросы и задания

1. Объясните что представляет собой трехфазная система электрических цепей.
2. Объясните как получают трехфазную ЭДС.
3. Перечислите преимущества трехфазной системы.
4. Укажите каким образом соединяются обмотки трехфазных генераторов и потребителей.
5. Укажите какие токи напряжения называются фазными.
6. Укажите какие токи напряжения называются линейными.
7. Укажите каково соотношение между фазными и линейными токами при соединении «звездой».
8. Укажите каково соотношение между фазными и линейными напряжениями при соединении «треугольником».
9. Укажите каково соотношение между фазными и линейными токами при соединении «треугольником».
10. Перечислите в каких случаях можно использовать трехпроводную систему при соединении приемников электроэнергии «звездой».
11. Объясните в чем заключается роль нейтрального провода.
12. Объясните как осуществляется расчет симметричной трехфазной цепи.
13. Объясните как осуществляется расчет несимметричной трехфазной цепи.

Тема 1.8. Трансформаторы. Назначение и применение трансформаторов

Трансформатор - статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного напряжения одной величины в переменное напряжение другой величины одной и той же частоты.

Устройство и принцип действия однофазного трансформатора

Трансформатор содержит индуктивно связанные обмотки w_1, w_2 (рис. 1.70, а), размещенные на одном стальном сердечнике (магнитопроводе). Магнитопровод изготавливают из стальных листов толщиной 0,35-0,50 мм. Для изготовления магнитопровода применяют горяче- или холоднокатаную специальную электротехническую сталь. Стальные листы изолированы друг от друга бумажной, вой изоляцией или оканной что позволяет уменьшить потери мощности в магнитопроводе. Трансформатор может иметь несколько индуктивно связанных обмоток, имеющих разное количество витков. Обмотки обычно выполняют из изолированного медного круглого или прямоугольного провода.

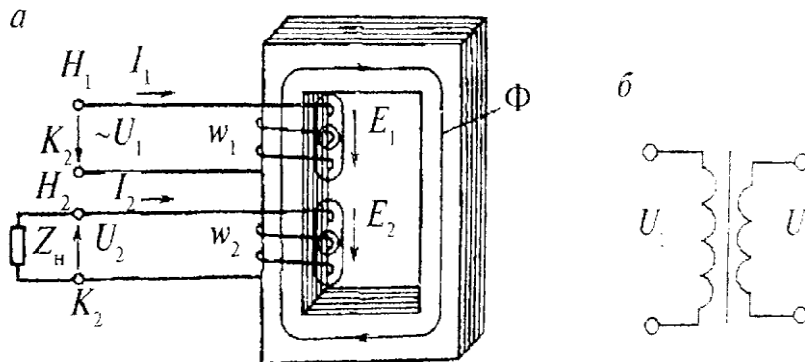


Рисунок 1.70 - упрощенная схема (а) и условное обозначение (б) трансформатора

На рисунке 1.70 приведено условное обозначение трансформатора в принципиальных электрических схемах. К одной из обмоток трансформатора подводится переменное напряжение U_1 от источника питания. Эта обмотка называется первичной, а вторая – вторичной.

Мгновенные значения ЭДС первичной и вторичной обмоток, как следует из явления электромагнитной индукции, имеют выражения

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

а их действующие значения (при синусоидальном изменении) соответственно равны:

$$E_1 = 4,44 w_1 f \Phi_m; \quad (1.183)$$

$$E_2 = 4,44 w_2 f \Phi_m. \quad (1.184)$$

Разделив значения ЭДС первичной цепи на соответствующее значение ЭДС вторичной цепи, получим

$$e_1/e_2 = E_1/E_2 = w_1/w_2 = k$$

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

Режим холостого хода трансформатора - это режим, при котором вторичная обмотка трансформатора разомкнута (рис. 1.71).

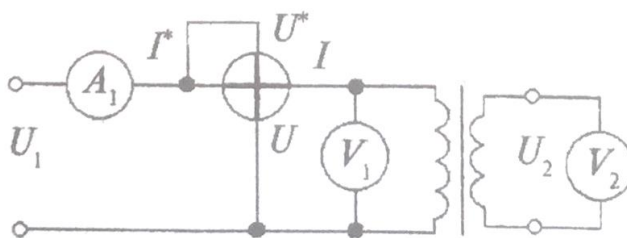


Рисунок 1.71 - Схема трансформатора в режиме холостого хода

В режиме холостого хода напряжение вторичной на выводах обмотки равно ее ЭДС: $U_2 = E_2$, а напряжение источника почти полностью уравновешивается ЭДС первичной обмотки: $U_1 = E_1$, следовательно, можно записать

$$E_1/E_2 = U_1/U_2 = k$$

Таким образом, коэффициент трансформации может быть определен по результатам измерений напряжения U_1 на входе и U_2 на выходе трансформатора в режиме холостого хода.

Так как вторичная обмотка трансформатора в режиме холостого хода разомкнута, то ток вторичной обмотки равен 0. При подключении первичной обмотки к источнику переменного напряжения в ней будет протекать ток холостого хода I_0 . Последний создает магнитный поток в магнитопроводе трансформатора. Для возбуждения магнитного потока трансформатор потребляет от источника реактивную мощность. Активная мощность, потребляемая трансформатором в режиме холостого хода, расходуется на компенсацию потерь мощности в магнитопроводе (потерь в стали). Причиной потерь в стали является систематическое перемагничивание магнитопровода переменным магнитным полем. Мощность магнитных потерь определяют при испытании трансформатора в режиме холостого хода. Для этого в цепь первичной обмотки трансформатора подключают амперметр, вольтметр и ваттметр. Так как нагрузка в цепи вторичной обмотки трансформатора отсутствует, то потери мощности на нагрев проводов обмоток (электрические потери) $P=0$ и показание ваттметра в этом случае соответствует мощности потерь в стали $P_{ст}$. При работе трансформатора под нагрузкой его вторичная обмотка замкнута на сопротивление Z_n и по ней проходит ток создающий ее магнитный поток Φ_2 . Магнитный поток первичной обмотки Φ_1 создается током I_1 , который определяется напряжением U_1 . Так как ток I_2 создается ЭДС E_2 , которая направлена противоположно напряжению U_1 (правило Ленца), то и магнитный поток Φ_2 направлен противоположно направлению магнитного потока Φ_1 . Уменьшение магнитного потока первичной обмотки ведет к уменьшению ее реактивного сопротивления и увеличению тока I_1 , следовательно, при постоянном напряжении сети U_1 ток в первичной обмотке I_1 возрастает до значения, обеспечивающего восстановление основного магнитного потока Φ до первоначальной величины. Таким образом, несмотря на отсутствие электрической связи между первичной и вторичной обмотками, изменение тока I_2 во вторичной обмотке под воздействием магнитной связи

между обмотками вызывает соответствующее изменение тока I_1 в первичной обмотке. Основной магнитный поток как при холостом ходе, так и при нагрузке трансформатора остается неизменным и равным векторной сумме потоков первичной (Φ_1) и вторичной (Φ_2) обмоток:

$$\bar{\Phi} = \bar{\Phi}_1 + \bar{\Phi}_2.$$

С повышением нагрузки трансформатора увеличиваются токи I_1 и I_2 , а значит, растет и мощность, поступающая из сети. При снижении нагрузки уменьшается вторичный ток I_2 , следовательно, и первичный ток I_1 тоже должен уменьшиться.

В силовых трансформаторах потери энергии составляют не более 3-5%, поэтому можно полагать, что

$$S_1 = S_2$$

где - $S_1 = U_1/I_1$ - мощность, потребляемая из сети;

$S_2 = U_2/I_2$ - мощность, потребляемая нагрузкой.

Получим

$$U_1/I_1 = U_2/I_2$$

Откуда

$$U_1/U_2 = I_1/I_2 = k,$$

т.е. токи в обмотках трансформатора при нагрузочном режиме работы обратно пропорциональны напряжениям на обмотках, а отношение тока вторичной обмотки к току первичной обмотки приближенно равно коэффициенту трансформации k .

Потери энергии и КПД трансформатора

Общая мощность потерь в трансформаторе состоит из мощности потерь в стали $P_{ст}$ и мощности электрических потерь $P_э$ и определяет КПД трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P},$$

Мощность электрических потерь расходуется на нагрев обмоток проходящими по ним токами и определяется по результатам опыта короткого замыкания. Для проведения опыта короткого замыкания вторичная обмотка трансформатора замыкается накоротко (рис. 1.72, а), а величину напряжения первичной обмотки задают такой, чтобы по первичной обмотке проходил ток, значение которого равно току при номинальной нагрузке трансформатора.

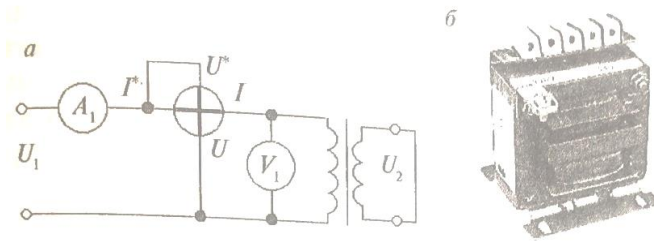


Рисунок 1.72 - Схема в режиме короткого замыкания (а) и общий вид (б) однофазного трансформатора

Для проведения опыта короткого замыкания требуется незначительное напряжение, составляющее $(0,05-0,10) U_{1\text{ном}}$, поэтому магнитный поток и, следовательно, потери в стали невелики. Тогда показание ваттметра равно номинальной мощности электрических потерь. Значение КПД трансформатора зависит от его нагрузки. Наибольшего КПД трансформатор достигает при нагрузке $(0,5-0,7) S_{\text{ном}}$, что соответствует средней эксплуатационной нагрузке трансформатора. КПД трансформатора зависит также от коэффициента мощности $\cos\varphi_2$ нагрузки. У современных трансформаторов КПД достигает 95,0-99,5%.

Трехфазный трансформатор

Передача и распределение электрической энергии осуществляются в трехфазной системе, поэтому большинство трансформаторов являются трехфазными. Магнитопровод трехфазного трансформатора имеет три стержня, на каждом из которых размещаются две обмотки одной фазы (рис. 1.73).

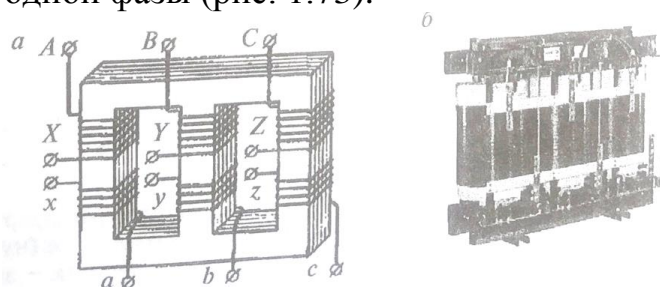


Рисунок 1.73 - Трехфазный трансформатор:
а – упрощенная схема устройства, б – внешний вид

Обмотки трехфазного трансформатора расположены на стержнях так же, как и в однофазном трансформаторе, т. е. обмотки низшего напряжения размещаются ближе к стержню, а обмотки высшего напряжения на обмотках низшего напряжения. На рисунке 1.73 обмотки высшего и низшего напряжения для наглядности расположены одна над другой. Начала обмоток трехфазного трансформатора обозначают:

- ✓ для обмоток высшего напряжения - буквами А, В, С
- ✓ для обмоток низшего напряжения - буквами а, б, с

Концы обмоток трехфазного трансформатора обозначают:

- ✓ для обмоток высшего напряжения - буквами X, Y, Z.
- ✓ для обмоток низшего напряжения - буквами x, y, z.

Принцип работы и электромагнитные процессы в трех однофазном трансформаторах абсолютно одинаковы. Особенностью трехфазного трансформатора является

наличие электрического соединения между обмотками разных фаз. Обмотки трехфазного трансформатора могут быть соединены «звездой» и «треугольником». При этом первичная и вторичная обмотки могут иметь как одинаковую, так и различную схему соединения. На рисунке 1.74 представлены различные варианты схем соединения первичной и вторичной обмоток трехфазного трансформатора

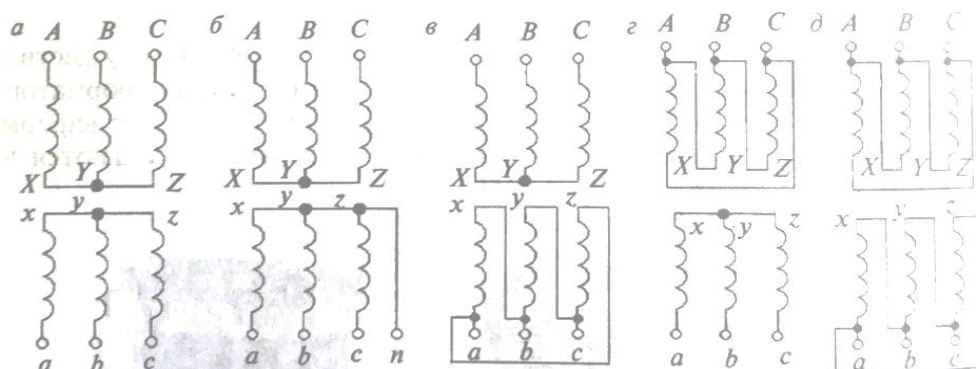


Рисунок 1.74 - Схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора:
 а - «звезда - звезда»; б - «звезда - звезда с нейтральным (нулевым) проводом»;
 в - «звезда -треугольник»;

В стандартных схемах обмотки высшего напряжения соединены «звездой» (рис. 1.74, а-в), так как при такой схеме фазное напряжение $\sqrt{3}$ раз меньше линейного, благодаря чему упрощается изоляция обмоток. Обмотки низшего напряжения чаще соединяются «треугольником» (см. рис. 1.74, в,д), так как при таком соединении трансформатор менее чувствителен к несимметричности фаз приемника. Обмотки низшего напряжения соединяются фаз Также «звездой с нейтральным проводом» (рис. 1.74, б), так как при такой схеме можно в четырехпроводной сети получить два раз личных напряжения линейное и фазное.

Контрольные вопросы и задания

1. Поясните назначение трансформатора.
2. Объясните как устроен трансформатор и как он работает.
3. Для чего используется режим холостого хода.
4. Объясните как определяется КПД трансформатора.
5. Поясните устройство трехфазного трансформатора.
6. Какими способами могут соединяться обмотки трехфазного трансформатора.
7. Объясните для чего используется многообмоточный трансформатор.
8. Объясните для чего применяют автотрансформаторы. Поясните преимущества автотрансформатора по сравнению с обычным трансформатором такой же мощности.
9. Объясните для чего используются измерительные трансформаторы.
10. Поясните работу измерительного трансформатора напряжения.
11. Поясните работу измерительного трансформатора тока.
12. Расскажите о назначении и принципе работы сварочного трансформатора.

Тема 1.9 Электронные машины переменного тока

Общие сведения. Вращающееся магнитное поле

Электрические машины переменного тока предназначены для взаимного преобразования механической и электрической энергии и по аналогии с электрическими машинами постоянного тока разделяются на генераторы и двигатели.

Электрические машины переменного тока разделяются также на асинхронные и синхронные.

Для создания вращающегося магнитного поля с помощью трехфазной системы токов нужны три катушки, сдвинутые в пространстве на 120° одна относительно другой.

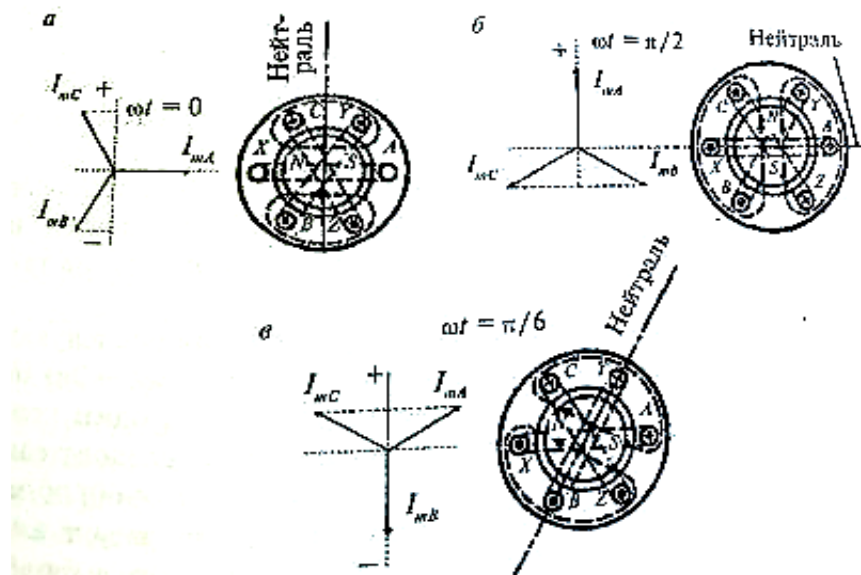


Рисунок 1.75 - Получение вращающегося магнитного поля

Величину и направление мгновенных токов указывают векторные диаграммы, которые соответствуют уравнениям симметричной системы токов:

$$\begin{aligned}i_a &= I_m \sin \omega t, \\i_b &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\i_c &= I_m \sin(\omega t + 120^\circ).\end{aligned}$$

При $\omega t = 0$ ток $i_a = 0$, ток i_b имеет отрицательное, а ток i_c – положительное значение. После разметки направлений токов вся система проводников разделяется на две части: в одной из них направление тока отмечено крестиком, а в другом – точкой. По правилу буравчика определяются направления магнитной индукции поля каждой катушки и результирующего поля, которое изображено двумя замкнутыми (штриховыми) линиями.

Для момента времени, соответствующего фазовому углу $\omega t = \pi/2$, такие же построения приведены на рисунке 1.75, б с учетом того, что ток i_a имеет положительное значение, а токи i_b и i_c – отрицательное. Система проводников также разделяется на две равные части с одинаковым направлением тока в каждом из них. Результирующее магнитное поле направлено по чертежу вверх.

После выполнения аналогичных построений для последующих моментов времени (например, при $\omega t = \pi$; $\omega t = 3\pi/2$; $\omega t = 2\pi$) можно убедиться в том, что ось магнитных полюсов за один период переменного тока поворачивается на один оборот, следовательно, частота вращения магнитного поля $n_1 = f$ об/с или $n_1 = 60f$ об/мин, если трехфазная обмотка имеет по одной катушке на фазу, т.е. число пар полюсов $p = 1$. Обмотку каждой фазы можно выполнить из двух катушек с расстоянием между активными сторонами, равными 0,25 окружности статора (рис. 1.76).

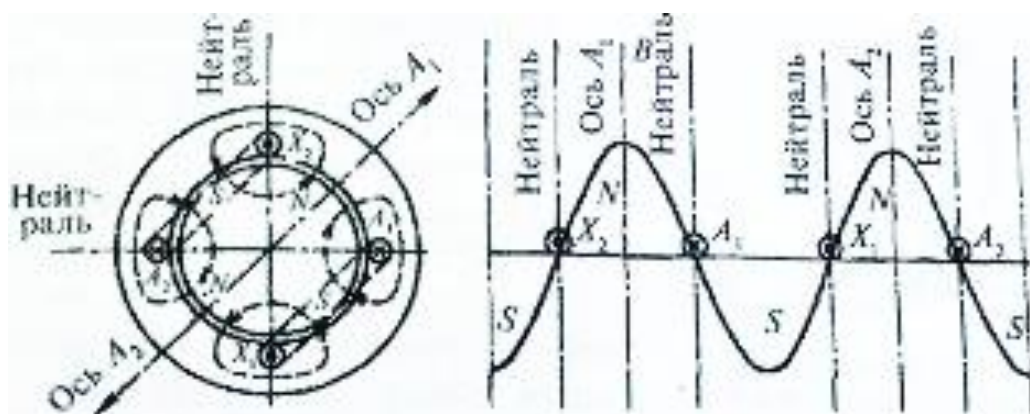


Рисунок 1.76 – Получение вращающегося магнитного поля при двух катушках на фазу

При этом все относящееся к одной паре полюсов на полной окружности нужно отнести к одной паре полюсов на половине длины окружности статора, т.е. при $p = 2$ частота вращения магнитного поля $n_1 = 60f / p$ об/мин, а в общем случае при любом числе пар полюсов

$$n_1 = 60f / p$$

Частота вращения магнитного поля прямо пропорциональна частоте переменного тока источника электроэнергии и обратно пропорциональна числу пар полюсов.

В момент, когда ток в фазе достигает амплитуды I_m , ось полюсов результирующего магнитного поля совпадает с осью полюсов данной фазы. На основании этого определяют направление вращения магнитного поля. При прямой последовательности максимумы токов в фазах наступают в порядке А-В-С. Если на статоре обмотки фаз расположены таким образом, что обход их в указанном порядке совершается по ходу часовой стрелки, то и поле вращается в ту же сторону.

Принцип действия трехфазного асинхронного электродвигателя

Принцип действия асинхронного двигателя основан на использовании вращающегося магнитного поля и основных законов электротехники.

При включении электродвигателя в сеть трехфазного тока в статоре образуется вращающееся магнитное поле, силовые линии которого пересекают стержни или катушки обмотки ротора. При этом, согласно закону электромагнитной индукции, в обмотке ротора индуцируется ЭДС, пропорциональная частоте пересечения силовых линий. Под действием индуцированной ЭДС в короткозамкнутом роторе возникают значительные токи.

В соответствии с законом Ампера на проводники с током, находящиеся в магнитном поле, действуют механические силы, которые по принципу Ленца стремятся устранить причину, вызывающую индуцированный ток, т.е. пересечение стержней обмотки ротора силовыми линиями вращающегося поля. Таким образом, возникшие механические силы будут раскручивать ротор в направлении вращения поля, уменьшая скорость пересечения стержней обмотки ротора магнитными силовыми линиями.

Достичь частоты вращения поля в реальных условиях ротор не может, так как тогда стержни его обмотки оказались бы неподвижными относительно магнитных силовых линий и в обмотке ротора исчезли бы индуцированные токи. Поэтому ротор вращается с частотой, меньшей частоты вращения поля, т.е. *асинхронно*.

Если силы, тормозящие вращение ротора, невелики, то ротор достигает частоты, близкой к частоте вращения поля. При увеличении механической нагрузки на валу двигателя частота вращения ротора уменьшается, тока в обмотке ротора возрастают, что приводит к увеличению вращающего момента электродвигателя. При некоторой частоте вращения ротора устанавливается равновесие между тормозными и вращающимися моментами.

Для подключения трехфазного асинхронного электродвигателя к питающей сети необходимо статорные обмотки соединить «звездой» или «треугольником» в зависимости от величины линейного напряжения трехфазной сети. Линейное напряжение трехфазной сети, как правило, известно. В паспортных данных электродвигателей напряжение указывается в виде дроби, например 220/380, в числителе которой указывается номинальное напряжение фазных обмоток электродвигателя, а в знаменателе – линейное напряжение трехфазной сети, к которой можно подключить данный электродвигатель.

Если линейное напряжение сети равно 380 В, то соединять фазные обмотки статора можно только «звездой», так как при соединении обмоток «треугольником» они окажутся под линейным напряжением 380 В вместо 220 В и могут перегореть, точнее, обязательно перегорят за очень малый промежуток времени.

Если линейное напряжение трехфазной сети равно 220 В, то для нормальной работы электродвигателя фазные обмотки статора нужно соединить «звездой».

Для удобства подключения начала и концы фазных обмоток статора выведены на колодку, содержащую шесть клемм и три переключки (рис. 1.77).

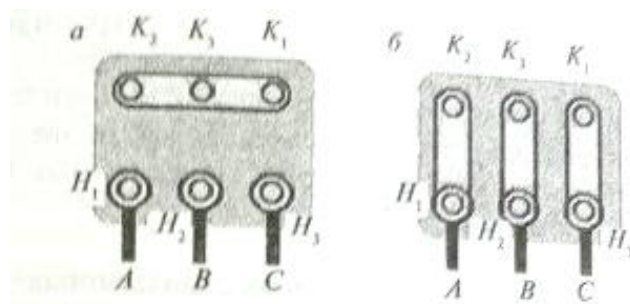


Рисунок 1.77 - Способы соединения фазных обмоток статора трехфазного асинхронного электродвигателя: *а* – «звездой»; *б* – «треугольником»

Скольжение

Скольжением называется разность между частотой вращения вращающегося магнитного поля статора n_1 и частотой вращения ротора n_2 .

Скольжение обычно выражают в долях единицы или в процентах от частоты вращения магнитного поля статора:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \text{ или } \frac{n_1 - n_2}{n_2} \cdot 100 \% .$$

Скольжение зависит от нагрузки двигателя. При номинальной нагрузке его значение составляет около 0,05 у машин небольшой мощности и около 0,02 у мощных машин.

Скольжение является одной из важнейших характеристик электродвигателя: посредством него выражаются ЭДС и ток ротора, вращающий момент, частота вращения ротора.

При неподвижном ($n_2 = 0$) роторе $s = 1$. Таким скольжением обладает электродвигатель в момент пуска.

Как отмечалось, скольжение зависит от момента нагрузки на валу электродвигателя, следовательно, и частота вращения ротора n_2 зависит от тормозного момента на валу. Номинальное значение частоты вращения ротора n_2 , соответствующее расчетным значениям нагрузки, частоты и напряжения сети, указывается на заводском щитке асинхронного двигателя и приводится в справочниках по электродвигателям.

Асинхронные машины, как и другие электрические машины, обратимы. При $0 < s \leq 1$ машина работает в режиме двигателя, частота вращения ротора меньше или равна частоте вращения магнитного поля статора, однако если внешним двигателем раскрутить ротор до частоты вращения, превышающей синхронную частоту, то машина перейдет в режим работы генератора переменного тока. При этом скольжение станет отрицательным, а механическая энергия приводного двигателя будет превращаться в электрическую энергию переменного тока. На практике асинхронные генераторы переменного тока применения не находят.

Рабочие характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя

Под рабочими характеристиками асинхронного электродвигателя понимают зависимости от полезной мощности P_2 на валу:

- частоты вращения ротора $n_2 = f(P_2)$ (скоростная характеристика);
- скольжения $s = f(P_2)$;
- вращающего момента $M = f(P_2)$ (моментная характеристика);
- коэффициента мощности $\cos \varphi = f(P_2)$;
- КПД $\eta = f(P_2)$;
- тока статора $I_1 = f(P_2)$.

Зависимости $n_2 = f(P_2)$ и $s = f(P_2)$ называются скоростными характеристиками. При холостом ходе ($P_2 = 0$) частота вращения ротора n_2 близка к частоте вращения магнитного поля статора n_1 . При этом $s \approx 0$. С увеличением нагрузки частота вращения ротора n_2 уменьшается, скольжение s соответственно возрастает. Для обеспечения должного КПД это отношение ограничивается узкими пределами. Обычно при $P_2 = P_n$ скольжение $s = 1,54 - 5 \%$. Соответственно зависимость $n_2 = f(P_2)$ представляет слабо наклоненную к оси абсцисс кривую.

Так как скорость вращения электродвигателя в рабочем диапазоне нагрузок изменяется незначительно, то зависимость $M = f(P_2)$ (моментная характеристика) оказывается весьма близкой к линейной (рис. 1.78).

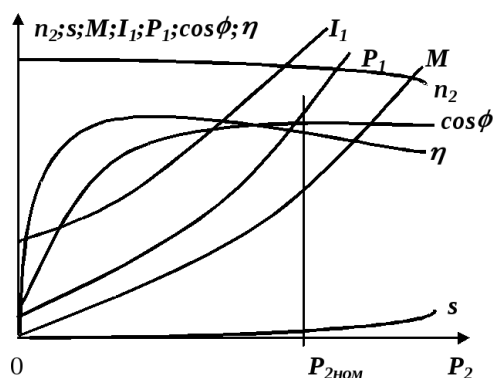


Рисунок 1.78 - Рабочие характеристики асинхронного электродвигателя

Поскольку магнитная цепь электродвигателя имеет воздушный зазор, ток статора содержит сравнительно большую намагничивающую составляющую, в основном реактивную. Это влияет на коэффициент мощности, поэтому $\cos \varphi = 0,8 - 0,9$ имеет при номинальной нагрузке. С уменьшением нагрузки $\cos \varphi$ убывает, достигая при холостом ходе значений $0,15 - 0,2$. Недогруженный асинхронный двигатель имеет низкий коэффициент мощности, что является его существенным недостатком. Объясняется это тем, что реактивная составляющая тока статора почти не зависит от нагрузки. При перегрузке $\cos \varphi$ также снижается вследствие увеличения частоты тока и индуктивного сопротивления ротора. При прочих равных условиях электродвигатели, рассчитанные на меньшую номинальную частоту вращения, имеют более низкие значения коэффициента мощности.

КПД асинхронного двигателя η имеет максимальное значение при номинальной или близкой к ней нагрузке ($P_2 = P_n$). При этом он достаточно высок. У мощных двигателей его максимум достигает $0,9 - 0,97$, для двигателей небольших мощностей обычно его величина составляет $0,7 - 0,8$. При нагрузках $P_2 = (0,25 - 1,25) P_n$ изменения КПД незначительны. Это означает, что в довольно большом диапазоне нагрузки двигатель работает экономично с КПД, близким к максимальному.

Ток статора I_1 состоит из значительной намагничивающей составляющей I_0 , которая почти не зависит от нагрузки, и приведенного тока ротора - I'_2 , уравнивающего нагрузку ротора. За счет намагничивающей составляющей I_0 асинхронный электродвигатель при отсутствии нагрузки потребляет сравнительно большой ток холостого хода $I_{х.х}$ (может быть более 50 % номинального). С ростом нагрузки статора возрастает.

К рабочим относится так же механическая характеристика, выражающая зависимости между частотой вращения и электромагнитным моментом $n_2 = f(M)$ либо между электромагнитным моментом и скольжением $M = f(s)$. Механическая характеристика применяется при выборе асинхронного электродвигателя для конкретной установки, определения участка, на котором сохраняется устойчивая работа электродвигателя, перегрузочной способности и др.

На практике для построения механической характеристики используют упрощенную формулу Клосса

$$M = \frac{2M_k}{s_k / s + s / s_k},$$

где $M_k = M_H$ – критический (максимальный) момент;

$s_k = s_H(\lambda + \sqrt{\lambda - 1})$ – критическое скольжение;

λ – перегрузочная способность (обычно $\lambda = 2 - 3$).

По этой формуле можно построить механическую характеристику любого асинхронного электродвигателя, паспортные параметры которого, в том числе и перегрузочная способность λ , приведены в справочниках или известны из таблички, прикрепленной на электродвигателе. При $s = 0$ и $s = \infty$ вращающий момент исчезает.

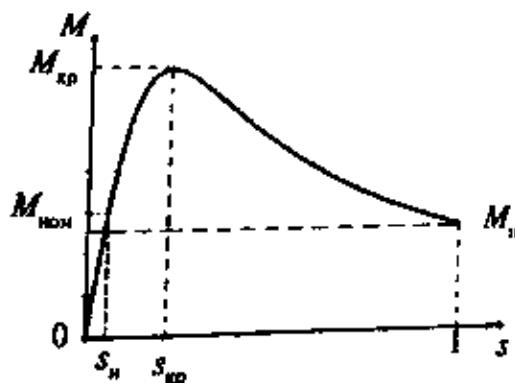


Рисунок 1.79 - Зависимость $M = f(s)$

Задавая различные значения скольжения, можно построить график зависимости $M = f(s)$ (рис. 1.79). На графике выделены три характерных значения момента: номинальный вращающий момент M_H , критический (максимальный) момент $M_{кр}$ и пусковой момент $M_п$.

Устойчивая работа электродвигателя возможна только на участке $0-s_{кр}$. Если предположить, что на данном участке вращающий момент будет равен тормозному моменту, то при случайном нарушении равновесия моментов оно восстанавливается. При работе электродвигателя на нисходящем участке от $s_{кр}$ до 1 такое восстановление не происходит.

Допустим, что вращающий момент электродвигателя по какой-то причине уменьшился, тогда скольжение начнет увеличиваться. Если равновесие моментов было нарушено на восходящем участке от 0 до от $s_{кр}$, то повышение скольжения вызовет увеличение момента и равновесие моментов будет восстановлено. Если равновесие моментов было нарушено на нисходящем участке от $s_{кр}$ до 1, то увеличение скольжения вызовет уменьшение вращающего момента. В этом случае вращающий момент всегда будет оставаться меньше тормозного, следовательно, частота вращения ротора будет непрерывно уменьшаться до полной остановки электродвигателя.

Если к валу электродвигателя приложить тормозной момент, значение которого превышает значение критического момента, то равновесие моментов не восстановится. Ротор электродвигателя остановится независимо от того, на каком участке было нарушено равновесие моментов.

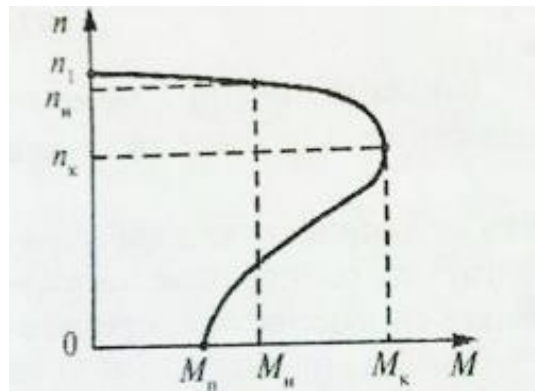


Рисунок 1.80 - Механическая характеристика $n_2 = f(M)$

По рассчитанным значениям вращающего момента можно построить еще одну механическую характеристику $n_2 = f(M)$, график которой представлен на рисунке 1.80. Значения частоты вращения ротора можно рассчитать по формуле

$$n_2 = \frac{9550P_H}{M},$$

где P_H задано в киловаттах. Если P_H задано в ваттах, то переводной коэффициент будет равен 9,55.

Регулирование частоты вращения и реверсирование асинхронного электродвигателя

Для определения скольжения можно получить выражение для определения частоты вращения ротора асинхронного электродвигателя:

$$\begin{aligned} n_2 &= n_1(1 - s) \\ n_2 &= \frac{60f}{p}(1 - s). \end{aligned}$$

Таким образом, при заданном моменте нагрузки частоту вращения ротора n_2 можно изменять путем изменения частоты f питающей сети, числа пар полюсов p и скольжения s .

Регулирование частоты напряжения питающей сети для изменения частоты вращения ротора предполагает эксплуатацию автономного источника питания, так как каждый потребитель электрической энергии получает из сети переменное напряжение с частотой 50 Гц. Данный метод регулирования частоты вращения ротора асинхронного двигателя основан на изменении частоты питающего напряжения, при неизменном числе пар полюсов p позволяет изменять частоту вращения n_1 магнитного поля статора.

Различного рода полупроводниковые частотные преобразователи электрической энергии обеспечивают плавное регулирование частоты вращения ротора в широком диапазоне.

Для получения высоких энергетических показателей асинхронных двигателей (коэффициентов мощности, полезного действия, перегрузочной способности)

необходимо одновременно с частотой изменять и напряжение на статоре. При постоянном моменте торможения напряжение на статоре должно регулироваться пропорционально частоте.

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя изменением напряжения, подводимого к обмотке статора позволяет регулировать скорость с помощью относительно простых технических средств и схем управления. Для этого между сетью переменного тока со стандартным напряжением $U_{\text{ном}}$ и статором электродвигателя включается регулятор напряжения.

При данном способе регулирования частоты вращения асинхронного двигателя критический момент $M_{\text{кр}}$ асинхронного двигателя изменяется пропорционально квадрату подводимого к двигателю напряжения (рис. 1.81). Скольжение от величины регулируемого напряжения не зависит.

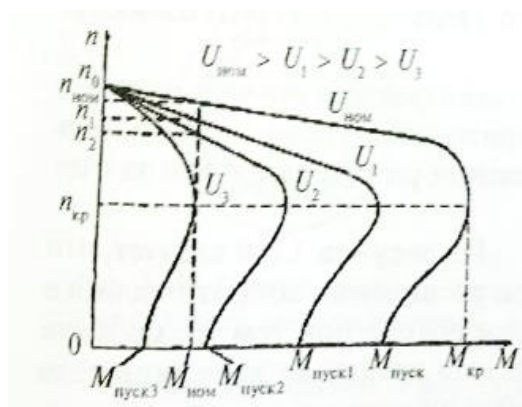


Рисунок 1.81 - Механические характеристики асинхронного электродвигателя при изменении подводимого к обмоткам статора напряжения

Если момент торможения больше пускового момента асинхронного электродвигателя, то ротор двигателя вращаться не будет, поэтому необходимо запустить его при номинальном напряжении $U_{\text{ном}}$ или на холостом ходу.

Регулировать частоту вращения короткозамкнутых асинхронных двигателей таким способом можно только при вентиляторном характере нагрузки. Кроме того, должны использоваться специальные электродвигатели с повышенным скольжением. Диапазон регулирования небольшой – до $n_{\text{кр}}$. Для изменения напряжения применяют трехфазные автотрансформаторы и тиристорные регуляторы напряжения.

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя переключением числа пар полюсов можно осуществить, используя специальные многоскоростные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.

При изменении числа пар полюсов p получаются механические характеристики с разной частотой вращения n_1 магнитного поля статора. Так как значение p определяется целыми числами, то переход от одной характеристики к другой в процессе регулирования носит ступенчатый характер.

Существует два способа изменения числа пар полюсов. В первом случае в пазы статора укладывают две обмотки с разным числом полюсов. При изменении скорости к сети подключается одна из обмоток. Во втором случае обмотку каждой фазы составляют из двух частей, которые соединяются параллельно или последовательно. При этом число пар полюсов изменяется в 2 раза.

Регулирование скорости путем изменения числа пар полюсов экономично, а механические характеристики сохраняют жесткость. Недостатком этого способа является ступенчатый характер изменения частоты вращения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя путем введения резисторов в цепь ротора приводит к увеличению потерь мощности и снижению частоты вращения ротора двигателя за счет увеличения скольжения.

Из рисунка 1.82 следует, что при увеличении сопротивления в цепи ротора при том же моменте частота вращения вала двигателя уменьшается.

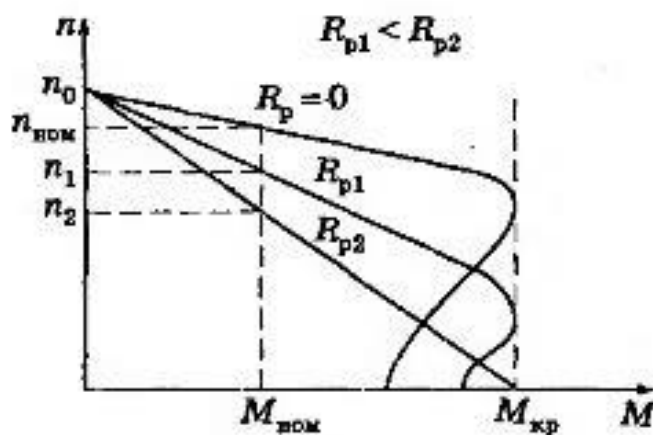


Рисунок 1.82 - Механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором при различных сопротивлениях включенных в цепь ротора резисторов

Недостатком этого способа являются значительные потери энергии, которые пропорциональны скольжению. Такое регулирование возможно только для двигателя с фазным ротором.

Регулирование асинхронных электродвигателей. Ротор асинхронного электродвигателя вращается в ту же сторону, что и магнитное поле статора, следовательно, чтобы изменить направление вращения ротора, необходимо изменить направление вращения магнитного поля статора. Для этого достаточно изменить чередование фаз напряжения питающей сети, поменяв местами любые два линейных провода на щитке электродвигателя или источника питания.

Однофазные асинхронный электродвигатель

Общий вид однофазного асинхронного электродвигателя представлен на рисунке 1.83.

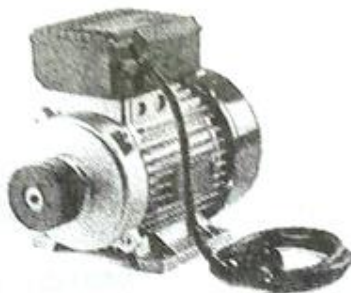


Рисунок 1.83 - Общий вид однофазного электродвигателя

На статоре однофазного двигателя размещается одна обмотка. Статорная обмотка (рис. 1.84) однофазного двигателя занимает $2/3$ окружности статора.



Рисунок 1.84 - Статор однофазного синхронного электродвигателя

Ротор однофазного асинхронного двигателя может иметь фазную или короткозамкнутую обмотку.

При прохождении по статорной обмотке переменного синусоидального тока образуется неподвижное пульсирующее магнитное поле. При этом формируются два момента вращения, направленные в противоположные стороны: одна часть статорной обмотки тянет ротор в одну сторону, а другая – в противоположную. В этом заключается особенность однофазного асинхронного электродвигателя – отсутствие начального пускового момента. В результате взаимодействия двух магнитных потоков, уравновешивающих друг друга, ротор вращаться не будет. Для запуска необходим начальный момент, который повернет ротор в какую-либо сторону, сообщить который может источник механической энергии. Однако обычно пуск двигателя осуществляют с помощью дополнительной обмотки, которая также находится на статоре и называется *пусковой* обмоткой. Она подключается к той же фазе, что и рабочая, но через фазосдвигающую цепь. В качестве такой цепи может выступать резистор, катушка индуктивности или конденсатор (рис. 1.85).

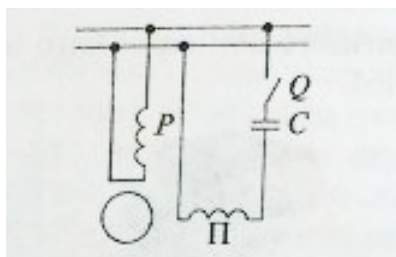


Рисунок 1.85 - Подключение конденсатора для формирования фазосдвигающей цепи

При подключении пусковой обмотки к питающей сети через конденсатор ток в пусковой обмотке и магнитное поле сдвигаются на 90° . Угол смещения тока, а следовательно, и пусковой момент можно регулировать путем подбора величины емкости конденсатора.

В момент пуска фазосдвигающая цепь подключается к пусковой обмотке, тем самым обеспечивая вращающееся магнитное поле, в результате чего ротор начинает вращаться. Пусковая обмотка подключается к питающей сети на короткое время – обычно около 3 с. За это время ротор выходит почти на полную скорость вращения, необходимость в пусковой обмотке отпадает и пусковая емкость отключается от обмотки. Поскольку время работы пусковой обмотки невелико, ее, как правило, выполняют проводом меньшего сечения и с меньшим количеством витков. Иногда пусковую

обмотку выполняют тем же проводом, что и рабочую, и тогда при использовании фазосдвигающей цепи можно улучшить механические характеристики двигателя. В этом случае параллельно пусковому конденсатору $C_{п}$ включается рабочий конденсатор $C_{р}$ (рис. 1.86).

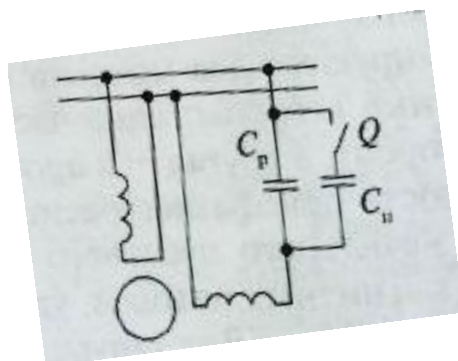


Рисунок 1.86 - Использование второй обмотки в качестве рабочей

Емкость рабочего конденсатора меньше емкости пускового, следовательно, этот конденсатор обладает большим сопротивлением, а ток, протекающий во второй обмотке, будет меньше пускового.

После отключения пусковой емкости, дающей пусковой момент вращения, рабочая емкость остается, обеспечивая вращающееся магнитное поле и во время работы.

Недостатки однофазного асинхронного двигателя:

- не обладает пусковым моментом, поэтому необходимо применять какие-либо меры по его пуску;
- частота вращения ротора ниже по сравнению с трехфазным асинхронным электродвигателем, так как встречное магнитное поле, формируемое второй половиной обмотки, препятствует вращению ротора;
- КПД двигателя ниже по сравнению с трехфазным асинхронным электродвигателем. Для сравнения: мощность однофазного двигателя такого же габарита, как и трехфазный, на 1/3 меньше.

Синхронные электрические машины

Синхронный генератор. Ротор синхронных машин вращается синхронно с вращающимся магнитным полем. Поскольку частоты вращения ротора и магнитного поля одинаковы, в обмотке ротора не индуцируются токи. Поэтому обмотка ротора получает питание от источника постоянного тока.

Устройство статора синхронной машины (рис. 1.87) практически не отличается от устройства статора асинхронной машины.

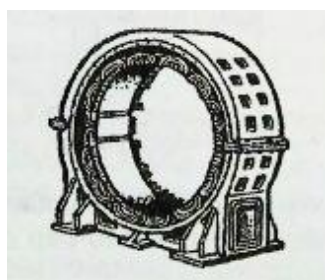


Рисунок 1.87 - Общий вид статора синхронного генератора

В пазы статора укладывают обмотку, концы которой выводят на клеммовую панель. Ротор в некоторых случаях изготавливают в виде постоянного магнита.

Роторы синхронных генераторов могут быть явно- и неявно полюсными (рис. 1.88). В первом случае синхронные генераторы приводятся в действие тихоходными турбинами гидроэлектростанций, во втором – паровыми или газовыми турбинами тепловых электростанций.

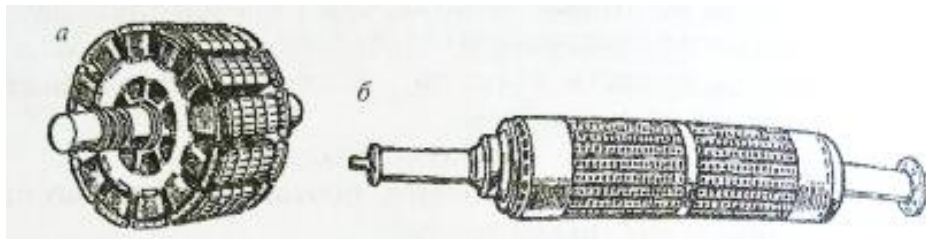


Рисунок 1.88 - Общий вид явнополюсного (а) и неявнополюсного (б) роторов синхронного генератора

Питание к обмотке ротора подводится через скользящие контакты, состоящие из медных колец и графитовых щеток. При вращении ротора его магнитное поле пересекает витки обмотки статора, индуцируя в них ЭДС. Для того чтобы получить синусоидальную форму ЭДС, зазор между поверхностью ротора и статором увеличивают от середины полюсного наконечника к его краям (рис. 1.89).

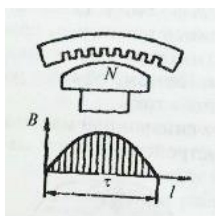


Рисунок 1.89 - Форма воздушного зазора и распределение магнитной индукции по поверхности ротора в синхронном генераторе

Частота индуцированной ЭДС (напряжения, тока) синхронного генератора $f = np/60$, где p – число пар полюсов ротора генератора.

Отношение $n/60$ выражает число оборотов ротора в 1 с; при $p = 1$ каждый оборот ротора соответствует полному циклу изменений индуцированного переменного тока (одному периоду); при увеличении числа пар полюсов соответственно увеличивается и число периодов тока, индуцируемого за один оборот ротора.

Как и у любого генератора, работающего по закону электромагнитной индукции, индуцированная ЭДС пропорциональна магнитному потоку машины и частоте вращения ротора.

Для возбуждения синхронных генераторов используют различные способы. Наиболее широко распространен синхронный генератор с машинным возбудителем. Последний представляет собой генератор постоянного тока, расположенный на одном валу с синхронным генератором. Машинный возбудитель приводится в действие от того же первичного двигателя, что и синхронный генератор. Выходные зажимы машинного возбудителя через щетки и кольца подсоединены к обмотке ротора синхронного генератора. Напряжение синхронного генератора регулируется реостатом в цепи

обмотки возбуждения возбудителя, что удобно и энергетически выгодно, так как в этой обмотке протекают сравнительно небольшие токи.

Применяются так же генераторы с самовозбуждением через выпрямители (механические или полупроводниковые).

Синхронный электродвигатель. Устройство статора синхронного двигателя аналогично устройству статора асинхронного двигателя. Ротор синхронного двигателя представляет собой электромагнит или постоянный магнит (рис. 1.90).

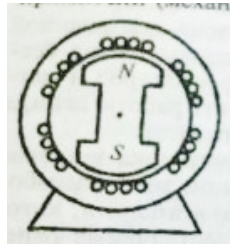


Рисунок 1.90 - Схема синхронного электродвигателя

Принцип работы синхронного двигателя поясняется на рисунке 1.91. Внутри магнита N_1S_1 помещен магнит NS. Если магнит N_1S_1 вращать, то он потянет за собой магнит NS. В стационарном режиме частоты вращения обоих магнитов одинаковы. К валу магнита NS можно приложить механическую нагрузку: чем больше эта нагрузка, тем больше угол отставания оси магнита NS от оси магнита N_1S_1 . При некоторой нагрузке силы притяжения между магнитами будут преодолены и ротор остановится.

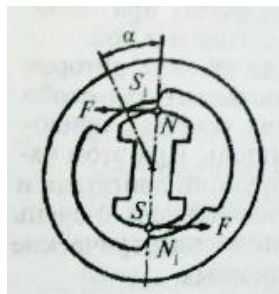


Рисунок 1.91 - Принцип работы синхронного электродвигателя

В реальном двигателе поле магнита N_1S_1 заменено вращающимся магнитным полем статора. При этом ротор либо вращается синхронно с магнитным полем статора, отставая на угол α , либо останавливается (выпадает из синхронизма) при перегрузке. Таким образом, независимо от нагрузки ротор всегда вращается с постоянной частотой, равной частоте вращения магнитного поля статора:

$$n_2 = n_1 = \frac{60f}{p}.$$

Постоянство частоты вращения – важное достоинство синхронного двигателя. Строгое постоянство частоты вращения требуется во многих областях техники, например при записи и воспроизведении звука. Недостаток синхронного двигателя – трудность пуска: нужно раскрутить ротор в сторону вращения поля статора. Для этого чаще всего применяют специальную короткозамкнутую обмотку, встроенную в ротор. В момент пуска двигатель работает как асинхронный. Когда частота вращения ротора

приближается к частоте вращения поля статора, ротор входит в синхронизм и двигатель работает как синхронный. Короткозамкнутая обмотка при этом оказывается обессточенной, так как частота вращения ротора равна частоте вращения поля статора и стержни обмотки ротора не пересекаются магнитными силовыми линиями.

Возможность использования бесколлекторных машин переменного тока, трансформаторов и магнитных усилителей позволяет повысить надежность работы цепи, также уменьшить габариты и массу машин и аппаратов.

При оборудовании объекта сетью переменного тока широкое применение находит электропривод на переменном токе. Разработаны схемы с асинхронными и синхронными двигателями, которые позволяют выполнить все операции, осуществляемые ранее двигателями постоянного тока.

Преимущества асинхронных двигателей наиболее заметны тогда, когда по условиям работы привода нет необходимости плавного регулирования частоты вращения в широких пределах при больших пусковых моментах (привод насосов, вентиляторов и др.).

Синхронные двигатели особенно удобны для привода роторов гироскопов. В тех случаях, когда гироскоп используют для особо точных измерений (например, в баллистических ракетах), приводом ротора гироскопа служит синхронный двигатель. При этом частота вращения ротора зависит только от конструкции двигателя и частоты питающего тока, которую можно стабилизировать с очень высокой степенью точности. Внешне синхронные электрические машины практически не отличаются от асинхронных.

Контрольные вопросы и задания

1. Укажите каково назначение электрических машин переменного тока.
2. Перечислите особенности асинхронных и синхронных электрических машин переменного тока.
3. Поясните как формируется вращающееся магнитное поле.
4. Поясните устройство статора трехфазных асинхронных электродвигателей.
5. Поясните устройство ротора трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.
6. Дайте понятие скольжению.
7. Объясните как осуществляется пуск однофазного асинхронного электродвигателя.
8. Перечислите недостатки однофазного асинхронного электродвигателя.
9. Объясните как осуществляется возбуждение синхронного генератора.

Тема 1.10 Электропривод и аппаратура управления

Общее понятие электропривода

Электроприводом называется электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенных для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением.

Структурная схема электропривода приведена на рисунке 1.92.

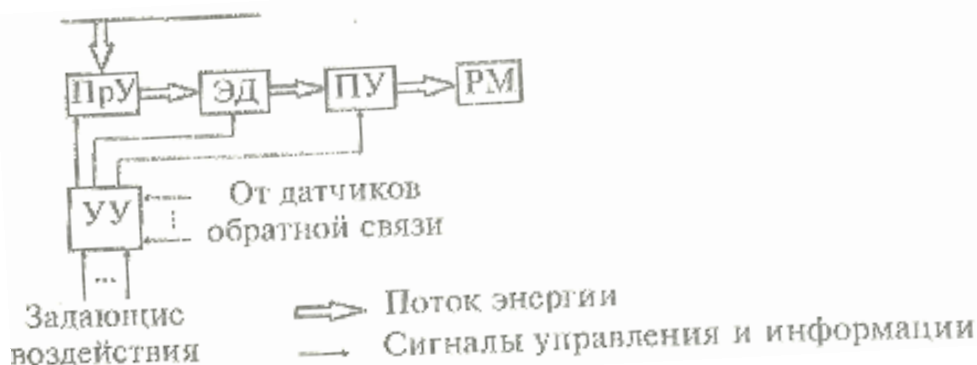


Рисунок 1.92 – Структурная схема электропривода

Преобразовательное устройство (ПрУ) преобразует напряжение источника энергии до характера и значения рабочих параметров электродвигателя (ЭД).

Передаточное устройство (ПУ) содержит механические передачи и соединительные муфты, посредством которых рабочая машина (РМ) приводится в движение.

Управляющее устройство (УУ) представляет собой информационную часть системы управления для обработки сигналов задающих воздействий, состояние системы по датчикам обратной связи и выработке их на основе сигналов управления преобразователем, электродвигателями и передаточным устройством.

Электроприводы разделяют на три группы: групповые, одиночные и многодвигательные.

В *групповых* электроприводах электродвигатель с помощью механической передачи (трансмиссии) приводит в действие несколько рабочих механизмов.

В *одиночных* электроприводах механизм приводится в действие индивидуальным электродвигателем. При этом все элементы работающего механизма соединяются с приводным двигателем соответствующими передачами.

В многодвигательных электроприводах каждый орган рабочего механизма снабжен своим двигателем. Так, например, на расточном станке вращение фрезы производится с помощью одного двигателя, продольное перемещение детали - с помощью другого, поперечное перемещение – с помощью третьего двигателя.

Режимы работы электродвигателей

Различают следующие режимы работы электродвигателя:

- **продолжительный режим**, т.е. режим работы такой длительности, при которой за время работы t двигателя мощностью P температура всех составляющих

электропривод устройств достигает установившегося значения (рис. 1.93, а). В качестве примеров механизмов с длительным режимом работы можно назвать центробежные насосы насосных станций, вентиляторы, компрессоры, конвейеры непрерывного транспорта, машина для отделки тканей и т.д.;

- **кратковременный режим**, т.е. такой режим при котором рабочий период относительно краток (рис. 1.93, б) и температура электродвигателя не успевает достигнуть установившегося значения. Перерыв же в работе исполнительного механизма достаточно велик, так что двигатель успевает охладиться практически до температуры окружающей среды. Такой режим характерен для самых различных механизмов кратковременного действия: шлюзов, разводных мостов, шасси самолетов и др.;

- **повторно-кратковременный режим** (рис. 1.93, в), т.е. такой режим, при котором период работы t_p чередуются с паузами t_{II} (остановка или холостой ход), причем ни в один из периодов работы температура двигателя не достигает установившегося значения, а во время снятия нагрузки двигатель не успевает охладиться до температуры окружающей среды. Характерной величиной для повторно-кратковременного режима является отношение рабочей части периода t_p ко всему периоду t_{II} . Эта величина именуется относительной продолжительностью работы или относительной продолжительностью включения. Примерами механизмов с повторно-кратковременным режимом работы могут служить краны, ряд металлургических станков, прокатные станы, буровые станки в нефтяной промышленности и т.д.

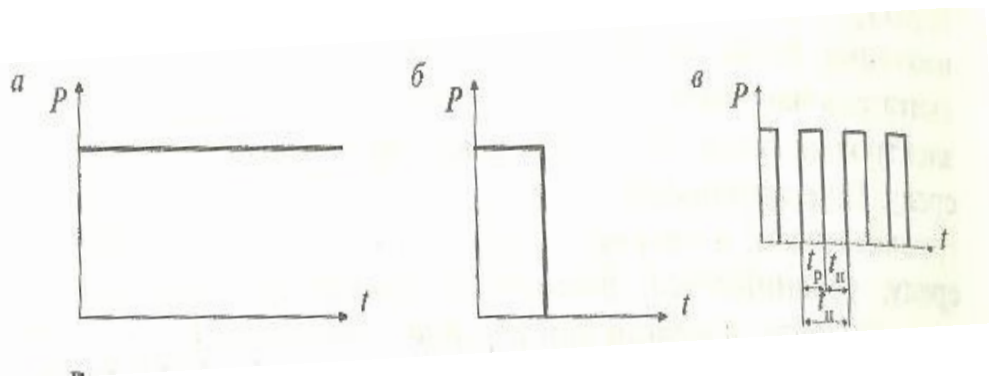


Рис. 1.93. Графики работы электропривода при длительном (а), кратковременном (б) и повторно-кратковременном (в) режимах

Аппаратура управления и защиты

Распределение энергии между приёмниками электрической энергии (двигателями, нагревательными, осветительными и другими электротехническими устройствами) и их электрическая защита осуществляются с помощью электрических аппаратов.

Основными функциями аппаратуры управления и защиты являются: включение и отключение приемников электроэнергии и электрических цепей; электрическая защита приемников электроэнергии и электрических цепей от перегрузки, коротких замыканий, понижения напряжения или самопуска; регулирование частоты вращения электродвигателей; реверсирование электродвигателей; электрическое торможение электродвигателей.

Аппараты, служащие только для пуска и остановки двигателей, называются **пусковыми**, а предназначенные также и для регулирования скорости — **пускорегулирующими**.

По назначению различают пусковые аппараты, осуществляющие: включение цепи под напряжением; включение цепи под нагрузкой; разрыв цепи под нагрузкой; разрыв цепи под напряжением, но не под нагрузкой (разъединяющий аппарат).

По режиму работы различают аппараты, предназначенные для продолжительной, кратковременной и повторно-кратковременной работы.

По исполнению аппараты разделяются: на открытые, не имеющие специальных приспособлений ни для предохранения от случайного прикосновения к токоведущим частям, ни для предотвращения попадания внутрь посторонних тел; защищенные, имеющие приспособления для предохранения от случайного прикосновения к токоведущим частям, а также для предотвращения попадания внутрь посторонних предметов; закрытые, у которых внутренняя полость отделена от внешней среды оболочкой, защищающей их внутренние части от проникновения пыли; маслонаполненные, которых все нормально искрящие части погружены в масло таким образом, чтобы исключить возможность соприкосновения между ними и окружающим воздухом, а неискрящие части заключены в закрытую непроницаемую оболочку; взрывозащищенные, имеющую одно из исполнений допущенных к применению во взрывоопасных помещениях всех или некоторых классов.

В зависимости от назначения аппараты можно разделить на две основные группы: коммутационные (разъединители, высоковольтные выключатели, контакторы и др.); защитные (различные реле, плавкие предохранители, автоматические воздушные выключатели).

По числу разрываемых контактов(полюсов) электрические аппараты подразделяются на одно-, двух-, трёхполюсные и с большим числом полюсов.

Разъединители являются простейшими выключателями высокого напряжения. Их назначение — отключение и переключение участков цепи под напряжением. Переключение участков цепи производится при отсутствии тока (для обеспечения безопасности осмотров и ремонтных работ, переключения подводящих и отводящих линий с одной системы шин(проводники) на другую и др.). У разъединителей есть неподвижные и подвижные контакты укрепленные на изоляторах.

Пакетные выключатели и переключатели служат в качестве пускателей электродвигателей малой мощности для переключения в цепях постоянного и переменного тока, в различных автоматических схемах для включения нагрузки и т. д. Их конструкции предусматривают возможность получения различных соединений в электрических схемах, например для регулирования тепловой мощности электрических жарочных шкафов.

Выключатели и переключатели применяют для размыкания и замыкания маломощных электрических цепей различного назначения постоянного и переменного тока. Они выполняются одно- и двухполюсными, защищенными (корпус из пластмассы) и герметическими (корпус из металла). По конструкции они разделяются на поворотные, перекидные и кнопочные. Для управления электротехническими установками чаще всего используют кнопочные выключатели с двумя кнопками: для включения и выключения. Такие кнопочные выключатели называют пускателями или командоаппаратами.

Контактор представляет собой электромагнитный выключатель дистанционного действия, срабатывающий при замыкании или размыкании цепи оперативного тока. Он применяется для управления приемниками электроэнергии достаточно большой мощности – крупными электродвигателями, нагревательными устройствами и т.п. Контактор управляется оперативным током вспомогательной цепи, причем это управление может выполняться простым нажимом кнопки в цепи оперативного тока (кнопочное управление).

Контактор переменного тока является составной частью магнитного пускателя, который предназначен для дистанционного управления двигателями и представляет собой управляющий комплект из контактора (нескольких контакторов), теплового реле и кнопок управления.

Электромагнитные реле по принципу действия аналогичны контакторам и в зависимости от применения разделяются на реле защиты и управления.

Реле защиты электротехнических устройств и сетей выполняются для защиты от обрыва цепи, превышения тока, а также превышения или снижения напряжения питания. Они рассчитаны на многократное использование, но из-за значительной тепловой инерции (низкая скорость срабатывания) не обеспечивают защиту от токов короткого замыкания. Последнее может произойти при случайном соединении неизолированных токоведущих элементов сети (например, соединение двух проводов воздушной линии) или при повреждении изоляции. При этом резко увеличиваются ток и его тепловое воздействие на изоляцию, падает напряжение в сети (снижается частота вращения валов электродвигателей вплоть до полной остановки). От таких перегрузок провода электрических линий и электротехнические устройства защищают путем отключения аварийных участков за счет использования теплового действия токов короткого замыкания.

Предохранители с плавкой вставкой – простейшие приборы защиты, которые подразделяются на пробочные и трубчатые. Основной частью таких предохранителей является плавкая вставка – металлическая проволока с высоким удельным сопротивлением (сплав олова и свинца) или пластика из хорошо проводящего металла (чаще всего медь), но меньшего сечения, чем сечение проводов. Плавкая вставка – сменяемая часть предохранителя, плавящаяся при увеличении тока в защищаемой цепи свыше определенного значения.

Малогабаритные автоматы предназначены в основном для защиты от коротких замыканий и перегрузок приемников электроэнергии и проводов, рассчитанных на напряжение до 380 В и ток до 50А. Средством защиты в этих автоматах являются различные расцепители (электромагнитные, тепловые или комбинированные). Электромагнитные расцепители срабатывают практически моментально, поэтому необходимость в предохранителях с плавкой вставкой отпадает.

Электромагнитный пускатель.

Электромагнитный пускатель (магнитный пускатель) – это электромагнитный аппарат, предназначенный для дистанционной коммутации потребителей электроэнергии постоянного и переменного тока. Он содержит основание для монтажа одного или двух контакторов и двух реле защиты, работающих по тепловому принципу.

Основным элементом магнитного пускателя является контактор.

Контактор состоит из сердечника 2, на котором размещена втягивающая катушка 1, якоря 3 и группы подвижных 5 и неподвижных 6 контактов (рис. 1.94, а). Подвижные контакты расположены на изоляционной траверсе 4. Среди подвижных и неподвижных контактов различают основные 5, 6 (силовые) и вспомогательные 7 контакты (рис. 1.178, б). Силовые контакты замыкают цепи питания приемника электроэнергии. Вспомогательные контакты (их называют блок-контактами) предназначены для коммутации цепи управления.

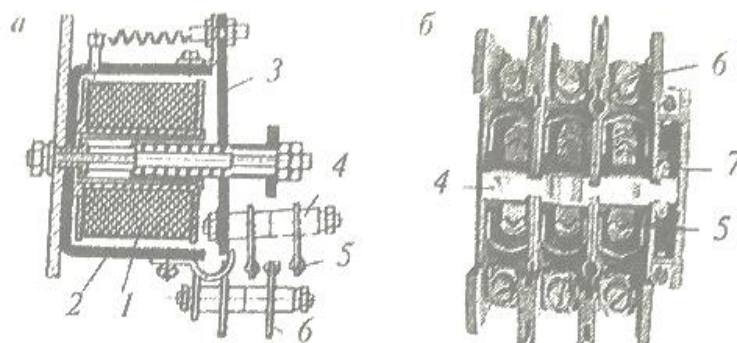


Рисунок 1.94 – Принцип работы контактора (а) магнитного пускателя и внешний вид траверсов (б)

При подаче напряжения на катушку пускателя протекающий в ней ток создает магнитное поле, которое притягивает якорь к сердечнику, в результате чего происходит замыкание силовых контактов, а также замыкание (или размыкание в зависимости от исполнения) вспомогательных контактов. При снятии напряжения с катушки магнитного пускателя под действием возвратной пружины (а в некоторых типах контакторов под действием собственного веса) контакты размыкаются.

Пускатели, предназначенные для коммутирования электрических цепей с большими токами, как правило, оснащены дугогасителями, расположенными в специальных дугогасительных камерах над силовыми контактами.

Принцип работы электромагнитного пускателя рассмотрим на примере простейшей схемы управления работой трехфазного асинхронного электродвигателя (рис. 1.95).

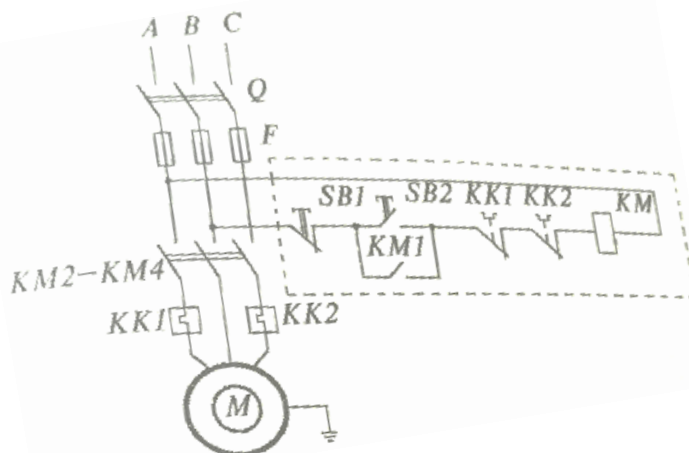


Рисунок 1.95 – Схема управления работой трехфазного электродвигателя

Силовая цепь содержит трехфазный выключатель Q, предохранители и электродвигатель М. Напряжение к электродвигателю М поступает через замыкающие силовые контакты КМ2-КМ4 контактора КМ и катушки температурных реле КК1 и КК2.

К цепи управления через последовательно соединены размыкающую кнопку SB1, замыкающую кнопку SB2 и контакторы температурных реле КК1 и КК2 подключена катушка контактора КМ. Контакты кнопок SB1 и SB2 соответственно размыкают и замыкают цепь управления только тогда, когда находятся в нажатом состоянии. При отпускании этих кнопок они возвращаются в исходное состояние, т. е. размыкающая кнопка замыкает цепь управления, а замыкающая - размыкает.

В исходном состоянии (как показано на рис. 1.180) двигатель остановлен. При нажатии на замыкающую кнопку SB2 на катушку КМ контактора через размыкающие контакты кнопки SB1 и температурные реле КК1 и КК2 поступает напряжение, контактор срабатывает и его замыкающие контакты КМ2-КМ4 замыкают цепь питания электродвигателя, а блок-контакт КМ1 шунтирует замыкающую кнопку SB2, что избавляет оператора от необходимости дальнейшего удержания этой кнопки. Для остановки электродвигателя следует нажать на размыкающую кнопку SB1. Подача напряжения на катушку КМ контактора прекратится, контакты КМ2-КМ4 разомкнутся и электродвигатель М остановится.

При перегрузках увеличивается ток, потребляемый электродвигателем, срабатывают температурные реле КК1 и КК2 (или одно из них), контакт КК1 или КК2 размыкает цепь управления, подача напряжения на катушку КМ контактора прекращается, электродвигатель останавливается.

Данная схема обеспечивает отключение электродвигателя при исчезновении или значительном снижении напряжения в силовой цепи. Эта мера предотвращает самостоятельный запуск электродвигателя при нормализации режима работы силовой цепи. Возобновление работы электродвигателя должен осуществить оператор.

Для защиты силовой цепи и цепи управления от коротких замыканий служат предохранители FU.

Примечание. На контакторах импортного производства замыкающие контакты обозначены буквами NO (Normal Open — нормально открытый), а размыкающие — буквами NC (Normal Close — нормально закрытый).

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите составные части электропривода.
2. Поясните как выбирается мощность электродвигателя.
3. Поясните каково назначение аппаратуры защиты и управления.
4. Поясните назначение разъединителей.
5. Поясните назначение пакетных выключателей и переключателей.
6. Поясните назначение и принцип работы контактора.
7. Поясните назначение и принцип работы реле защиты.
8. Поясните устройство магнитного пускателя.
9. Поясните принцип работы магнитного пускателя.

Тема 1.11 Передача и распределение электрической энергии

Понятие энергетической системы. Типы электрических станций. Способы передачи электрической энергии

Энергетическая система (энергосистема) – это объединение государственных электрических станций, связанных между собой и потребителями электрической энергии высоковольтными линиями электропередачи и распределительными линиями.

Электрическая станция (электростанция) - совокупность установок, оборудования и аппаратуры, используемых непосредственно для производства электрической энергии, а также необходимые для этого сооружения и здания, расположенные на определенной территории. В зависимости от источника энергии различают следующие типы электростанций: тепловые электростанции, использующие природное топливо; разделяются на конденсационные и теплофикационные; гидравлические и гидроаккумулирующие, использующие энергию падающей воды; атомные, использующие энергию ядерного распада; дизельные; тепловые с газотурбинными и парогазовыми установками; солнечные; ветровые; геотермальные; приливные.

Линия электропередачи (ЛЭП) —сооружение, состоящее из проводов и вспомогательных устройств, предназначенное для передачи или распределения электрической энергии. ЛЭП является основным звеном энергосистемы и вместе с трансформаторными подстанциями и распределительными пунктами образует *электрические сети*.

Воздушной линией электропередачи (ВЛ) называется устройство для передачи и распределения электроэнергии по проводам, расположенным на открытом воздухе и прикрепленным изоляторами и арматурой к опорам или кронштейнам инженерных сооружений (мостов, путепроводов и т.п.).

Кабельная линия электропередачи — линия для передачи электроэнергии или отдельных ее импульсов, состоящая из одного или нескольких параллельных кабелей, уложенных непосредственно в землю, кабельных каналов, труб или кабельных конструкций. Кабельные ЛЭП применяют там, где по разным причинам невозможно проложить воздушные ЛЭП. Внутренние кабельные проводки выполняют открыто по стенам и поверхностям строительных конструкций.

Газоизолированная линия электропередачи — линия для передачи электроэнергии, в которой в качестве основной электрической изоляции токопроводящих жил используется сжатый газ (как правило, элегаз SF₆ или смесь элегаза с азотом).

Электрическая проводка (электропроводка) предназначена для распределения электрической энергии по квартире, дому или другому помещению. Электрическая проводка представляет собой совокупность нескольких составляющих, которые позволяют передать электричество от подъездного распределительного щитка в каждую комнату квартиры. Среди составляющих можно выделить проводники, коммутационные аппараты, устройства защиты, а также различные детали и конструкции для прокладки и крепления проводников.

Трансформаторная подстанция (ТП) - часть системы передачи и распределения электрической энергии, в которой происходит повышение или понижение значения электрического напряжения с использованием трансформаторов.

Рассмотрим упрощенную схему передачи электроэнергии от электростанции потребителю (рис. 1.96).

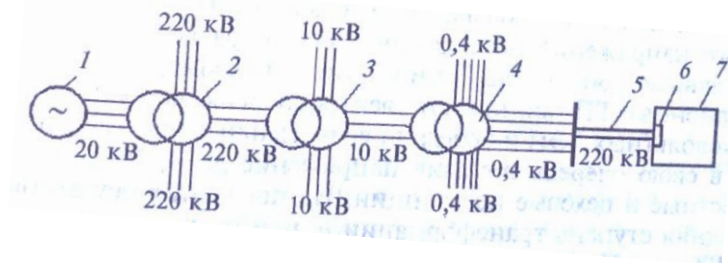


Рисунок 1.96 - Схема передачи электроэнергии от электростанции к потребителю

Напряжение величиной, например, 20 кВ, вырабатываемое генератором 1, повышается на ТП 2 до величины 220 кВ и передается по ЛЭП на понижающие ТП 3, образующие сеть любой конфигурации в зависимости от их количества, направления и расстояния от ТП 2.

На ТП 3 напряжение понижается с 220 до 10 кВ и, в свою очередь, передается в сеть понижающих ТП 4, в которых напряжение снижается с 10 до 0,4 кВ. Таким образом, снижение напряжения осуществляется в несколько этапов, при этом на каждом этапе территория, охватываемая сетью данных ТП, расширяется. ТП, понижающие напряжение до величины 0,4 кВ, располагаются на расстоянии не более 1 км от потребителя электроэнергии. С этих ТП напряжение величиной 0,4 кВ поступает на промышленные и хозяйственные объекты, а по ответвлениям 5 напряжение величиной 220 В поступает на ввод 6 в здания 7, где используется для бытовых целей.

Назначение и устройство трансформаторных подстанций и распределительных пунктов

Системные ТП входят в состав энергосистемы и предназначены для организации питающей электрической сети крупных энергетических районов.

Потребительские ТП предназначены для питания энергией отдельных территорий, промышленных районов или отдельных предприятий.

В состав ТП входят: трансформатор; распределительные устройства; вспомогательные устройства (аккумуляторные батареи, конденсаторы для компенсации реактивной мощности – при необходимости).

В зависимости от назначения и величины первичного и вторичного напряжений понижающие ТП подразделяются на районные, главные понизительные и местные (цеховые).

Районные ТП принимают электроэнергию непосредственно от высоковольтных ЛЭП и передают ее на главные понизительные ТП, а те, в свою очередь понизив напряжение до 6, 10 или 35 кВ, - на местные и цеховые подстанции. На последних осуществляется последняя ступень трансформации (с понижением напряжения до 690, 400 или 230 В) и распределение электроэнергии между потребителями.

Распределительные устройства (РУ) на ТП собирают из отдельных элементов, изготовленных заранее. Однако во многих случаях, особенно для закрытых цеховых подстанций, предпочитают комплектные, полностью смонтированные на заводе-изготовителе РУ, а устанавливают их на подстанции, осуществляя необходимые подключения линий и трансформаторов. На каждой ТП имеется РУ со стороны высшего напряжения (ВН) и РУ со стороны низшего напряжения (НН). РУ ВН величиной 35-

110 кВ сооружают открытыми и лишь в случае особых требований — закрытыми. На ТЛ РУ напряжением 6 (10) кВ сооружают закрытыми и открытыми.

На цеховых ТП часто установлено только одно РУ на одной стороне НН. На рисунке 1.97 приведен пример сборной цеховой ТП, на которой первичное напряжение 6 кВ понижается до рабочего напряжения цеховой сети 380/220 В.

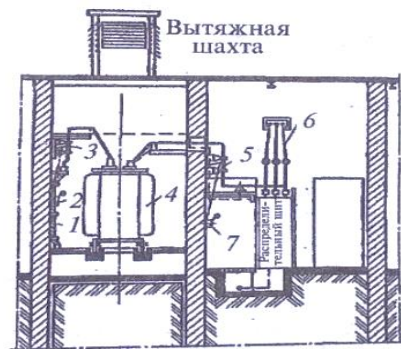


Рисунок 1.97 - Сборная цеховая ТП

К трансформатору 4, установленному в отдельной камере, по кабелю 1 через разьединитель 3 с рычажным приводом 2 подается первичное напряжение. Вторичное напряжение подается на шины распределительного щита, который находится в соседнем помещении, где смонтированы также разьединитель 5 с рычажным приводом 7 и шинопровод 6, который выходит в производственное помещение для питания установленных там электродвигателей. К шинам вторичного напряжения присоединены также кабельные линии, питающие осветительные цепи.

Наибольшее распространение получили комплектные ТП.

Комплектные ТП (КТП) – это такие подстанции, которые состоят из трансформатора и блоков, поставляемых в собранном или подготовленном для монтажа виде. В дополнение к поставляемым изготовителем блокам необходимо установить и подключить разьединитель и заземляющее устройство.

Комплектная ТП для внутренней установки приведена на рисунке 1.98.

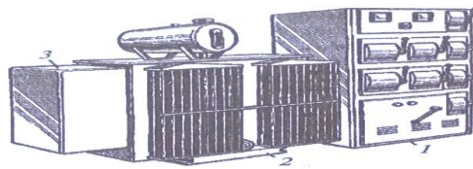


Рисунок 1.98 - Комплектная ТП для внутренней установки:

1 – распределительное устройство; 2 – силовой трансформатор; 3 – ввод высокого напряжения

Наиболее распространенными, дешевыми, простыми по конструкции и в эксплуатации являются **мачтовые ТП**. Эти подстанции устанавливают в сельской местности, в дачных поселках и на удаленных предприятиях с невысоким потреблением электроэнергии (рис.1.99).

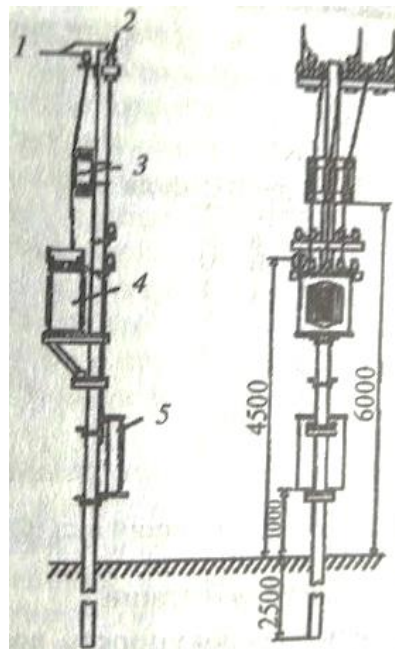


Рисунок 1.99 - Устройство мачтовой ТП: 1 – ЛЭП 6 (10) кВ; 2 – разрядник (ограничитель перенапряжения); 3 – высоковольтный предохранитель; 4 – трансформатор ТМГ (ТМ); 5 – шкаф РУ НН

Распределительный пункт (РП) - распределительное устройство одного напряжения, служащее для приема и распределения электрической энергии без ее трансформации или преобразования.

На рисунке 1.100 приведены внешний вид и примерная схема цехового РП с одиночной системой шин. Два секционных разъединителя QS3, QS4 предусматриваются для обеспечения безопасного ремонта любого из них без отключения обеих секций шин одновременно.

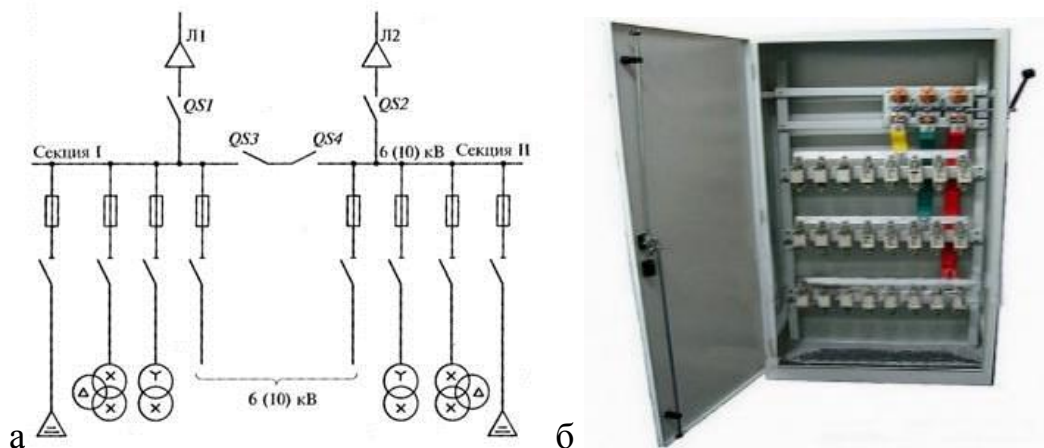


Рисунок 1.100 - Схема (а) и внешний вид (б) цехового РП

Электрические сети и линии

Электрическая сеть – совокупность воздушных и кабельных линий электропередачи и подстанций, работающих на определенной территории.

Линия электропередачи (воздушная или кабельная) – электроустановка, предназначенная для передачи электрической энергии. Электрическая сеть состоит из множества участков.

Участок (ветвь) – звено сети (однородный отрезок линии или трансформатор) между двумя узлами (пунктами) схемы.

Классификация электрических сетей может осуществляться:

- по назначению, области применения:

- сети общего назначения осуществляют электроснабжение бытовых, промышленных, сельскохозяйственных и транспортных потребителей;

- сети автономного электроснабжения обеспечивают электроснабжение мобильных и автономных объектов (транспортные средства, суда, самолеты, космические аппараты, автономные станции, роботы и т.п.);

- сети технологических объектов осуществляют электроснабжение производственных объектов и других инженерных сетей;

- контактная сеть – специальная сеть, предназначенная для передачи электроэнергии на движущиеся вдоль нее транспортные средства (локомотив, трамвай, троллейбус, метро);

- **масштабным признаком** (размерам сети):

- *магистральные сети* связывают отдельные регионы, страны и их крупнейшие центры потребления. Магистральные сети характеризуются сверхвысоким и высоким уровнем напряжения и большими потоками мощности (гигаватты);

- *региональные сети* обслуживают крупных потребителей в пределах города, района, предприятия, месторождения полезных ископаемых, транспортного терминала. Региональные сети получают питание от магистральных сетей и собственных региональных источников питания и характеризуются высоким и средним уровнем напряжения и большими потоками мощности (сотни мегаватт, гигаватты);

- *районные и распределительные сети* не имеют собственных источников питания, рабочее напряжение получают от региональных сетей. Данные сети обслуживают средних и мелких потребителей (внутриквартальные и поселковые сети, предприятия, небольшие месторождения, транспортные узлы) и характеризуются средним и низким уровнем напряжения и небольшими потоками мощности (мегаватты);

- *внутренние сети* распределяют электроэнергию на небольшом пространстве - в пределах района города, села, квартала, завода. Зачастую имеют одну или две точки подключения к внешней сети, иногда имеют собственный резервный источник питания. Данные сети характеризуются низким уровнем напряжения и небольшими потоками мощности (сотни киловатт, мегаватты);

- *электропроводка* - сеть самого нижнего уровня, обеспечивает подачу электроэнергии в отдельное здание, цех, помещение. Зачастую рассматривается совместно с внутренними сетями. Характеризуется низким и бытовым уровнем напряжения и маленькими потоками мощности (десятки и сотни киловатт);

- **роду тока** - сети переменного и постоянного тока;

- **номинальному напряжению** - сверхвысокого напряжения ($U_{\text{ном}}$ более 30 кВ), высокого напряжения ($U_{\text{ном}} = 3\text{-}220$ кВ), низкого напряжения ($U_{\text{ном}}$ менее 1 кВ);

- **выполняемым функциям:**

- *системообразующие сети* с рабочим напряжением 330 - 1150 кВ, осуществляющие: а) функции формирования объединенных энергосистем, соединяя мощные электростанции и обеспечивая их функционирование как единого объекта управления и одновременно обеспечивая передачу электроэнергии от мощных электростанций; б) системные связи, т.е. связи очень большой длины между энергосистемами;

- *питающие сети* предназначены для передачи электроэнергии от подстанций системообразующей сети и частично от шин напряжением 110-220 кВ электростанций к центрам питания распределительных сетей – районным ТП. Питающие сети обычно замкнутые. Напряжение этих сетей ранее было 110-220 кВ, но по мере роста плотности нагрузок, мощности электростанций и протяженности электрических сетей в настоящее время увеличилось и иногда достигает 330-500 кВ;

- *распределительная сеть* предназначена для передачи электроэнергии на небольшие расстояния от шин низшего напряжения районных подстанций к промышленным, городским, сельским потребителям. Такие распределительные сети обычно разомкнутые или работают в разомкнутом режиме. Различают распределительные сети высокого ($U_{ном} > 1$ кВ) и низкого ($U_{ном} < 1$ кВ) напряжения;

• **характеру потребителя** – распределительные сети промышленные, городские и сельскохозяйственного назначения. Ранее рабочее напряжение таких сетей составляло не более 35 кВ, в настоящее время его величина достигает 110 и 220 кВ;

• **конфигурации схемы** - замкнутые и разомкнутые сети.

Классификация линий электропередачи осуществляется по следующим признакам:

• **по роду тока:**

- *линии переменного тока* являются основными линиями передачи электроэнергии;

- *линии постоянного тока* используются для питания контактных сетей;

• **назначению:**

- *сверхдальние линии* напряжением 500 кВ и выше предназначены для связи между собой отдельных энергосистем;

- *магистральные линии* напряжением 220 и 330 кВ предназначены для передачи энергии от мощных электростанций, а также для связи энергосистем и объединения электростанций внутри энергосистем (например, соединения электростанций с распределительными пунктами);

- *распределительные линии* напряжением 35, 110 и 150 кВ предназначены для электроснабжения предприятий и населенных пунктов крупных районов и соединения распределительных пунктов с потребителями;

• **напряжению:**

- линия низшего класса напряжений (до 1000 В);

- линия с напряжением свыше 1000 В;

- линия среднего класса напряжений (1-35 кВ). ЛЭП на 10 кВ широко распространены в странах – членах СНГ;

- линия высокого класса напряжений (35-330 кВ);

- линия сверхвысокого класса напряжений (500-750 кВ);

- линия ультравысокого класса напряжений (свыше 750 кВ);

• **режиму работы нейтралей в электроустановках:**

- *трехфазные сети с незаземленными (изолированными) нейтральями* (нейтраль не присоединена к заземляющему устройству или присоединена к нему через аппараты с большим сопротивлением). В странах – членах СНГ такой режим нейтрали используется в сетях напряжением 3-35 кВ с малыми токами однофазных замыканий на землю;

- *трехфазные сети с резонансно-заземленными (компенсированными) нейтральями* (нейтральная шина присоединена к заземлению через индуктивность). В странах

- членах СНГ такой режим нейтрали используется в сетях напряжением 3-35 кВ с большими токами однофазных замыканий на землю;

- *трехфазные сети с эффективно-заземленными нейтралью* (сети высокого и сверхвысокого напряжения, нейтрали которых соединены с землей непосредственно или через небольшое активное сопротивление) – сети напряжением 110, 150 и частично 220 кВ, в которых применяются трансформаторы (автотрансформаторы требуют обязательного глухого заземления нейтрали);

- *трехфазные сети с глухозаземленной нейтралью* (нейтраль трансформатора или генератора присоединяется к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление). К ним относятся сети напряжением менее 1 кВ, а также сети напряжением 220 кВ и выше;

• **режиму работы в зависимости от механического состояния:**

- *линии нормального режима работы* – провода и тросы не оборваны;

- *линии аварийного режима работы* – полный или частичный обрыв проводов и тросов;

- *линии монтажного режима работы* – выполняется монтаж опор, проводов и тросов.

Электрические сети и ЛЭП должны удовлетворять многим технико-экономическим требованиям, основными из которых являются: безопасность для жизни и здоровья людей; пожарная безопасность; надежность и бесперебойность электроснабжения; высокое качество электроэнергии (отклонение напряжения сети от номинального напряжения потребителей не должно превышать допустимых пределов); минимальные капитальные и эксплуатационные расходы.

Соблюдение перечисленных и других требований обеспечивается правильным выбором оборудования, материалов, проводов и кабелей, высоким качеством строительной части и монтажа и выполнением всех правил технической эксплуатации.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение энергосистемы.
2. Перечислите типы электростанций.
3. Перечислите по каким признакам классифицируются электрические сети. Приведите классификацию электрических сетей по назначению.
4. Приведите классификацию электрических сетей по масштабным признакам.
5. Приведите классификацию электрических сетей по выполняемым функциям.
6. Приведите классификацию электрических сетей по характеру потребителей и конфигурации схемы.
7. Приведите классификацию ЛЭП по режиму работы нейтрали в электроустановках.
8. Приведите классификацию ЛЭП по режиму работы в зависимости от механического состояния.

Тема 2.1 Полупроводниковые приборы

Общие сведения о полупроводниковых приборах

Полупроводниковые приборы – широкий класс электронных приборов, действие которых основано на электронных процессах, происходящих в полупроводниках. К полупроводниковым приборам относятся: диоды (в том числе варикапы, стабилитроны, диоды Шоттки); транзисторы; тиристоры; интегральные схемы (микросхемы) и др; оптоэлектронные приборы (фоторезисторы, фотодиоды, солнечные элементы, детекторы ядерных излучений, светодиоды, полупроводниковые лазеры, электролюминесцентные излучатели); терморезисторы.

Достоинства полупроводниковых приборов: отсутствие подогревного элемента (накала); малые габариты, размеры и масса; высокая механическая прочность; большой срок службы (до десятков тысяч часов); высокий КПД устройств с полупроводниковыми приборами; работа при низких напряжениях питания маломощных устройств с полупроводниковыми приборами.

Недостатки полупроводниковых приборов: значительный разброс параметров и характеристик однотипных полупроводниковых приборов; зависимость параметров от температуры; резкое ухудшение работы в условиях ионизирующего и радиоактивного излучения.

Проводимости полупроводников

Полупроводник – это материал, который по своей удельной проводимости занимает промежуточное место между проводником и диэлектриком (удельная электрическая проводимость полупроводника меньше, чем у металлов, и больше, чем у диэлектриков) и отличается от проводника сильной зависимостью удельной проводимости от концентрации примесей, температуры, освещенности, сжатия, электрического поля и различных видов излучения.

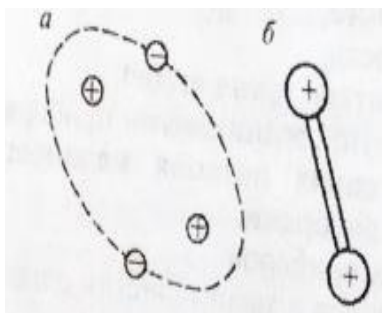


Рисунок 2.1 - Ковалентная связь (а) и ее схематическая изображение (б)

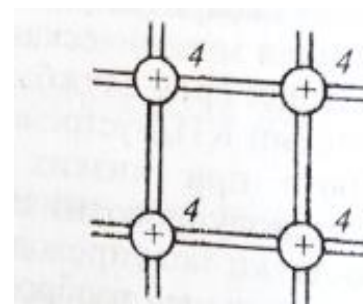


Рисунок 2.2 - Связи в кристаллической решетке германия

Электропроводность, обусловленная перемещением свободных электронов, называется **электронной проводимостью** полупроводника или **n-проводимостью**.

Перемещение дырок подобно перемещению положительных зарядов называется **дырочной электропроводностью**. Под действием внешнего электрического поля дырки перемещаются в направлении сил поля, т.е. противоположно перемещению электронов. Проводимость, возникающая в результате перемещения дырок, называется **дырочной проводимостью** или **p-проводимостью**.

В кристалле чистого полупроводника при нарушении ковалентных связей возникает одинаковое число свободных электронов и дырок. Одновременно с этим происходит обратный процесс – **рекомбинация**, при которой свободные электроны заполняют дырки, образуя нормальные ковалентные связи. При определенной температуре число свободных электронов и дырок в единице объема полупроводника в среднем остается постоянным. При повышении температуры число свободных электронов и дырок сильно возрастает и проводимость германия значительно увеличивается, т.е. полупроводники имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления. Электропроводность полупроводника при отсутствии в нем примесей называется его **собственной электропроводностью**.

Свойства полупроводника существенно изменяются при наличии в нем ничтожного количества примесей. Вводя в кристалл полупроводника атомы других элементов, можно получить преобладание свободных электронов над дырками или, наоборот, преобладание дырок над свободными электронами. Например, при замещении в кристаллической решетке атом германия атомом пятивалентного вещества (мышьяка, сурьмы, фосфора) четыре электрона этого вещества образуют заполненные связи с соседними атомами германия, а пятый электрон окажется свободных (рис. 2.3, а), поэтому такая примесь увеличивает электронную проводимость (n- проводимость) и называется **донорной**. При замещении атома германия атомом трехвалентного вещества (индий, галлий, алюминий) его электроны вступают в ковалентную связь с тремя соседними атомами германия, а связи с четвертым атомом германия будут отсутствовать, так как у трехвалентного вещества (например, индия) нет четвертого электрона (рис. 2.3, б).



Рисунок 2.3 - Схема связи пяти-(а) и трехвалентной (б) примеси с германием

Восстановление всех ковалентных связей возможно, если недостающий четвертый электрон будет получен от ближайшего атома германия. Но в этом случае на месте электрона, покинувшего атом германия, появится дырка, которая может быть заполнена электроном из соседнего атома германия. Последовательное заполнение свободной связи эквивалентно движению дырок. Примеси с меньшим числом валентных электронов в атоме по сравнению с атомом данного полупроводника вызывают преобладание дырочной проводимости и называются **акцепторными**.

Носители заряда, определяющие вид проводимости в примесном полупроводнике, называются **основными** (дырки в p-полупроводнике и электроны в n-полупроводнике), а носители заряда противоположного знака – **неосновными**.

Электронно-дырочный переход

В исходном состоянии в полупроводнике с р-проводимостью образуются дырки (как положительные свободные заряды) и отрицательные неподвижные ионы. Аналогичная ситуация, но с другими знаками, наблюдается в полупроводнике с n-проводимостью. При плотном соприкосновении двух полупроводников с разным типом проводимости электроны устремляются в полупроводник с р-проводимостью, компенсируя свободные дырки вблизи зоны контакта. В то же время дырки из дырочного полупроводника устремляются в электронный полупроводник, связывая свободные электроны вблизи контакта материалов. В тонком пограничном слое полупроводника с n-проводимостью возникает положительный заряд, а в пограничном слое полупроводника с р-проводимостью – отрицательные (рис. 2.4).

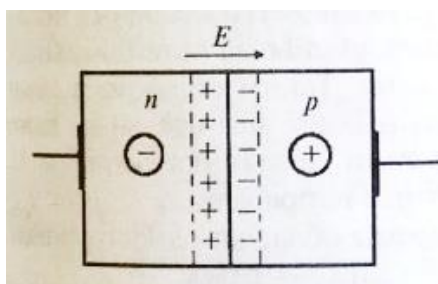


Рисунок 2.4 - Контакт полупроводников с разным типом проводимости

Между этими слоями возникает разность потенциалов и образуется электрическое поле напряженностью E , которая препятствует диффузии электронов и дырок из одного полупроводника в другой. На границе двух полупроводников возникает тонкий слой, обедненный носителями зарядов (электронов и дырок) и обладающий большим сопротивлением. Этот слой называется **запирающий** или **электронно-дырочным переходом (p - n-переход)**.

Вследствие теплового движения в электрическое поле p - n-перехода попадают неосновные носители зарядов (электроны из p-области и дырки из n-области). Движение неосновных носителей зарядов под действием сил поля p - n-перехода направлено навстречу диффузионному току основных носителей и называется **дрейфовым** или **тепловым током**, существенно зависящим от температуры. При отсутствии внешнего электрического поля дрейфовый ток уравнивается диффузионным и суммарный ток через p - n-переход равен нулю.

Электронно-дырочный переход представляет собой **полупроводниковый диод**.

Если с металлическим электродом полупроводника n-типа соединить положительный зажим источника питания, а с металлическим электродом полупроводника p-типа – отрицательный зажим, то возникнет внешнее электрическое поле $E_{в}$, направленное согласно с полем p - n-перехода и усиливающее его (рис. 2.5).

Такое поле еще больше будет препятствовать прохождению основных носителей зарядов через запирающий слой, и через диод пройдет малый обратный ток $I_{обр}$, обусловленный неосновными носителями заряда. Обратный ток диода в значительной мере зависит от температуры, увеличиваясь с ее повышением.

При изменении полярности источника питания (рис.2.6) внешнее электрическое поле $E_{в}$ окажется направленным ко встречному полю p - n-перехода $E_{в}$, под действием

которого электроны и дырки начнут двигаться навстречу друг другу. Количество основных носителей заряда в переходном слое возрастет, уменьшая потенциальный барьер и сопротивление переходного слоя. Таким образом, в цепи устанавливается прямой ток $I_{пр}$, который будет значительным даже при относительно небольшом напряжении источника питания U . В то же время при значительных обратных напряжениях $U_{обр}$ и $I_{обр}$ ничтожно мал. Таким образом, р - n-переход обладает односторонней проводимостью, т.е. является электрическим вентиляем.

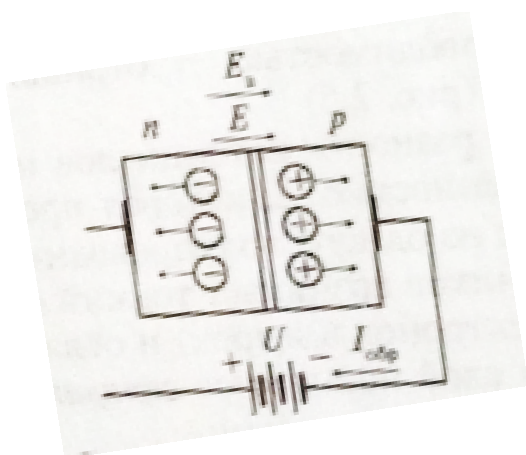


Рисунок 2.5 - Схема включения в обратной направлении

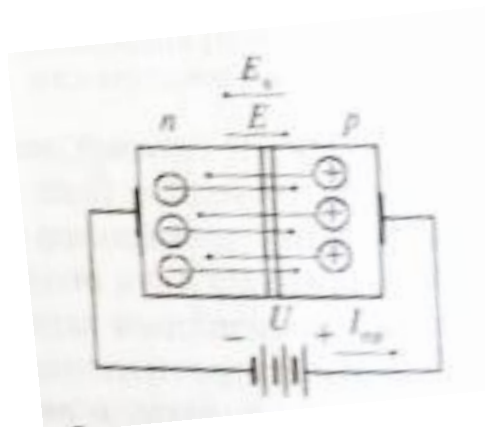


Рисунок 2.6 - Схема включения в прямом направлении

На рисунке 2.7 показана вольт-амперная характеристика (ВАХ) р - n-перехода, представляющая зависимость и направление тока от величины и полярности напряжения.

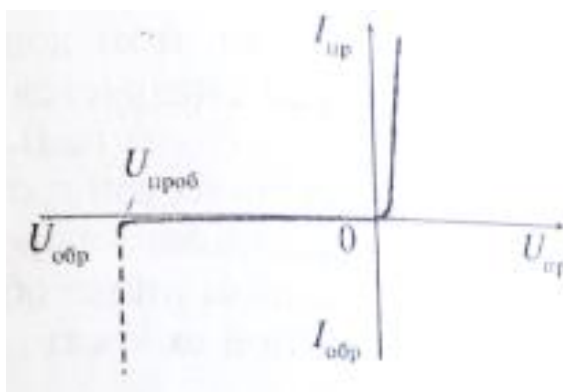


Рисунок 2.7 - Вольт-амперная характеристика р - n-перехода

ВАХ показывает, что при небольшом прямом напряжении $U_{пр}$ на зажимах диода в его цепи проходит относительно большой ток и при достижении обратным напряжением $U_{обр}$ некоторого критического значения обратный ток $I_{обр}$ возрастает. Этот режим называется **пробоем р - n-перехода**, а напряжение, при котором наступает пробой – **напряжение пробоя**. С практической точки зрения целесообразно различать два вида пробоя: электрический и тепловой.

Полупроводниковый диод

Полупроводниковый диод – это полупроводниковый прибор с одним р - n-переходом и двумя выводами. Вывод, соединенный с р-областью, называется **анодом**, а вывод, соединенный с n-областью, - **катодом**.

На рисунке 2.8 представлена конструкция точечного германиевого диода типа Д103. В стеклянном или металлическом корпусе 2 точечного диода крепится германиевый или кремниевый кристалл n-типа 3 площадью около 1мм^2 и толщиной 0,5 мм, к которому прижимается стальная или бронзовая игла 4, легированная акцепторной присадкой. Прибор включается в схемы через выводы 1. В процессе формовки через контакт иглы с кристаллом пропускают мощные импульсы тока. При этом кончик иглы оплавляється и часть акцепторной примеси внедряется в кристалл. Вокруг иглы образуется микроскопическая (точечная) область с дырочной электропроводностью. На полусферической границе этой области с кристаллом n-типа возникает электронно-дырочный переход. Малая площадь р - n-перехода в точечном диоде обеспечивает ему минимальное значение межэлектродной емкости.

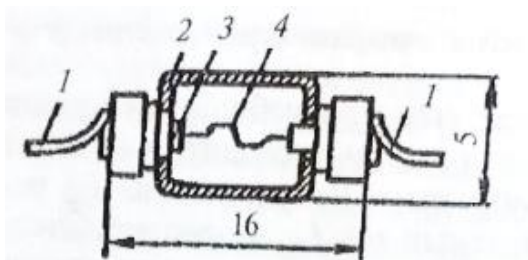


Рисунок 2.8 - Конструкция точечного выпрямительного диода

В плоскостном германиевом диоде (рис 2.9) на пластинку германия 3 с n-проводимостью накладывается таблетка из индия, которая в процессе изготовления диода нагревается до $500\text{ }^\circ\text{C}$ и плавится так, что ее атомы диффундируют в германий, образуя область с р-проводимостью. На границе двух областей появляется запирающий р - n-переход. Пластинка германия припоем 4 закрепляется на кристаллодержателе 2, к которому приварен нижний вывод катода 1. Вывод анода 5 также прием закреплен в области с р-проводимостью и выводится наружу в верхней части диода. Металлический корпус 6 сварен с кристаллодержателем и стеклянный изолятор 7.

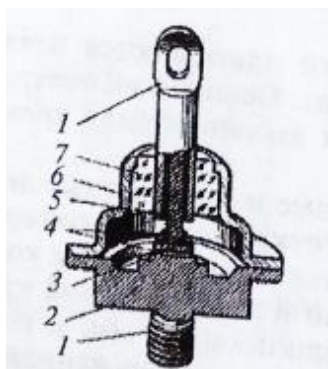


Рисунок 2.9 - Конструкция плоскостного выпрямительного диода

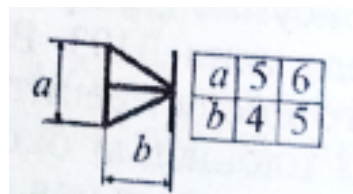


Рисунок 2.10 - условное графическое обозначение диода и его размеры

Кремниевые диоды отличаются от германиевых более высокой предельной температурой, значительно меньшим обратным током и более высоким напряжением пробоя. Однако сопротивление кремниевого диода в прямом направлении значительно больше, чем германиевого.

Основные характеристики диода - максимально допустимый прямой ток $I_{пр}$ и максимально допустимое напряжение $U_{доп}$ – это такие значения тока и напряжения, которые диод может выдержать в течение длительного времени. Значения этих параметров получают в результате расчета проектируемого устройства и по ним из справочников и каталогов подбирают нужный диод. Если превысить ток и (или) напряжение, приложенное к диоду, то устройство, в котором он работает, может выйти из строя.

Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор – полупроводниковый прибор, изготовленный на основе двух взаимодействующих электронно-дырочных переходов, имеющий три внешних вывода и более.

Биполярный транзистор содержит три слоя полупроводника. Каждый слой полупроводника через невыпрямляющий контакт метал-полупроводник подсоединен к внешнему выводу.

Батарея G_1 подключена отрицательным полюсом к левой n-области, а положительным полюсом – к р-области. Известно, что при такой полярности источника тока р - n-переход становится тоньше и его сопротивление уменьшается настолько, что даже небольшого напряжения источника G_1 достаточно для создания значительного потока электронов. Таким образом, если правый р - n-переход не подключен, то левый р - n-переход будет работать так же, как и обычный полупроводниковый диод, включенный в пропускной направлении. При этом электроны от отрицательного зажима источника тока перемещаются по левой n-области через очень узкую р-область к положительному полюсу источника. Этот путь электронов показан на рисунке штриховыми стрелками (рис. 2.11).

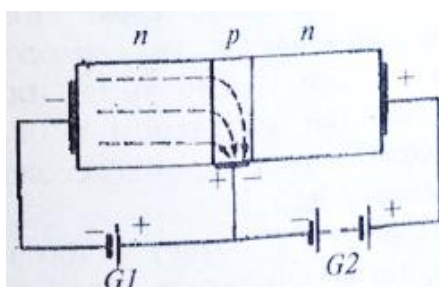


Рисунок 2.11 - Включение двойного р - n-перехода

Если подключить батарею G_2 к правому р - n-переходу таким образом, чтобы ее отрицательный полюс был подведен к р-области, а положительный полюс – к n-области, то правый р - n-переход окажется включенным в запирающем направлении. Несмотря на запирающее состояние, в цепи батареи G_2 будет протекать ток. Объясняется этот парадокс тем, что электроны, движущиеся в левой части схемы под действием положительного потенциала батареи G_2 преодолевают правую n-область. В промыш-

ленных транзисторах р-область имеет толщину всего в несколько тысячных долей миллиметра, а подключаются они так, что бы на правом р - n-переходе напряжение было во много раз больше, чем на левом. Благодаря этого почти все электроны (96-98%) из левой n-области переходят в правую n-область, не отклоняясь в сторону положительного полюса источника G_1 . Иными словами, ток правого р - n-перехода почти равен току левого р - n-перехода.

Левая n-область, которая служит как бы источником свободных электронов, называется **эмиттером**. Правая n-область, куда приходят электроны, называется **коллектором**, а средняя узкая р-область получила название основания, или **базы** транзистора; р - n-переход, образованный эмиттером и основанием, называют **эмиттерным** переходом, а р - n-переход, созданный основанием и коллектором, - **коллекторным**.

Транзистор типа р – n – р –переход работает точно так же, как и только что рассмотренный, но в нем эмиттерный и коллекторный токи создаются перемещением не электронов, а дырок.

На рисунке 2.13, а приведено схематичное изображение структуры транзистора типа n - р - n-переход. Транзисторы этой структуры называют транзисторами обратной проводимости. Транзистор типа р – n – р устроен аналогично, упрощенно изображение его структуры приведено на рисунке 2.12, б.



Рисунок 2.12 - Схема устройства транзистора типа n - р – n (а) и р – n – р (б): Э – эмиттер; К – коллектор; Б – База

Транзисторы типов р – n – р и n - р – n называют также транзисторами прямой и обратной проводимости соответственно.

Конструкция транзистора приведена на рисунке 2.14. В герметически закрытом металлическом корпусе 1 вертикально закреплен кристалл германия 2, имеющий n-проводимость. Кристалл имеет электрический контакт с корпусом и служит основанием транзистора. На противоположных гранях основания созданы р-области эмиттера и коллектора. С помощью тонких гибких проводников эмиттер и коллектор соединяются с контактными выводами 3, которые вмонтированы в дно корпуса посредством изоляторов. Вывод основания приварен непосредственно к корпусу транзистора.

Включение биполярного транзистора в схему осуществляется таким образом, чтобы один из его выводов являлся входным, а второй – выходным, а третий – общим для входной и выходной цепей. В зависимости от того, какой электрод является общим, различают три схемы включения транзисторов (рис.2.13):

- схема с общим эмиттером;
- схема с общим коллектором;
- схема с общим базой.

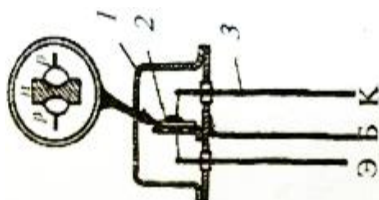


Рисунок 2.13 - Конструкция транзистора

Схема с общим эмиттером. Между базой и эмиттером подсоединяют источник сигнала $U_{вх}$, а к коллектору – нагрузку R_n . К эмиттеру транзистора подключают полюсы одинаковых знаков источников питания U_B и $U_{П}$. Входным током каскада выступает ток базы I_B транзистора, а выходным – ток коллектора I_K . Это показано на рисунке 2.14, а на примере включения в электрическую цепь биполярного р – н – р транзистора (направление протекания тока по выводам транзистора показано стрелками). На практике используют не два, а один источник питания.

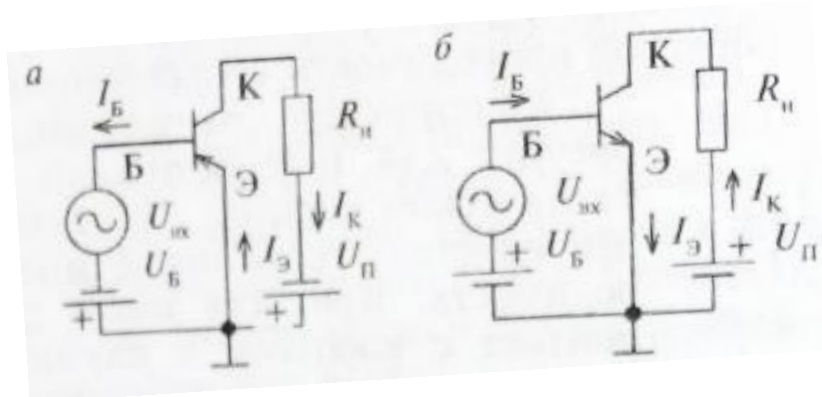


Рисунок 2.14 - Включение транзистора в цепь по схеме с общим эмиттером



Рисунок 2.15 - Условное графическое обозначение в электронный схемах транзистора и размеры транзистора

Включение n - р – n-транзистора аналогично включению р – н – р-транзистора, однако в данном случае следует поменять полярность обоих источников питания (рис. 2.14, б).

Схема с общим коллектором. Источник входного напряжения $U_{вх}$ включается в цепь базы, а источник питания $U_{П}$ и сопротивление нагрузки R_n – в цепь эмиттера.

Входным током является ток базы I_B , а выходным – ток эмиттера $I_Э$. Это отражено на рисунке 2.16, на котором изображена схема включения биполярного р – н – р-транзистора. Коэффициент усиления по напряжению $K_U = 0,9 – 0,95$, т.е. близок к единице. Коэффициент усиления по току составляет 10-100. Таким образом, схема с общим коллектором используется для усиления тока. Фаза входного напряжения сигнала, подаваемого на каскад, совпадает с фазой выходного напряжения, т.е. отсутствует его инверсия. Именно из-за сохранения фазы входного и выходного сигнала

каскад с общим коллектором часто называют эмиттерным повторителем. Схема с общим коллектором используется для согласования отдельных каскадов усиления источника сигнала или нагрузки с усилителем.

Схема с общей базой. Включение транзистора р – н – р структуры по схеме с общей базой приведено на рисунке 2.17.

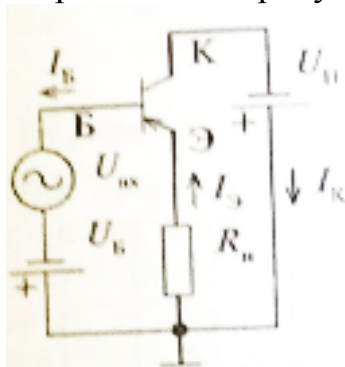


Рисунок 2.16 - Включение транзистора в цепь с общим коллектором

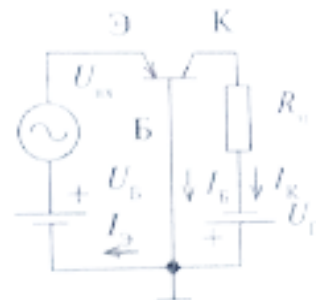


Рисунок 2.17 - Включение транзистора в цепь с общей базой

Напряжение входного сигнала $U_{вх}$ подают между эмиттером и базой транзистора, а выходное напряжение снимают с выводов коллектор – база. Приращение напряжения $\Delta U_{вх}$ на входе вызывает увеличение тока эмиттера $I_э$, что приводит к увеличению тока коллектора $I_к$ и выходного напряжения нагрузки $U_н$. Через источник входного сигнала в этой схеме проходит весь ток эмиттера $I_э$ и усиления по току не происходит (коэффициент усиления по току меньше единицы). Усиление по напряжению и мощности может достигать нескольких сотен.

Статические характеристики биполярных транзисторов. Статическим режимом работы транзистора называется режим при отсутствии нагрузки в выходной цепи. Статические характеристики показывают графическую зависимость между токами и напряжениями транзистора и могут применяться для определения некоторых его параметров, необходимых для расчета транзисторных схем. Наиболее часто применяются статические входные и выходные характеристики. Вид характеристик зависит от способа включения транзистора.

Характеристики транзистора, включенного по схеме с общей базой. Входной характеристикой является зависимость $I_э = f(U_{ЭБ})$ при $U_{КБ} = const$ (рис. 2.18, а). Выходной характеристикой является зависимость $I_к = f(U_{КБ})$ при $I_э = const$ (рис. 2.18, б). Выходные ВАХ имеют три характерные области:

- 1) сильная зависимость $I_к$ от $U_{КБ}$;
- 2) слабая зависимость $I_к$ от $U_{КБ}$;
- 3) пробой коллекторного перехода.

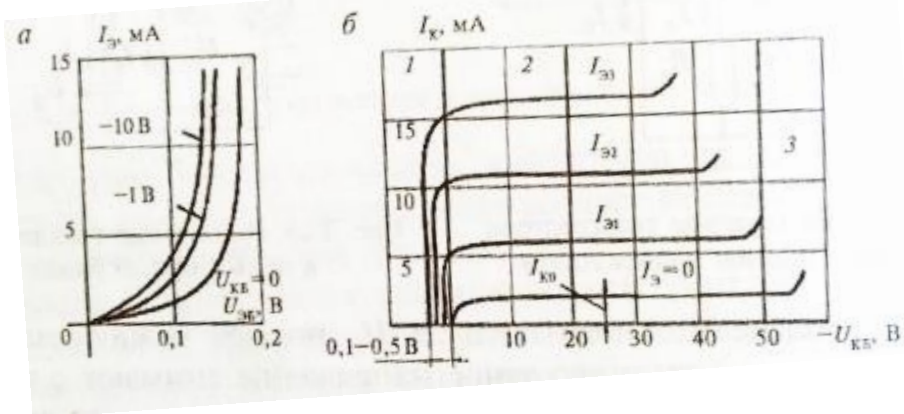


Рисунок 2.18 - Статические характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой

Особенностью характеристик в области 2 является их небольшой подъем при увеличении напряжения $U_{КБ}$.

Характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Входной характеристикой является зависимость $I_{Б} = f(U_{ЭБ})$ при $U_{КЭ} = const$ (рис. 2.19, а). Выходной характеристикой является зависимость $I_{К} = f(U_{КЭ})$ при $I_{Б} = const$ (рис. 2.19, б).

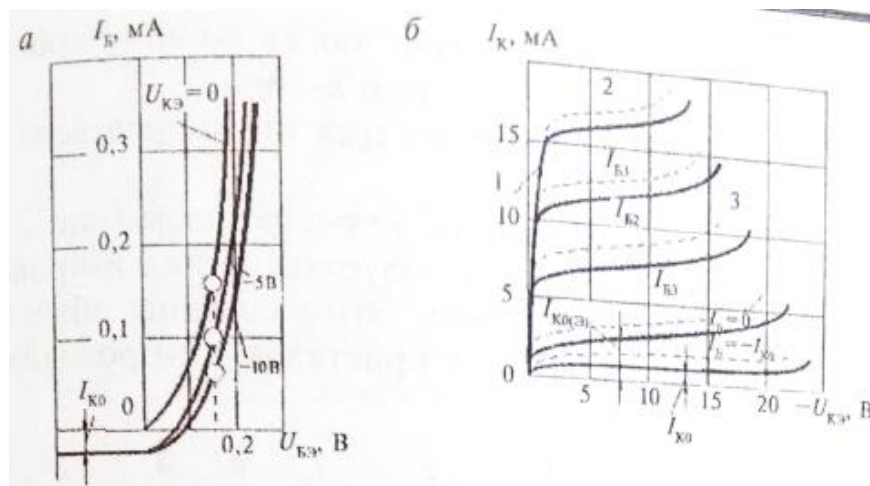


Рисунок 2.19 - Статические характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

Полевые транзисторы

Полевой транзистор – полупроводниковый прибор, в котором ток через канал управляется электрическим полем, возникающим при приложении напряжения между затвором и истоком.

Канал – область полупроводникового кристалла, в котором ток носителей заряда регулируется изменением ее поперечного сечения.

Исток – электрод, через который в канал входят основные носители заряда.

Сток – электрод, через который из канала выходят основные носители заряда.

Затвор – электрод, к которому прикладывается управляющее напряжение.

Полевые транзисторы часто называют **униполярными**, так как принцип их работы основан на управлении движением носителей заряда только одного знака (основных носителей), в отличие от биполярных транзисторов, в которых физические процессы связаны с движением носителей заряда обоих знаков.

Различают два типа полевых транзисторов: с управляющими р - n-переходами; изолированным затвором (МДП-транзисторы). Аббревиатура МДП обозначает структуру металл – диэлектрик – полупроводник. Очень часто в качестве диэлектрика используют окисел (в частности, двуокись кремния SiO_2), поэтому такие транзисторы называют «МОП-транзистор», где аббревиатура МОП обозначает металл – окисел – полупроводник.

МДП-транзисторы в свою очередь подразделяются: на транзисторы со встроенным (собственным каналом); транзисторы с индуцированным каналом.

Полевые транзисторы различают также по виду проводимости канала: транзисторы с каналом р- или n-типа.

Устройство полевых транзисторов трех типов приведено на рисунке 2.20.

В транзисторе с управляющим р – n-переходом (рис. 2.20, а) канал образован частью кристалла полупроводника n-проводимости с меньшим поперечным сечением. Этим созданы области р-проводимости, на границе которых с кристаллом n-проводимости образуется р – n-переход.

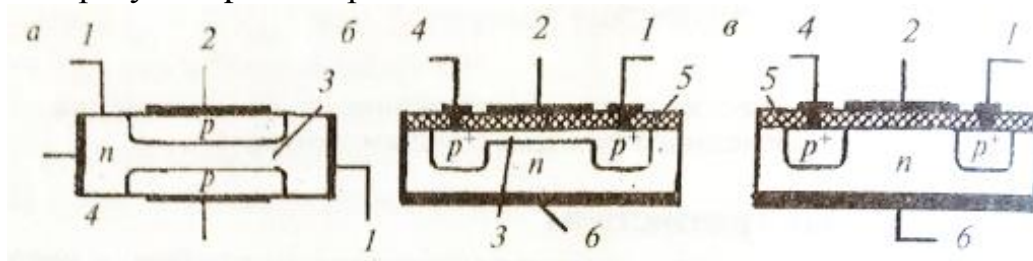


Рисунок 2.20 - Устройство полевых транзисторов:

1-сток; 2-затвор; 3-канал; 4-исток; 5-диэлектрик; 6-подложка.

В МДП транзисторе со встроенным каналом (рис. 2.20, б) канал р-проводимости, области стока и истока (P^+ -области) выполнены в процессе изготовления прибора. В МДП-транзисторе с индуцированным каналом (рис. 2.20, в) сам канал не создается технологическим путем. Под действием электрического поля, возникающего в результате приложения напряжения к затвору, в части полупроводника n-типа, вблизи поверхности, между стоком и истоком образуется тонкий инверсный слой с дырочной проводимостью – р-канал.

Транзистор с управляющим р – n-переходом может быть выполнен также на основе полупроводника р-типа (с каналом р-типа), а транзисторы с изолированным затвором – с областями стока и истока n^+ -типа, образованными в кристалле с дырочной проводимостью.

Как видно из рисунком 2.20, б и в, затвор в МДП-транзисторах отделен от кристалла полупроводника слоем диэлектрика, поэтому такие приборы называют транзисторами с изолированным затвором.

МДП-транзисторы – четырех электродные приборы: четвертым электродом (подложкой) служит кристалл полупроводника, на основе которого выполнен транзистор.

Основные особенности полевых транзисторов: ток обусловлен движением только основных носителей заряда, причем движение носит дрейфовый характер. В связи с этим частотные свойства полевых приборов и особенности их работы в импульсном

режиме зависят от иных физических параметров и процессов, чем в биполярных транзисторах; управление током осуществляется с помощью электрического поля. После создается обратным напряжением на управляющем р – n-переходе или напряжением на затворе в МДП-транзисторах. И в том и в другом случае токи в управляющей цепи (цепи затвора) весьма малы и входное дифференциальное сопротивление прибора велико: $10^8 - 10^{10}$ Ом в транзисторах с управляющим р – n-переходом и $10^{10} - 10^{12}$ Ом в МДП-транзисторах. В этом отношении полевые транзисторы близки к электронным лампам, поэтому усилительные свойства полевых транзисторов принято оценивать крутизной характеристики, определяющей зависимость тока стока (тока в выходной цепи) от напряжения, приложенного ко входной цепи (цепи затвора).

На рисунке 2.21 приведено условное графическое обозначение полевых транзисторов различных типов.

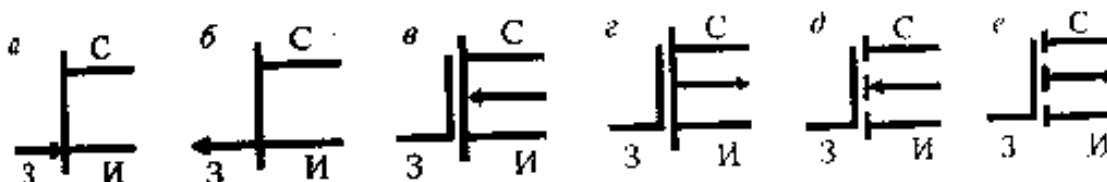


Рисунок 2.21 - Условное графическое обозначение полевых транзисторов

Тиристоры

Тиристор – полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, имеющий три (и более) р – n-перехода, который может переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот.

В зависимости от количества выводов различают тиристоры диодные (динисторы), триодные (тринисторы) и тетродные.

На рисунке 2.22 представлена вольт-амперная характеристика динистора, для снятия которой использовался источник электрического питания.

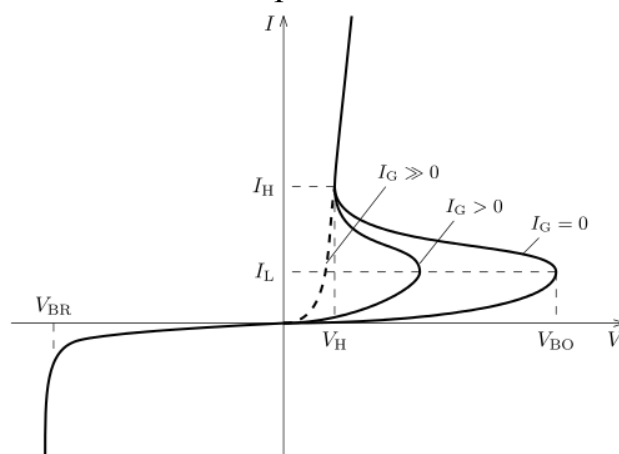


Рисунок 2.22 - Вольт-амперная характеристика динистора

В зависимости от величины тока, протекающего через динистор, между катодом и анодом возникает соответствующая разность потенциалов.

Если к аноду приложено отрицательное напряжение относительно катода, то все переходы закрыты и через структуру протекает обратный ток. Этот режим называется **режимом обратного запираения** (на рис. 2.22 ему соответствует участок 0-А). При дальнейшем увеличении обратного напряжения наступает **режим обратного пробоя**,

которому соответствует участок А-Б на рисунке 2.22 (происходит электрический пробой).

Если к аноду приложить небольшое положительное напряжение относительно катода, то переходы Π_1 и Π_3 будут включены в прямом направлении, а переход Π_2 – в обратном (поэтому почти все приложенное напряжение на нем падает). Участок 0 – В вольт-амперной характеристики (см. рис. 2.22) аналогичен обратной ветви характеристики диода и соответствует **режиму прямого запирания**.

Если уменьшить ток через открытый динистор, то он будет оставаться открытым до тех пор, пока ток тиристора достаточен, для поддержания процесса образования носителей зарядов в переходе Π_2 . При токе, меньшем определенного значения, называемом **током удержания $I_{уд}$** , динистор закрывается, т.е. возвращается в исходное, непроводящее состояние.

Тринисторы (рис.2.23) отличаются от динисторов тем, что одна баз имеет внешний вывод, называемый **управляющим электродом**.

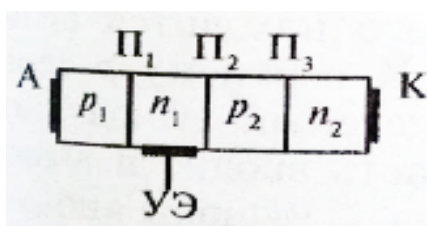


Рисунок 2.23 - Структура тринистора

При подаче на управляющий электрод напряжения необходимой полярности через эмиттерный переход увеличиваются инжекция носителей и суммарный коэффициент передачи тиристора, изменяется коэффициент передачи тока эмиттера одной из транзисторных структур, уменьшается напряжение переключения.

В зависимости от того, из какой области базы сделан вывод, триодные тиристоры разделяются на управляемые по катоду и управляемые по аноду. Принцип их работы одинаков, различие заключается лишь в полярности внешних напряжений, подаваемых на управляющий электрод.

У тринисторов, управляемых катодом, в управляющую цепь падают положительный управляющий сигнал, а управляемых анодом – отрицательный.

На рисунке 2.24 представлено условное графическое обозначение динистора и тринистора.

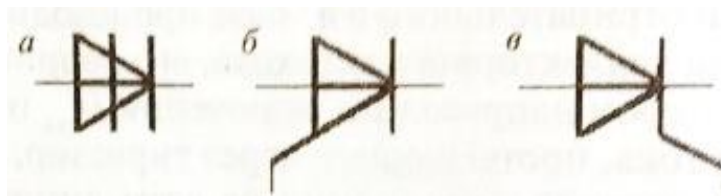


Рисунок 2.24 - Условное графическое обозначение:

а – динистор; б – тринистор, управляемый по аноду; в – управляемые по катоду

Тиристоры имеют два устойчивых состояния.

В закрытом состоянии тиристор имеет очень большое сопротивление, а в открытом его сопротивление близко к нулю. Поэтому тиристоры применяются в качестве

бесконтактных переключателей в инверторах, регулируемых выпрямителях, схемах защиты и т.д.

На рисунке 2.25 приведена конструкция мощного тиристора.

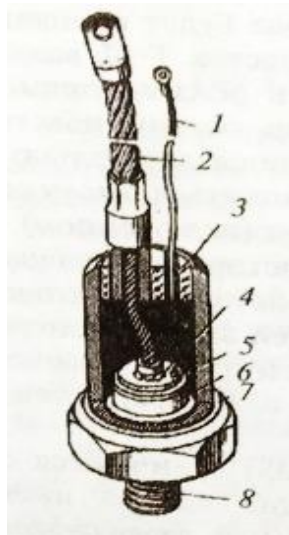


Рисунок 2.25 - Конструкция мощного тиристора

Четырехслойная кристаллическая структура 5, укрепленная на кристаллодержателе 6, размещена в металлическом корпусе 7, в нижней части которого находится резьбовой вывод катода 8. К верхнему р-слою припоем 4 крепится плетеный вывод анода 2. В среднюю р-область вводится вывод управляющего электрода 1. Выводы анода и управляющего электрода закрепляют в корпусе изолятором 3.

В зависимости от рабочих параметров тиристоры различаются большим разнообразием конструктивного исполнения.

Контрольные вопросы и задания

1. Перечислите какие приборы относятся к полупроводниковым. Перечислите достоинства и недостатки полупроводниковых приборов.
2. Расскажите о свойствах полупроводниковых материалов.
3. Объясните чем обусловлены n- и p-проводимость
4. Объясните как образуется электронно-дырочный переход.
5. Объясните как устроен биполярный транзистор.
6. Какой полупроводниковый прибор называется тиристором.
7. Объясните как устроен полевой транзистор.
8. Поясните принцип работы тиристора.

Тема 2.2 Фотоэлектронные приборы. Фотоэлектронные явления

Фотоэлектронные приборы – это электровакуумные элементы или полупроводниковые приборы, преобразующие энергию электромагнитного излучения в электрические сигналы.

Электромагнитное излучение представляет собой волну с частотой ν или λ . Также его можно представить в виде потока частиц – фотонов (квантов электромагнитного излучения, в «узком» смысле – света), каждый из которых обладает энергией

$$W=h\nu$$

где h – постоянная планка ($h=6,63*10^{-34}$ Дж).

Видимая область спектра электромагнитного излучения находится в диапазоне волн 0,38 – 0,78 мкм. Этой области спектра соответствует энергия фотонов от 3,3 до 1,6 эВ.

Принцип действия фотоэлектронных приборов основан на электрических процессах, протекающих в приборах в результате поглощения электромагнитного излучения. Попадая на поверхность твердого тела, фотоны передают свою энергию электронам вещества. При малой энергии фотонов тело нагревается. Если энергия фотонов превышает некоторое значение, энергия электронов в твердом теле изменяется. Электроны, получившие дополнительную энергию, могут покинуть пределы твердого тела или перейти на более высокие энергетические уровни, например из валентной зоны в зону проводимости. Испускание электронов с поверхности твердого тела под действием падающего на нее электромагнитного излучения, наблюдающееся в первом случае, называется **фотоэлектронной эмиссией** или внешним фотоэлектрическим эффектом. Внешний фотоэффект подчиняется закону Столетова: фототок I_{Φ} пропорционален световому потоку Φ :

$$I_{\Phi}=s\Phi,$$

где s – чувствительность фотокатода.

Явление возникновения ЭДС на внешних выводах полупроводникового прибора при воздействии на него электромагнитного излучения называется **фотогальваническим эффектом**.

Устройство и принцип действия фотоэлементов

Устройство *вакуумного фотоэлемента* показано на рисунке 2.26, а. В стеклянном баллоне, из которого выкачан воздух, помещены два электрода: катод К и анод А. Катод в виде тонкого светочувствительного слоя нанесён на внутреннюю поверхность баллона. Анод изготовлен в виде кольца, расположенного в центре баллона. Выводы от катода и анода смонтированы на нижнем цоколе.

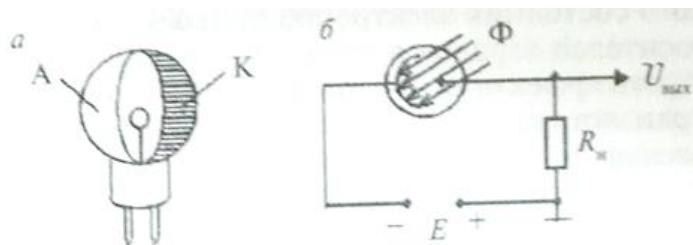


Рисунок 2.26 - Устройство (а) и схема (б) включения фотоэлемента

При освещении фотоэлемента в анодной цепи возникает ток, создающий на сопротивлении R_n падение напряжения. При изменении светового потока изменяется величина тока и, следовательно, выходное напряжение $U_{\text{вых}}$.

Устройство **газонаполненного фотоэлемента** аналогично устройству вакуумного. Разница заключается в том, что стеклянный баллон наполнен нейтральным газом. При освещении катода электроны, летящие от катода к аноду, сталкиваются по пути с атомами газа и выбивают из них новые электроны, которые тоже летят к аноду. Остатки атомов – положительные ионы – летят к катоду. В результате общее количество электронов, летящих к аноду (фото-ток), получается большим, чем в вакуумном фотоэлементе.

В **полупроводниковом фотоэлементе** под действием падающего на него излучения возникает фото ЭДС.

Работа полупроводникового фотоэлемента основана на использовании запирающего слоя между полупроводниками с различными проводимостями (p и n).

Если к освещению p и n – переходу подключить резистор R_n (рис.2.27), то по резистору потечет фототок, создаваемый движение через переход неосновных носителей, и на резисторе возникает падение напряжения (плюсом к p -области). Падение напряжения приводит к возникновению через переход прямого тока, направленного на встречу фототоку.

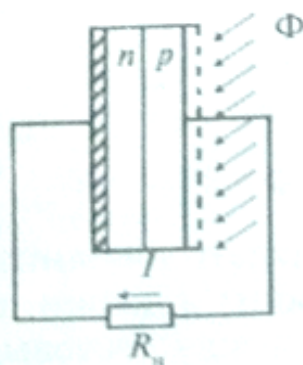


Рисунок 2.27 - Подключение резистора к p - n -переходу

Кроме фотоэлектронной эмиссии в полупроводниках наблюдается **внутренний фотоэффект** – перераспределение электронов по энергетическим состояниям в твердых и жидких полупроводниках и диэлектриках, происходящее под действием излучений. Изменение энергетического состояния электронов приводит к изменению концентрации носителей зарядов в среде. На использовании явления внутреннего фотоэффекта основана работа фоторезисторов, фотодиода, фототранзистора.

Фоторезистор – двухполюсный полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого изменяется под действием светового потока.

Фоторезисторы используются для формирования электрических сигналов под действием электромагнитного излучения.

Устройство фоторезистора показано на рисунке 2.28, а. Пленка 2 из полупроводникового материала закреплена на диэлектрической подложке 3. Подложку изготавливают из стекла, кварца или керамики. Световой поток Φ попадает на полупроводник через специальное отверстие в пластмассовом корпусе. Электроды 1 обеспечивают хороший контакт с полупроводником. Они изготавливаются из благородных металлов – золота, платины, и поэтому не подвержены коррозии.

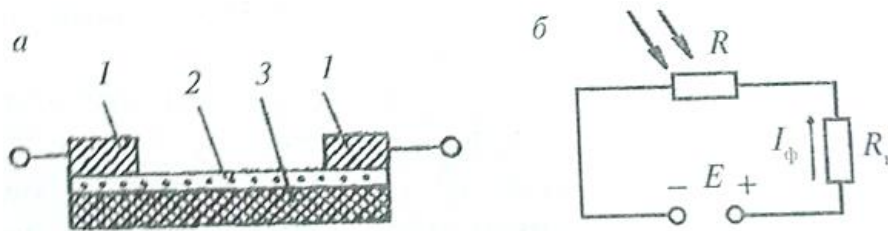


Рисунок 2.28 - Устройства (а) и схема (б) включения фоторезистора

При освещении фоторезистора в нем возникают дополнительные свободные электрические заряды – электроны и дырки, в результате чего ток в цепи возрастает. Разность между световым током I_{cs} и темновым I_m токами называется фототоком:

$$I_{\phi} = I_{cs} - I_m.$$

Значение фототока I_{ϕ} зависит от величины лучистого потока Φ и его спектрального состава. Зависимость $I_{\phi} = f(\Phi)$ называется энергетической характеристикой фоторезистора. Она носит нелинейный характер, что является одним из недостатков фоторезисторов.

Важным параметром фоторезисторов является пороговый световой поток $\Phi_{п}$ – минимальный поток излучения, который вызывает появление в цепи фоторезистора электрического напряжения, превышающего в 2-3 раза шумовое напряжение.

Существенным недостатком фоторезисторов является их большая инерционность, обусловленная значительным временем генерации и рекомбинации электронов и дырок при изменении освещенности фоторезистора.

Фоторезисторы широко применяются в автоматике, вычислительной технике и промышленной электронике. В частности, фоторезисторы используют для сортировки изделий по их окраске, размерам или каким – нибудь другим признакам.

Фотодиод – представляет собой полупроводниковый диод, обратный ток которого зависит от освещенности р-п-перехода.

Фотодиоды могут работать в двух режимах: в режиме фотогенератора (фотоэлемента) без внешнего источника питания и в режиме фотопреобразователя с внешним источником.



Рисунок 2.29 - Устройства фотодиода

Режим фотогенератора основан на использовании фотогальванического эффекта, поэтому при освещении неоднородного полупроводника на его зажимах образуется разность потенциалов.

Фотодиоды образованы двумя примесными полупроводниками с различными типами электропроводности. Конструктивно фотодиоды выполнены таким образом, что световой поток падает на плоскость p-n-перехода под прямым углом.

Фотодиоды, работающие в генераторном режиме, широко используются в качестве источников, преобразующих солнечную энергию. Такие источники именуют фотоэлементами, или солнечными элементами. Из них строят солнечные батареи, которые используют на космических объектах в качестве электростанций. Фотоэлементы отличаются от фотодиодов только конструктивными особенностями.

Фотодиоды и фотоэлементы изготавливают из германия, кремния, селена, сернистого серебра, арсенида индия и т.д.

В режиме фотопреобразователя в цепь последовательно с нагрузкой включают источник напряжения в запирающем направлении (рис. 2.30).



Рисунок 2.30 - Схема включения фотодиода: а) в генераторном режиме; б) в преобразовательном режиме.

Когда фотодиод не освещён, в цепи проходит темновой ток. При освещении фотодиода происходит генерация электронов и дырок. Под действием электрического поля E неосновные носители слоев p- и n- типа полупроводника создают в цепи ток, значение которого практически определяется только световым потоком Φ и приблизительно равно току короткого замыкания в генераторном режиме.

Фотодиоды широко применяются в промышленности: в вычислительной технике, регистрирующих и измерительных приборах, фотометрии, киноаппаратуре, системах автоматизации производственных процессов и т.д.

Фототранзистор – полупроводниковый прибор с двумя p-n-переходами, ток которого увеличивается за счёт подвижных носителей заряда, образующихся при облучении прибора светом.

По своей конструкции фототранзистор отличается от обычного транзистора только прозрачным окном в корпусе (рис. 2.31,а), через которое световой поток падает на пластину полупроводника, являющуюся базой фототранзистора (рис. 2.31,б).

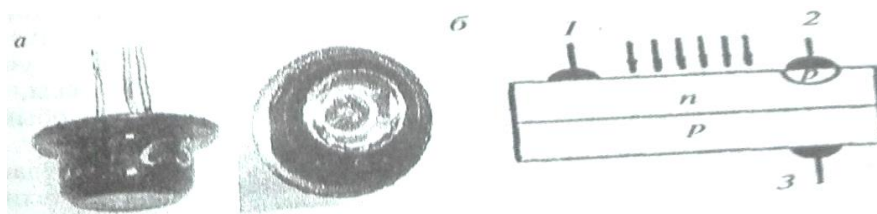


Рисунок 2.31 - Внешний вид (а) и устройства (б) фоторезистора: 1 – база; 2 – эмиттер; 3 – коллектор.

В центре базы расположен коллекторный переход, созданный путем наплавления. Возможны и другие варианты расположения электродов, например кольцеобразный коллектор на освещаемой поверхности базы (2.32).

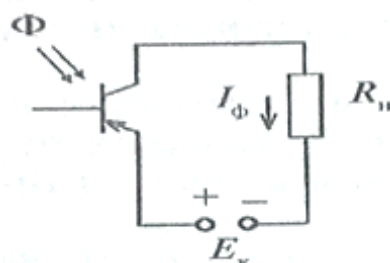


Рисунок 2.32 - Схема включения фототранзистора

Фототранзисторы широко применяются в различных областях: фототелеграфии, фототелефонной связи, вычислительной технике, регистрации видимого, инфракрасного и ультрафиолетового излучения.

Фототиристор – четырехслойный полупроводниковый прибор, управляемый световым потоком.

Как и в обычном тиристоре, в фототиристоре световой поток влияет на напряжение прямого включения. При попадании на одну из баз в ней происходит фотоионизация, и в результате образуются дополнительные носители заряда, которые способствуют открыванию фототиристора. Чем больше световой поток, тем меньше значение напряжения прямого включения требуется для открывания фототиристора.

Солнечные фотоэлементы (рис. 2.33) работают следующим образом.

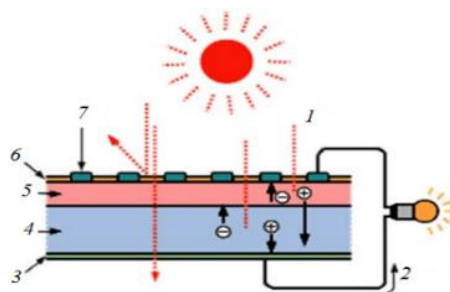


Рисунок 2.33 - Устройство солнечного фотоэлемента: 1 – свет; 2 – ток; 3 – внутренний электрод; 4 – Р-кремний (В -); 5 – N-кремний (Р+); 6 – антибликовое покрытие; 7 – внешний электрод.

На полупроводник n-типа, расположенный в верхнем слое структуры, падают солнечные лучи и выбивают электроны с их атомных орбит. За счет дополнительного энергетического импульса они переходят в полупроводник р-типа и формируют направленный поток. Ширину зоны перехода подбирают небольшой, чтобы электроны

смогли ее преодолеть. В физическом смысле такая двухслойная структура представляет собой электронный элемент для солнечных батарей, причем в роли катода выступает полупроводник n-типа, а в роли анода полупроводник p-типа. Для снятия фототока к полупроводниковым пластинам припаивают тонкие проводники и нагрузку.

В качестве полупроводников p- и n-типа применяют главным образом кремний с разными добавками. Кремний очень легко добывать и обрабатывать в промышленных масштабах без особых затрат. На основе кремния выпускаются элементы солнечных батарей трех типов: из поли-, монокристаллов и на тонких пленках.

Контрольные вопросы и задания

1. Перечислите какие приборы называются фотоэлектронными.
2. Объясните как устроен вакуумный фотоэлектронный прибор.
3. Поясните устройство и принцип действия фоторезистора.
4. Объясните какой полупроводниковый прибор называется фотодиодом. В каких режимах работают фотодиоды.
5. Расскажите как устроен фотодиод.
6. Назовите области применения полупроводниковых фотоприборов.

Тема 2.3 Электронные выпрямители

Назначение и применение электронных выпрямителей

Электронный выпрямитель (выпрямитель) - устройство, предназначенное для преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока.

Структурная схема выпрямителя представлена на рисунке 2.34.

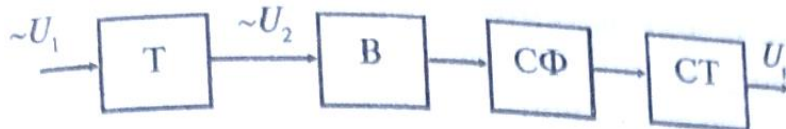


Рисунок 2.34 - Структурная схема выпрямителя

На вход выпрямителя из сети подается переменное напряжение U_1 , необходимое для питания нагрузки которое на первичную обмотку трансформатора Т. Со вторичной обмотки трансформатора снимается переменное напряжение $U_2 \neq U_1$, когда напряжение U_n нагрузки отличается от напряжения питающей сети U_1 , а также в случаях использования двухполупериодной схемы выпрямления со средней точкой. Напряжение U_2 поступает на один или несколько выпрямительных диодов В. Диоды являются основным элементом выпрямительного устройства, собственно выпрямителем, и преобразуют переменное напряжение в постоянное. Сглаживающий фильтр СФ применяют при необходимости улучшения формы выходного напряжения. В некоторых случаях режим работы нагрузки не допускает колебаний напряжения питания U_n и тогда в составе выпрямителя применяют стабилизаторы напряжения СТ.

Для питания нагрузки малой мощности применяют выпрямители, получающие питание от однофазной сети переменного тока (однофазные выпрямители). Для питания нагрузок средней и большой мощности используются выпрямители, получающие питание от трехфазной сети переменного тока (трехфазные выпрямители).

По принципу регулирования выпрямленного напряжения различают *управляемые* и *неуправляемые* выпрямители.

Схемы выпрямления однофазного тока

Для выпрямления однофазного тока применяются следующие схемы: однополупериодная; двухполупериодная со средней точкой; двухполупериодная мостовая.

Однополупериодная схема выпрямления однофазного тока представлена на рисунке 2.35

На первичную обмотку трансформатора Т1 поступает переменное напряжение сети $u_1 = U_1 m \sin \omega t$. С выхода вторичной обмотки трансформатора Т1 на выпрямительный диод VD1 подается переменное напряжение U_2 . Когда на верхнюю часть вторичной обмотки подаётся положительный полупериод переменного тока, на диод поступает прямое напряжение и диод пропускает электрический ток, а когда отрицательный - диод заперт и ток через него не проходит. Таким образом через нагрузку протекает пульсирующий прерывистый ток (рис. 2.36).

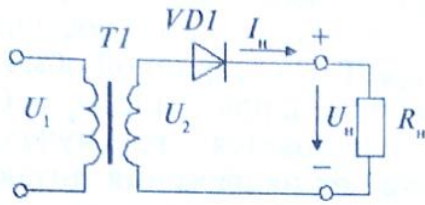


Рисунок 2.35 – Схема однополупериодного выпрямителя

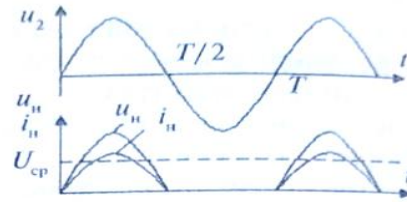


Рисунок 2.36 – Временные диаграммы напряжений и токов однополупериодного выпрямителя

Сопротивление R_d диода непостоянно: оно определяется крутизной вольт-амперной характеристики в каждой точке. Однако при включении последовательно с диодом нагрузки R_n , сопротивление этой цепи становится равным $R_d + R_n$ и характеристику можно считать линейной (динамическая характеристика).

Среднее за период значение тока, выпрямленного однополупериодным выпрямителем,

$$I_0 = \frac{I_m}{\pi},$$

где I_m - амплитуда тока.

Среднее постоянное напряжение на нагрузке

$$U_0 = I_0 R_n = \frac{U_m}{\pi} - I_0 R_d.$$

Без нагрузки ($I_1 = 0$) напряжение на зажимах выпрямителя будет равно среднему за период значению положительной волны синусоиды

$$U_0 = \frac{U_m}{\pi} = 0,318U_m = 0,45U,$$

где U - действующее значение переменного напряжения.

При увеличении тока нагрузки напряжение на ней уменьшается на величину падения напряжения на диоде.

Во время отрицательного полупериода, когда диод закрыт, он находится под напряжением вторичной обмотки трансформатора, поэтому наибольшее обратное напряжение, действующее на диод.

$$U_{обр} = U_m = \pi U_0.$$

Обратное напряжение на диоде более чем в 3 раза превышает выпрямленное напряжение на нагрузке.

Двухполупериодная схема выпрямления со средней точкой приведена рисунке 2.38. Трансформатор $T1$ выполнен с отводом от середины вторичной обмотки и является необходимым элементом данной схемы выпрямления.

$$I_0 = \frac{2I_m}{\pi};$$

$$U_0 = I_0 R_H = \frac{2U_m}{\pi} - I_0 R_d.$$

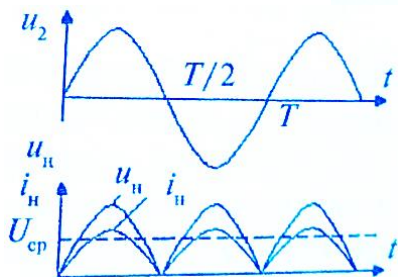


Рис.2.37. Временные диаграммы напряжений и токов двухполупериодного выпрямителя со средней точкой

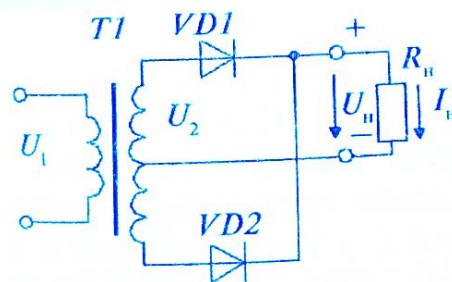


Рис. 2.38. Схема двухполупериодного выпрямителя со средней точкой

При отсутствии нагрузки напряжение на выходе двухполупериодного выпрямителя вдвое больше напряжения на выходе однополупериодного выпрямителя.

В двухполупериодной схеме максимальное обратное напряжение, действующее на каждый диод, находящийся в закрытом состоянии, равно сумме амплитуд напряжений обеих половин вторичной обмотки:

$$U_{обр} = 2U_m = 2 \frac{\pi U_0}{2} = \pi U_0 = 3,14 U_0.$$

Ток, протекающий через каждый диод, равен

$$I_d = \frac{I_m}{2} = \frac{\pi I_0}{4} = 0,785 I_0,$$

т.е по сравнению с однополупериодной в двухполупериодной схеме через каждый диод протекает вдвое меньший ток. Коэффициент пульсаций двухполупериодной схеме значительно ниже. Двухполупериодная схема довольно часто используется на практике.

Двухполупериодная мостовая схема выпрямления состоит из четырех диодов (рис.2.39).

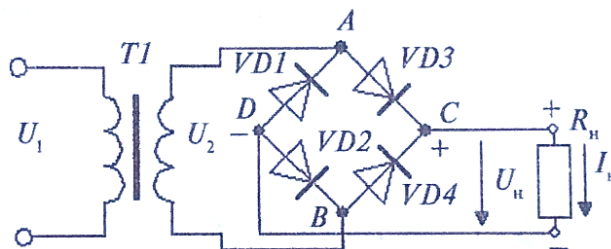


Рисунок 2.39 - Схема двухполупериодного мостового выпрямителя

Диагональ АВ моста подключена к вторичной обмотке трансформатора Т1, а диагональ CD - к нагрузке. Полярность напряжения на вторичной обмотке изменяется каждую половину периода, в результате чего при более высоком потенциале точки

A(+) по сравнению с потенциалом точки B(-) ток проходит в течение полупериода по пути $A \rightarrow VD \rightarrow R_H \rightarrow D \rightarrow VD3 \rightarrow B \rightarrow A$, а в следующий полупериод по пути $B \rightarrow VD2 \rightarrow C \rightarrow R_H \rightarrow D \rightarrow VD4 \rightarrow A \rightarrow B$.

Таким образом, выпрямленный ток идет через нагрузку R_H в течение всего периода переменного тока, поэтому мостовая схема является двухполупериодной. При отсутствии нагрузки напряжение на выходе выпрямителя.

$$U_0 = \frac{2U_m}{\pi}$$

Особенностью мостовой схемы является отсутствие во вторичной обработке трансформатора отвода от ее середины, поэтому для получения одного и того же значения выпрямленного напряжения мостовой схеме требуется обмотка с вдвое меньшим числом витков. Вследствие этого обратное напряжение, действующее на каждый диод, 2 раза меньше, чем в схеме со средней точкой.

$$U_{обр} = U_m = 1,57U_0$$

Действующее значение тока, протекающего через диод:

$$I = \frac{\pi I_0}{4} = 0,785I_0$$

В мостовой схеме ток через каждый диод идет только в течение одного полупериода, тогда как через вторичную обмотку трансформатора - в течение всего периода.

Действующее значение тока, протекающего через вторичную обмотку.

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{\pi I_0}{2\sqrt{2}} = 1,11I_0$$

Частота пульсаций и коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения в мостовой схеме такие же, как и в схеме со средней точкой.

Трехфазные выпрямители

Простейшая трехфазная схема выпрямления тока с нейтральной точкой приведена на рисунке 2.40.

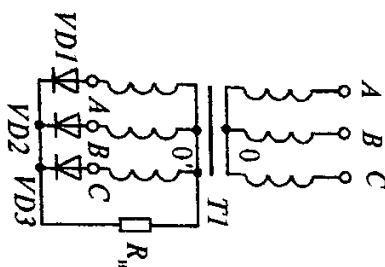


Рисунок 2.40 - Схема трехфазного выпрямителя

На схеме первичные обмотки трехфазного трансформатора Т1 соединяются «звездой» или «треугольником», а вторичные - «звездой». В каждую вторичную обмотку включено по диоду. В этом случае в каждый момент выпрямленный ток проходит только через тот диод, анод которого соединен с зажимом обмотки, имеющим наибольший положительный потенциал по отношению к нейтральной точке трансформатора 0, поэтому выпрямленное напряжение будет изменяться по кривой, которая огибает положительные полуволны фазных напряжений вторичных обмоток трансформатора (рис. 2.41)

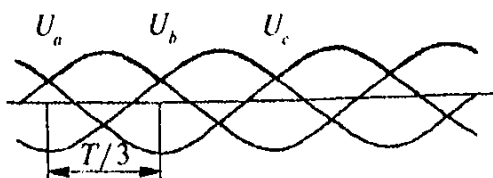


Рисунок 2.41 - Временная диаграмма выпрямленного напряжения

Переключение диодов VD1-VD3 происходит в моменты, соответствующие пересечению положительных полусинусоид напряжения. В нагрузке R, токи, проходящие через три диода, суммируются.

Среднее значение выпрямленного напряжения в этой схеме.

$$U_0 = 1,17U_{\phi}.$$

Среднее за период значение выпрямленного тока, проходящего через каждый диод

$$I_d = I_0/3.$$

Обратное напряжение, действующее на каждый диод, равно амплитуде линейного напряжения, действующего в системе вторичных обмоток трансформатора, соединенных «звездой», поскольку диоды подключены анодами к каждой из фаз, а катодами - к другой фазе через открытый диод:

$$U_{обр} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2}U_{\phi} = 2,09U_0.$$

Трехфазную схему выпрямления с нейтральной точкой применяют только в мало-мощных силовых установках.

Мостовая трехфазная схема выпрямления переменного тока (схема Ларионова) приведена на рисунке 2.42. В ней сочетаются принципы мостовой схемы и схемы многофазного выпрямления. На схеме нулевая точка трансформатора для выпрямления не нужна, и поэтому первичные и вторичные обмотки могут быть соединены как «звездой», так и «треугольником».

Шесть диодов образуют две группы - нечетную (VD1, VD3 и VD5) и четную (VD2, VD4, VD6). У нечетной группы катоды соединены вместе и служат точкой ввода выпрямителя с положительным потенциалом, а у четной группы аноды соединены вместе и служат точкой вывода с отрицательным потенциалом. При работе этой схемы вы-

прямяются обе полуволны переменных напряжений всех вторичных обмоток трансформатора, благодаря чему пульсации выпрямленного напряжения значительно уменьшаются.

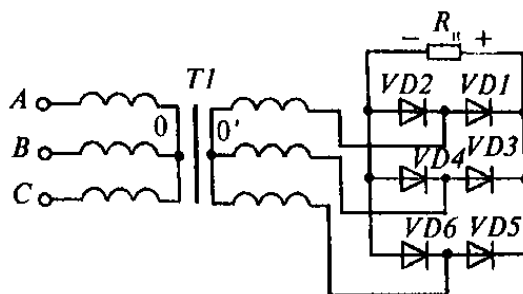


Рисунок 2.42 - Схема трехфазного мостового выпрямителя

В схеме на 2.42 в каждый момент работает тот диод нечетной группы, у которого анод в этот момент имеет наибольший положительный потенциал, а вместе с ним тот диод четной группы, у которого катод имеет наибольший по абсолютной величине отрицательный потенциал. Выпрямленное напряжение будет изменяться по кривой, огибающей двойной частотой пульсаций (рис. 2.43).

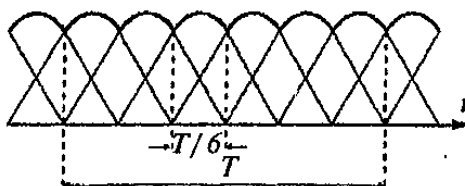


Рисунок 2.43 - Временная диаграмма напряжения, выпрямленного по трехфазной схеме выпрямления

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_0 = 1,35 U_{л} = 2,34 U_{\phi}.$$

Средний ток через диода равен

$$I_d = I_0 / 3,$$

причем этот ток проходит через два последовательно включенных диода.

Обратное напряжение, действующее на каждый диод, также равно амплитудному значению линейного напряжения

$$U_{обр} = \sqrt{2} U_{л} = \sqrt{6} U_{\phi} = 1,045 U_0.$$

В мощных выпрямителях в основном используется мостовая трехфазная схема. Она получила широкое применение в управляемых выпрямителях, в которых, регулируя моменты открывания и закрывания диодов (тиристоров), можно в широких пределах регулировать среднее значение выпрямленного тока.

Управляемые выпрямители

В рассмотренных ранее схемах выпрямителей регулирование выпрямленного напряжения и тока можно осуществлять с помощью автотрансформатора (в цепи переменного тока) или с помощью потенциометра и реостата. Данные способы управления имеют существенные недостатки :

- низкий КПД из-за значительных потерь в регулировочных устройствах;
- невозможность применять современные схемы автоматического регулирования;

В настоящее время широко распространены выпрямители с управляемыми тиристорами.

Отличие заключается в том, что диод VD1 заменен тиристором VS1 и схема содержит блок управления БУ. В схеме с тиристором диод открывается только при подаче на него управляющего импульса от блока управления БУ. Из рисунка 2.50 видно, что начало действия управляющего импульса i_u сдвинуто во времени на t_u относительно начала периода напряжения u_2 и ток в нагрузке проходит в течение времени $T/2 - t_u$. Следовательно, уменьшается среднее значение тока $I_{cp.y.}$ по сравнению со средним значением тока I_{cp0} при действии I_y в начале периода.

Сглаживающие фильтры

Отношение максимального значения переменной составляющей напряжения на выходе выпрямителя U_{2m} к значению постоянной составляющей называется *коэффициентом пульсаций*:

$$k = U_{2m} / U_0.$$

Пульсирующее напряжение оказывает вредное влияние, нарушая нормальную работу устройств, для питания которых требуется постоянное напряжение. Для нормальной работы радиоэлектронной аппаратуры от выпрямленного напряжения необходимо, чтобы значение коэффициента пульсаций составляло около 10 в минус 5 степени — 10 в минус 2 степени.

Устранение пульсаций осуществляется применением сглаживающих фильтров.

Сглаживающий фильтр состоит из реактивных элементов: конденсаторов и катушек индуктивности (дресселей).

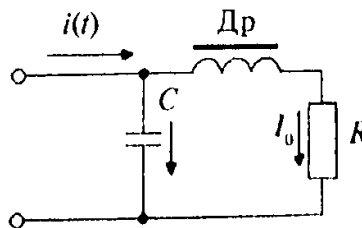


Рисунок 2.44 - Схема Г-образного LC – фильтра

Физическая сущность работы в фильтре конденсатора и дросселя состоит в том, что конденсатор (обычно большой емкости), подключенный параллельно нагрузке, заряжается при нарастании импульсов выпрямленного напряжения и разряжается при и

убывании, сглаживая тем самым его пульсации. Дроссель, наоборот, при нарастании импульсов выпрямленного тока в результате действия ЭДС самоиндукции задерживает рост тока, а убывании импульсов задерживает его убывание, сглаживая пульсации тока в цепи нагрузки. С другой стороны, конденсатор и дроссель можно рассматривать как резервуары энергии. Они запасают ее, когда ток в цепи нагрузки превышает среднее значение, и отдают, когда ток стремится уменьшиться ниже среднего значения. Это и приводит к сглаживанию пульсаций. Рассмотрим несколько подробнее ёмкостный фильтр, в котором на выходе двухполупериодного выпрямителя параллельно нагрузке R_n включен конденсатор C (рис. 2.45).

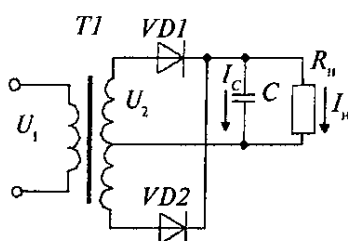


Рисунок 2.45 - Схема двухполупериодного выпрямителя с С-фильтром

При возрастании выпрямленного напряжения (при открытом диоде VD1) конденсатор зарядится (рис. 2.46), а при убывании выпрямленного напряжения полярность напряжения на диоде изменится на противоположную и диод закроется, отключив вторичную обмотку трансформатора от нагрузки. Ток через диод будет иметь форму короткого импульса.

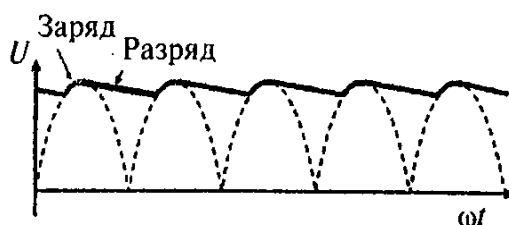


Рисунок 2.46 - Заряд и разряд конденсатора в течение периода

Когда входной сигнал начинает падать в отрицательном направлении, конденсатор разряжается через нагрузку. Скорость разряда конденсатора зависит от постоянной времени RC , а следовательно от сопротивления нагрузки. Постоянная времени разряда велика по сравнению с периодом переменного тока, следовательно, период заканчивается раньше, чем конденсатор может разрядиться, поэтому после первой четверти периода ток через нагрузку поддерживается разряжающимся конденсатором. Как только конденсатор начинает разряжаться, напряжение на нем уменьшается. Однако до того как конденсатор полностью разрядится, начнется следующий период синусоиды. На аноде диода опять появится положительный потенциал, что позволит ему проводить ток. Конденсатор зарядится снова, и цикл повторится. В результате пульсации напряжения сгладятся и выходное напряжение фактически повысится.

Ёмкость конденсатора можно определить по упрощённым формулам:

- Для однополупериодной схемы выпрямления $C = \frac{10^6}{U_o f p}$;
- Для двухполупериодной схемы выпрямления $C = \frac{10^6}{2U_o f p}$,

где f — частота напряжения в питающей сети.

Наиболее распространенными сглаживающими фильтрами в выпрямителях электронных приборов являются П-образные CLC-фильтры (рис. 2.47, а).

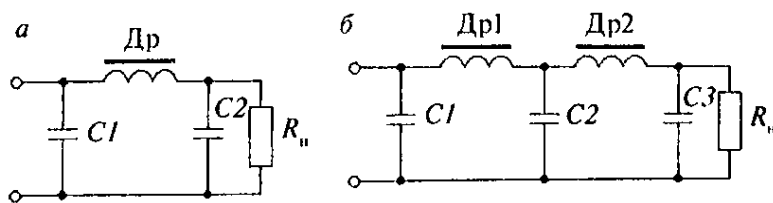


Рисунок 2.47 - Сглаживающие фильтры:
а – П-образный CLC-фильтр; б – многозвенный фильтр.

В П-образных с LC-фильтрах постоянная составляющая выпрямленного тока, свободно проходящая через дроссель D_r , попадает затем в нагрузку и замыкается через трансформатор. Переменные составляющие, замыкаясь через большие ёмкости C_1 и C_2 , в нагрузку не проходят. Во многих случаях дроссель заменяют резистором, что несколько снижает качество фильтрации, но зато значительно удешевляет фильтр. В наиболее ответственных случаях сглаживающий фильтр делают многозвенным, состоящим из нескольких П-образных или Г-образных LC- или RC фильтров (см. рис. 2.54, б.). В П-образных CLC – фильтрах постоянная составляющая выпрямленного тока, свободно проходящая через дроссель D_r , попадает затем в нагрузку и замыкается через трансформатор. Переменные составляющие, замыкаясь через большие ёмкости C_1 и C_2 , в нагрузку не проходят. Во многих случаях дроссель заменяют резистором, что несколько снижает качество фильтрации, но зато значительно удешевляет фильтр. В наиболее ответственных случаях сглаживающий фильтр делают многозвенным, состоящим из нескольких П-образных или Г-образных LC- или RC-фильтров (см.рис. 2.54, б).

Контрольные вопросы и задания

1. Опишите назначение электронного выпрямителя. Поясните структурную схему выпрямителя.
2. Поясните выпрямительные переменного тока с использованием однополупериодной схемы.
3. Объясните как работает однополупериодный управляемый выпрямитель.
4. Расскажите о применении сглаживающих фильтров. Перечислите элементы сглаживающих фильтров.
5. Перечислите схемы сглаживающих фильтров.

Тема 2.4 Электронные усилители

Назначение и классификация электронных усилителей

Электронный усилитель — электронное устройство, предназначенное для увеличения параметров электрического сигнала.

Назначение электронных усилителей в основном заключается в обеспечении заданной мощности на выходном устройстве путем усиления входного сигнала.

Наибольшее распространение в промышленной электронике получили усилители низкой частоты (УНЧ). УНЧ предназначены для усиления сигналов, находящихся в пределах воспринимаемого человеком звукового диапазона частот (20-20000 Гц), поэтому их часто называют усилителями звуковой частоты (УЗЧ).

Классификация электронных усилителей осуществляется по следующим признакам: по способу выполнения: ламповые, транзисторные, в виде интегральных микросхем; по структурной схеме: однокаскадные, многокаскадные; по способу включения транзисторного усилителя: схемы с общим эмиттером, общим коллектором; по частоте усиливаемого сигнала: усилители постоянного тока, звуковых частот, высокочастотные, сверхвысоких частот, широкополосные, узкополосные (резонансные).

Коэффициент усиления усилителя

Коэффициент усиления — это отношение величины усиленного выходного сигнала к величине входного сигнала, т. е. показатель того, во сколько раз выходной сигнал больше входного.

Коэффициент усиления является одной из основных характеристик электронного усилителя. В зависимости от вида усиливаемой величины различают коэффициенты усиления по напряжению, току или мощности усиливаемого сигнала, которые обозначаются K_U , K_I , и K_P соответственно. Коэффициент усиления по напряжению определяется по формуле

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$$

Если усилитель имеет несколько каскадов усиления, то для определения коэффициента усиления используется формула

$$K = K_1 K_2 \dots K_n$$

где K_1, K_2, \dots, K_n — коэффициенты усиления соответствующих каскадов.

Усилительный каскад УНЧ

Для изучения принципа работы УНЧ рассмотрим предварительный каскад, собранный на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером (рис.2.48). Схема с общим эмиттером используется чаще всего, так как для нее коэффициенты усиления по напряжению, току и мощности больше единицы.

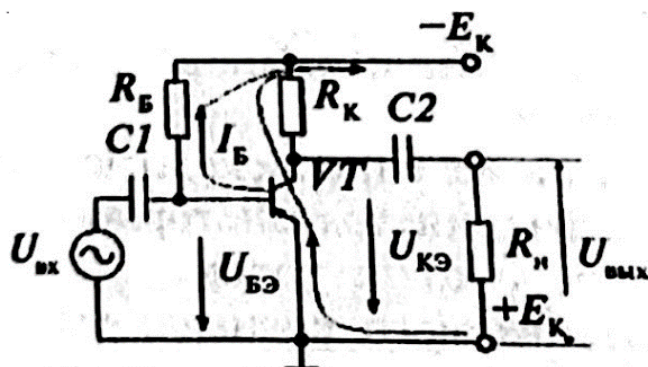


Рисунок 2.48 - Схема усилителя с общим эмиттером

Для преобразования изменений коллекторного тока, возникающих под действием входных сигналов, в изменяющееся напряжение в коллекторную цепь транзистора включена нагрузка. При усилении переменных электрических сигналов между базой и эмиттером транзистора нужно включить источник постоянного напряжения, называемый обычно источником смещения. С помощью этого источника устанавливается режим работы транзистора, который характеризуется протеканием через его электроды при отсутствии входного электрического сигнала некоторых постоянных токов эмиттера, коллектора и базы. Применение дополнительного источника увеличивает размеры всего устройства, его массу и усложняет конструкцию, но можно обойтись и одним источником, применяемым для питания коллекторной цепи транзистора. Именно такая схема приведена на рисунке 2.48.

В этой схеме нагрузкой усилителя является резистор R_K , а используя резистор R_B , задают необходимый ток базы транзистора. Если режим работы транзистора задан (при этом часто говорят, что задана рабочая точка на характеристиках транзистора), становятся известными ток базы и напряжение $U_{БЭ}$, а сопротивление резистора R_B , обеспечивающего этот ток, можно определить по формуле

$$R_B = \frac{E_K - U_{БЭ}}{I_B}$$

Так как $U_{БЭ}$ обычно составляет не более 0,2—0,3 В для германиевых транзисторов и 0,6—0,8 В — для кремниевых, а напряжение E_K измеряется единицами или даже десятками вольт, то $U_{БЭ} \ll E_K$ и можно записать:

$$R_B \approx E_K / I_B$$

Из этого следует, что независимо от типа транзистора VT ток его базы будет постоянным:

$$I_B \approx E_K / R_B$$

поэтому такая схема получила название **схемы с общим эмиттером** и фиксированным током базы. Режим работы транзистора в усилительном каскаде при постоянных токах и напряжениях его электродов называют исходным или режимом покоя.

Включение нагрузки в коллекторную цепь транзистора приводит к падению напряжения на сопротивлении нагрузки, равному произведению $I_K R_K$.

В результате напряжение, действующее между коллектором и эмиттером $U_{кэ}$ транзистора, оказывается меньше, чем напряжение U_K источника питания на величину падения напряжения на сопротивлении нагрузки, т. е.

$$U_{кэ} = E_K - I_K R_K$$

Если эту зависимость отобразить графически на семействе статических выходных характеристик транзистора, то она будет иметь вид прямой линии. для ее построения достаточно определить всего две принадлежащие ей точки (так как через две точки можно провести только одну прямую). Каждая точка должна быть задана двумя координатами: I_K и $U_{кэ}$.

Задав конкретное значение одной из координат, определяют вторую координату, решая уравнение. Прямая, построенная в соответствии с данным уравнением на семействе статических выходных характеристик транзистора, называется нагрузочной прямой.

Нагрузочная прямая, приведенная на рисунке 2.49, а, построена для случая, когда $E_K = 10$ В и $R_K = 200$ Ом.

1-я точка: $I_K = 0$; $U_{кэ} = E_K - 0 \times R_K = E_K = 10$ В

2-я точка: $I_K = 30$ мА; $U_{кэ} = 10 - 30 \times 10^{-3} \times 200 = 10 - 6 = 4$ (В).

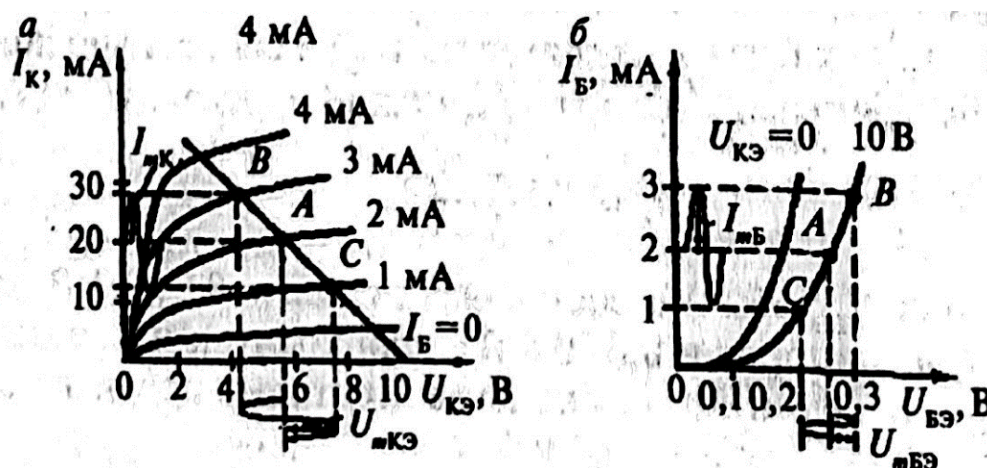


Рисунок 2.49 - Статические входные (а) и выходные (б) характеристики транзистора

Если в исходном режиме (режиме покоя) ток базы равен 2 мА, этот режим будет определяться точкой А, лежащей на нагрузочной прямой в месте пересечения ее со статической выходной характеристикой, полученной при $I_B = 2$ мА. При этом $I_{к0} = 20$ мА; $U_{кэ0} = 5,8$ В. Если перенести точку А на семейство входных характеристик (рис.. 2.49, б), можно найти $U_{бэ0} / U_{бэ0} = 0,25$ В.

Точки В и С можно перенести на семейство выходных характеристик. Они будут находиться в местах пересечения нагрузочной характеристики со статическими, полученными при токах базы, равных 1 и 3 мА. Из рисунка 2.56, б следует, что в режиме с нагрузкой появилась переменная составляющая коллекторного напряжения. Таким образом, коллекторное напряжение не остается постоянным, а изменяется синхронно с изменениями входного напряжения, причем изменение коллекторного напряжения $\Delta U_{кэ} = 7,5 - 4,3 = 3,2$ В оказывается больше изменения входного напряжения $U_{бэ} = 0,3 - 0,2 = 0,1$ В в 32 раза, т. е. получено усиление входного напряжения в 32 раза.

Поскольку напряжение источника питания E_K постоянное, изменение коллекторного напряжения равно изменению напряжения на резисторе коллекторной нагрузки, т. е.

$$\Delta U_{KЭ} = \Delta I_K R_K$$

Чем больше сопротивление резистора R_K , тем сильнее изменяется на нем напряжение и тем больше будет усиление. Однако увеличивать сопротивление резистора R_K можно только до некоторого предела, превышение которого может привести к снижению усиления и появлению больших искажений усиливаемого сигнала.

В усилителе, схема которого приведена на рисунке 2.55, режим работы транзистора определяется током базы, который устанавливается резистором R_B .

Многокаскадные усилители

На практике в устройствах промышленной электроники в большинстве случаев для получения необходимо полезно выходной мощности в нагрузке одного каскада недостаточно. Поэтому применяют многокаскадные усилители, собираемые из нескольких последовательно соединенных одиночных усилительных каскадов. В качестве примера на рисунке 2.50 представлена схема двухкаскадного усилителя.

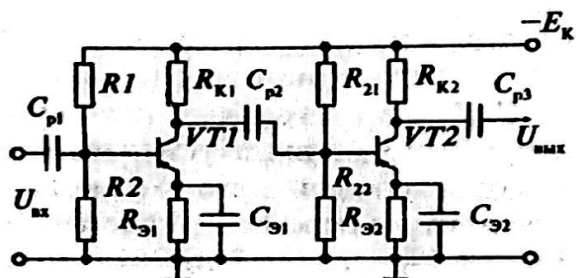


Рисунок 2.50 - Схема двухкаскадного усилителя

Напряжение усиливаемого сигнала $U_{вх}$ через разделительный $C_{р1}$ конденсатор поступает на базу транзистора $VT1$. Делитель напряжения $R1-R2$ устанавливает напряжение покоя на участке база-эмиттер первого каскада. Цепь $R_{з1}-C_{з1}$ составляет цепь отрицательной обратной связи по току питания и обеспечивает его стабилизацию. Усиленное по амплитуде напряжение поступает через разделительный конденсатор $C_{р2}$ не пропускающий постоянную составляющую коллекторного напряжения первого каскада, на базу транзистора $VT2$. Вход последующего (второго) каскада оказывается не согласованным с выходом предыдущего. Для согласования применяют трансформаторную связь, при которой обеспечивается максимально возможная мощность на входе последующего каскада (рис.2.51).

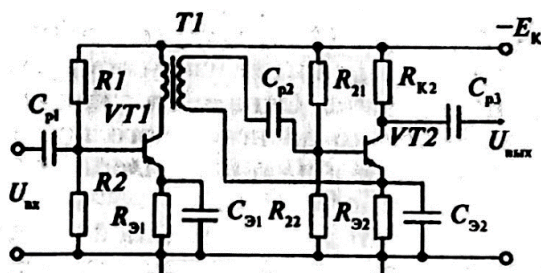


Рисунок 2.51 - Схема двухкаскадного усилителя с трансформаторной связью

В ряде устройств автоматического контроля неэлектрические величины для измерения и регулирования необходимо преобразовать в электрические медленно меняющиеся токи и напряжения частотой не более 1 Гц. Так как усиление таких медленно меняющихся сигналов с помощью обычных УНЧ с емкостной или трансформаторной связью невозможно, применяют специальные усилители с гальванической связью между каскадами – *усилители постоянного тока* (УПТ). На вход УПТ подают сигналы порядка долей милливольт. Для усиления таких слабых сигналов приходится применять многокаскадный УПТ.

Усилитель прямого усиления (рис. 2.52) состоит из трех каскадов.

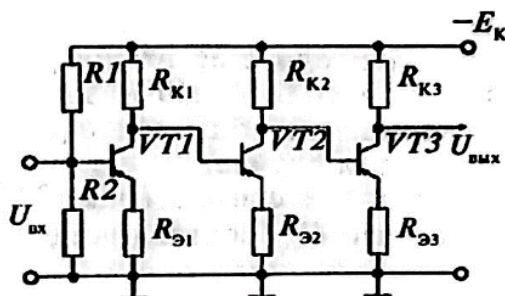


Рисунок 2.52 - Схема трехкаскадного УПТ прямого усиления

Компенсация постоянного напряжения предыдущего каскада обеспечивается постоянным напряжением, которое снимается с резистора $R_э$ в эмиттерной цепи последующего каскада. В частности, сопротивление резисторов $R_э2$ и $R_э3$ выбирают таким, чтобы напряжения база — эмиттер транзисторов VT2 и VT3 обеспечивали нормальный режим работы.

Режим покоя транзистора VT1 определяется напряжением делителя $R_1—R_2$, а также напряжением на $R_э1$.

Резисторы $R_э1—R_э2$ обеспечивают также отрицательную обратную связь по току. Данная связь по постоянной составляющей тока полезна с точки зрения уменьшения дрейфа нуля усилителя.

Дрейф нуля - это изменение выходного напряжения усилителя, не связанное с изменением входного напряжения. Дрейф может быть вызван изменением напряжения источника питания, температуры окружающей среды, параметров схемы и т. д. Напряжение дрейфа соизмеримо с напряжением сигнала и поэтому вызывает его недопустимые искажения. Для устранения дрейфа необходимо стабилизировать напряжение источников питания, использовать отрицательные обратные связи, а также специально подбирать детали и элементы схемы УПТ. Наиболее эффективным методом при этом является применение в УПТ схем с преобразованием постоянного напряжения в переменное.

Обратные связи усилителя

Обратной связью в усилителях называется воздействие выходной цепи усилителя на ее входную цепь. Электрическая цепь, соединяющая выход усилителя с ее входом, называется *цепью обратной связи* (ЦОС). Обратная связь называется *положительной*, если она вызывает увеличение общего коэффициента усиления, и *отрицательной* в противном случае.

В усилителях с обратной связью (рис. 2.60) на вход подается напряжение обратной связи $U_{o.c}$, составляющее часть выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$. Отношение

$$\beta = \frac{U_{o.c}}{U_{\text{ВЫХ}}}$$

называется коэффициент обратной связи.

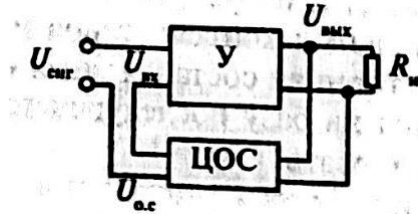


Рисунок 2.53 - Усилитель с обратной связью

В усилителе с обратной связью входное напряжение состоит из суммы напряжения сигнала и напряжения обратной связи

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{СИГ}} + U_{o.c}$$

Приняв во внимание, что коэффициент усиления усилителя без обратной связи

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$$

а при наличии обратной связи

$$K_{o.c} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{СИГ}}}$$

Следовательно:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{СИГ}} + U_{o.c} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{K_{o.c}} + \beta U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}} \left(\frac{1}{K_{o.c}} + \beta \right)$$

Таким образом коэффициент усиления усилителя с обратной связью:

$$K_{o.c} = \frac{1}{1 - \beta K}$$

При $\beta K = 1$ положительная обратная связь называется *критической*, так как коэффициент усиления усилителя становится равным бесконечности ($K_{o.c} = \infty$) и усилитель переходит на генераторный режим работы, при котором на выходе может быть напряжение даже при отсутствии входного напряжения.

Коэффициент усиления усилителя с отрицательной обратной связью меньше коэффициента усиления усилителя без отрицательной обратной связи.

Отрицательная обратная связь улучшает характеристики и, в частности, уменьшает частотные и фазовые искажения усилителя.

Усилитель мощности

Усилитель мощности обеспечивает заданную мощность в нагрузке и является **выходным каскадом усилителя**. На вход усилителя мощности поступает сигнал, максимально усиленный входным и предварительными каскадами, что обуславливает большое потребление мощности от источника питания. По этой причине КПД и уровень нелинейных искажений являются существенными показателями и определяют выбор начального смещения. Максимальная мощность при нагрузке достигается в том случае, когда сопротивление нагрузки и выходное сопротивление каскада будут равны.

Выходные каскады выполняются двух типов: одно- и двухтактные. Однотактные выходные каскады применяются в схемах маломощной нагрузкой. Их КПД составляет не более 40 %. В двухтактных схемах КПД может достигать 70 % при вполне удовлетворительном уровне нелинейных искажений.

Схема **однотактного выходного каскада с общим коллектором** приведено на рисунке 2.54.

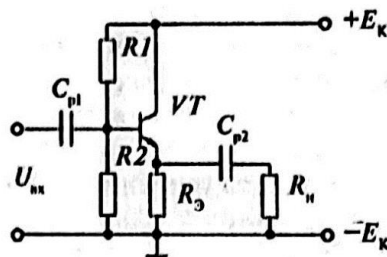


Рисунок 2.54 - Схема выходного каскада с общим коллектором

В представленной схеме функции линейного элемента главной цепи усилителя выполняет резистор R_3 , включенный в эмиттерную цепь транзистора VT. Для переменного тока сопротивление источника питания E_K имеет небольшое значение, поэтому вывод коллектора транзистора VT можно соединить с общей (заземленной) точкой схемы.

Величина тока в главной цепи усилителя прямо пропорциональна величине входного сигнала. Отличительная особенность данной схемы в том, что при увеличении тока в главной цепи увеличивается напряжение на резисторе $R_н$, а следовательно, увеличивается $U_{\text{вых}}$. Напряжение усиливаемого сигнала $U_{\text{вх}}$ уравнивается падением напряжения на резисторе R_3 (U_{R3}) и на эмиттерном переходе транзистора $U_{\text{БЭ}}$, т. е.

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{БЭ}} + U_R$$

Переменная составляющая выходного напряжения снимается с резистора R_3 , следовательно,

$$U_{\text{вых}} = U_{R3} = U_{\text{вх}} - U_{\text{БЭ}}$$

Численное значение $U_{\text{БЭ}}$ по сравнению с U_{R3} мало, поэтому можно считать $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}$. Отсюда следует, что

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} < 1$$

В приведенной схеме выходное напряжение повторяет входное, поэтому ее часто называют *эмиттерным повторителем*.

Коэффициент усиления по току $K_I \geq 1$, а коэффициент усиления по мощности $K_P \approx K_r$.

Схема *однотактного каскада с трансформаторной связью* приведена на рисунке 2.62.

Роль линейного элемента выполняет трансформатор Т, первичная обмотка w_1 которой включена в коллекторную цепь транзистора VT. При отсутствии во входной цепи переменного сигнала в главной цепи усилителя от положительного полюса источника питания $+E_K$ к отрицательному полюсу $-E_K$ через первичную обмотку w_1 трансформатора Т и транзистор VT протекает только ток начального смещения I_{KH} .

Сопротивление первичной обмотки трансформатора постоянному току мало, поэтому в режиме покоя почти все напряжение источника E_K приложено к транзистору. Линия нагрузки $m-n$ по постоянному току направлена почти вертикально (рис. 2.56).

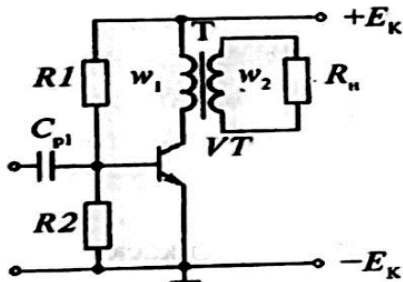


Рисунок 2.55 - Схема выходного каскада с трансформаторной связью

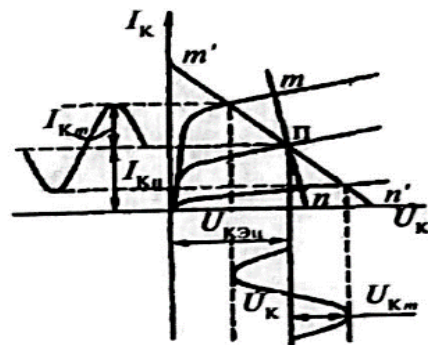


Рисунок 2.56 - Вольт-амперные характеристики и нагрузочная прямая

При наличии переменного сигнала в главной цепи возникает переменный ток, который трансформируется во вторичную обмотку w_2 . Для переменного тока сопротивление в коллекторной цепи велико и определяется выражением

$$R'_n = k^2 R_n$$

где $k = w_1/w_2$ — коэффициент трансформации трансформатора Т.

Линия нагрузки по переменному току займет положение $m'-n'$, а ее пересечение с вольт-амперными характеристиками транзистора определит переменные составляющие тока и напряжения в выходной цепи. На рисунке 2.63 показан характер изменения тока I_K и напряжения $U_{КЭ}$ в выходной цепи при синусоидальном входном сигнале.

Ток в нагрузке R_n определяется значением коэффициента трансформации. Режим согласования каскада с нагрузкой обеспечивается, если

$$R_{\text{ВЫХ}} = k^2 R_n$$

Коэффициент трансформации k трансформатора по формуле:

$$k = \sqrt{R_{\text{ВЫХ}} / R_{\text{Н}}}$$

На рисунке 2.57 приведена схема бестрансформаторного двухтактного каскада. В схеме, рассмотренной на рисунке 2.55, трансформатор является неотъемлемым элементом. По массе и габаритам он значительно превосходит совокупность всех остальных элементов схемы. Однако изготовление трансформатора по интегральной технологии невозможно, поэтому в настоящее время наибольшее распространение получили бестрансформаторные схемы.

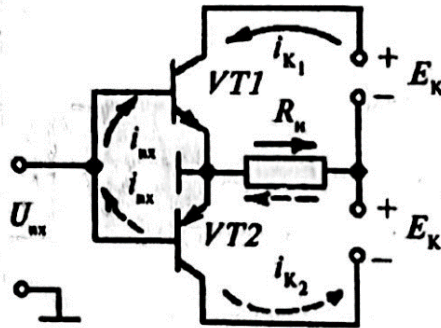


Рисунок 2.57 - Схема двухтактного бестрансформаторного каскада

Отличительной особенностью схемы бестрансформаторного двухтактного каскада является наличие двух источников питания и транзисторов с различным типом проводимости. Параметры радиоэлектронных компонентов цепи подбираются таким образом, чтобы при отсутствии входного сигнала транзисторы были закрыты и ток в нагрузке отсутствовал.

При наличии синусоидального входного сигнала во входной и выходной цепях усилителя протекают незначительные постоянные токи смещения, величиной которых можно пренебречь. При наличии синусоидального входного сигнала в течение первого положительного полупериода открыт транзистор VT1, а в второго, отрицательного полупериода — транзистор VT2. Направления тока при нагрузке, а также во входных и выходных контурах показаны на рисунке 2.56.

Контрольные вопросы и задания

1. Объясните для чего предназначен электронный усилитель. Что является источниками входного сигнала.
2. Приведите классификацию электронных усилителей по способу выполнения.
3. Приведите классификацию электронных усилителей по структурной схеме.
4. Дайте понятие коэффициента усиления.
5. Поясните работу предварительного каскада на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером.
6. Поясните работу однотактного выходного каскада с общим коллектором.
7. Поясните работу бестрансформаторного двухтактного каскада.

Тема 2.5. Электронные генераторы и приборы отображения информации

Назначение и классификация электронных генераторов

Электронный генератор – это электронное устройство, предназначенное для преобразования энергии источника постоянного тока в энергию переменного тока (электромагнитных колебаний) различной формы требуемой частоты и мощности.

На рисунке 2.58 приведена структурная схема электронного генератора.

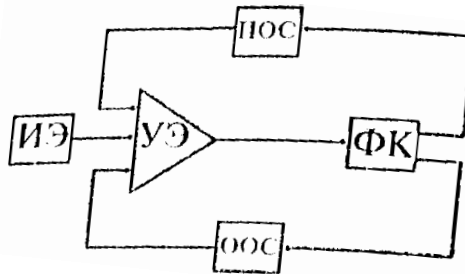


Рисунок 2.58 - Структурная схема электронного генератора

Генератор является замкнутой системой, состоящей из источника энергии (ИЭ), усилительного элемента (УЭ), формирователя колебаний (ФК), цепей положительной обратной связи (ПОС) и отрицательной обратной связи (ООС). Источником энергии служат стабилизированный выпрямитель постоянного тока или батарея химических элементов. В качестве усилительного элемента используются электронные лампы (в настоящее время применяются редко), транзисторы и другие нелинейные элементы. Формирователями колебаний являются усилительные элементы в сочетании с резонансными LC-контурами или фазирующими RC-цепями. Цепь положительной обратной связи обеспечивает автоколебательный режим работы цепи генератора. Отрицательная обратная связь осуществляет стабилизацию параметров усилительного элемента и улучшает его характеристики.

Классификация электронных генераторов осуществляется по следующим признакам:

- **по форме выходных сигналов:** синусоидальных сигналов; сигналов прямоугольной формы (мультивибраторы); сигналов линейно измеряющегося напряжения или генераторы пилообразного напряжения); сигналов специальной формы;
- **частоте генерируемых колебаний(условно):** низкой частоты (до 100 кГц); высокой частоты (свыше 100 кГц);
- **способу возбуждения:** с независимым (внешним) возбуждением; с самовозбуждением (автогенераторы).

Генераторы синусоидальных колебаний

Генераторы синусоидальных колебаний генерируют напряжение синусоидальной формы. Они классифицируются согласно частотозадающим компонентам. Различают три основных типа генераторов синусоидальных колебаний: LC-генераторы, кварцевые генераторы и RC-генераторы.

LC-генераторы. Наиболее распространенный способ получения высокочастотных синусоидальных колебаний – это применение генератора,

стабилизированного LC -контуром, в котором данный контур, настроенный на определенную частоту, подключен к усилительной схеме, чтобы обеспечить необходимое усиление на его резонансной частоте. Цепь положительной обратной связи обеспечивает поддержание колебаний на резонансной частоте, т.е. колебания генерируются автоматически за счет пополнения энергии, которую затрачивает формирователь колебаний. Генерация колебаний возникает и поддерживается при соблюдении следующих условий:

- произведение коэффициента усиления на коэффициент обратной связи должно быть равным единице;
- фаза колебаний на выходе цепи обратной связи должна совпадать с фазой колебаний на входе усилительного элемента, а суммарный сдвиг фазы, создаваемый усилителем и цепью обратной связи, равен нулю.

LC -генераторы используют колебательный контур из конденсатора и катушки индуктивности, соединенных либо параллельно, либо последовательно, параметры которых определяют частоту колебаний. Основными типами LC -генераторов являются генератор Хартли и генератор Колпитца. Схема генератора Хартли представлена на рисунке 2.59.

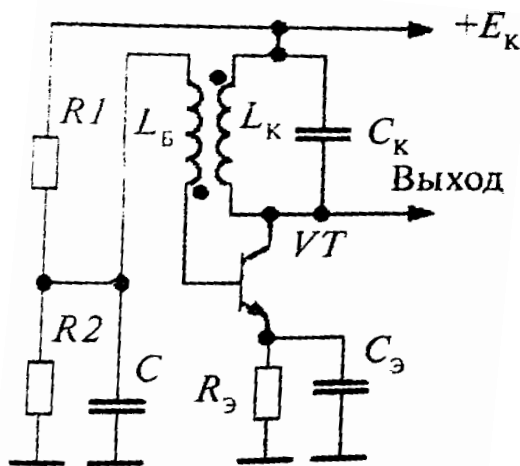


Рисунок 2.59 – Схема генератора Хартли

Генератор Хартли представляет собой однокаскадный усилитель на транзисторе VT , включенный по схеме с общим эмиттером. Резисторы $R1$, $R2$, $R3$ и конденсатор $C3$ предназначены для создания режима начального смещения и его температурной стабилизации. В коллекторную цепь транзистора VT включен колебательный контур, состоящий из индуктивности $Lк$ и конденсатора $Cк$.

Функции положительной обратной связи выполняет обмотка $Lб$, подключенная к базе и эмиттеру транзистора VT через разделительный конденсатор C . Обмотка $Lб$ индуктивно связана с обмоткой $Lк$.

При подключении схемы к источнику питания $Eк$ в частотно-избирательном контуре $LкCк$ возникают свободные колебания с частотой.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{LкCк}.$$

Благодаря наличию индуктивной связи в обмотке L_6 индуцируется напряжение с частотой f_0 . Чтобы процесс колебаний мог продолжаться бесконечно долго, необходимо соблюдение условия баланса фаз и баланса амплитуд.

Физический смысл условия баланса фаз заключается в том, что сигнал, поступающий по цепи обратной связи на базу транзистора, должен способствовать приращению тока в цепи коллектора. Математически это условие записывается в виде:

$$\varphi_y + \varphi_{o.c} = 2\pi n,$$

где φ_y , φ_{ac} – фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами соответственно для усилителя и звена обратной связи.

Условие баланса фаз обеспечивается путем выбора направления намотки катушки L_6 (выбора начала и конца катушки). Условие баланса фаз означает, что колебания возникают при вполне определенной частоте, при которой наблюдается совпадение фаз. При большом фазовом сдвиге выходное колебание будет гасить входное, и колебания прекратятся.

Сущность условия баланса амплитуд заключается в том, что численное приращение тока коллектора должно компенсировать потери энергии в активных сопротивлениях контура и звена обратной связи. Это условие записывается следующим образом:

$$\beta x \geq 0,$$

где β – коэффициент передачи транзистора по току; x – коэффициент передачи звена обратной связи.

Если баланс амплитуд соблюдаться не будет, то либо колебания будут затухать и прекратятся (при $\beta x < 1$), либо их амплитуда будет возрастать при ($\beta x > 1$), пока рост не прекратится вследствие нелинейности усилительного элемента. Из условия баланса амплитуд определяется коэффициентом x (число витков, если известен коэффициент β). При этом должно соблюдаться условие

$$\beta \geq \frac{W_K}{W_B},$$

где W_K , W_6 – число витков катушек индуктивности L_K , L_6 соответственно.

Только при соблюдении баланса фаз и баланса амплитуд колебания плавно или резко возникают и автоматически поддерживаются с заданным размахом.

Для того чтобы процесс колебаний осуществлялся с постоянной амплитудой напряжения (тока), коэффициент β должен иметь нелинейную зависимость от входного сигнала (рис. 2.60). Тогда при включении схемы будет $\beta x > 1$, то определяет условие самовозбуждения, а по мере нарастания выходного сигнала выражение $\beta x \rightarrow 1$. При $\beta x = 1$ (точка А на рис. 2.60) наступает режим колебаний с постоянной амплитудой.

На рисунке 2.61 представлена схема генератора Колпитца.

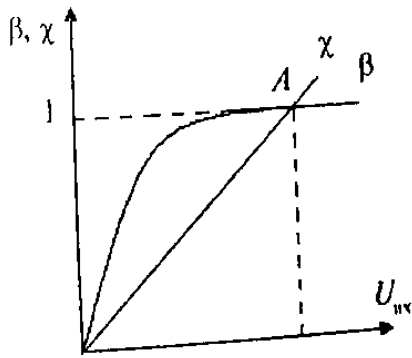


Рисунок 2.60 - Зависимость коэффициента β от входного сигнала

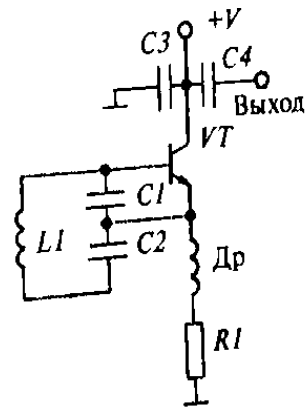


Рисунок 2.61 - Схема генератора Колпитца

Кварцевый генератор представляет собой автогенератор (электронный генератор с самовозбуждением) электромагнитных колебаний.

Кварцевый резонатор представляет собой тонкую пластинку минерала (кварца или турмалина) прямоугольной или круглой формы.

Кристалл кварца представляет собой шестигранную призму (рис. 2.62, а), у которой имеется 12 осей симметрии трех типов – оптические ZZ' , механические YY' и электрические XX' (рис. 2.62, б).

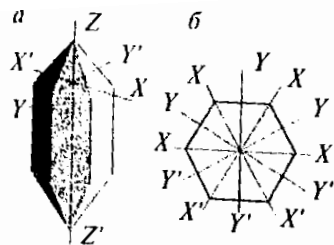


Рисунок 2.62 - Кристалл кварца

Любая колебательная система обладает своей резонансной частотой. У кварцевого резонатора также есть своя номинальная резонансная частота. Если приложить к кварцевой пластине переменное напряжение, которое совпадает с резонансной частотой самой кварцевой пластины, то происходит резонанс частот и амплитуда колебаний резко возрастает. Отклонение резонансной частоты от номинального значения составляет 10⁻⁷.

При резонансе электрическое сопротивление резонатора уменьшается. В результате получается эквивалент последовательной колебательной системы. Поскольку потери энергии в кварцевом резонаторе очень малы, то он фактически представляет собой электрический колебательный контур с очень большой добротностью ($Q=10^5-10^6$).

Эквивалентная электрическая схема кварцевого резонатора с учетом емкости кварцедержателя C_0 приведена на рисунке 2.63.

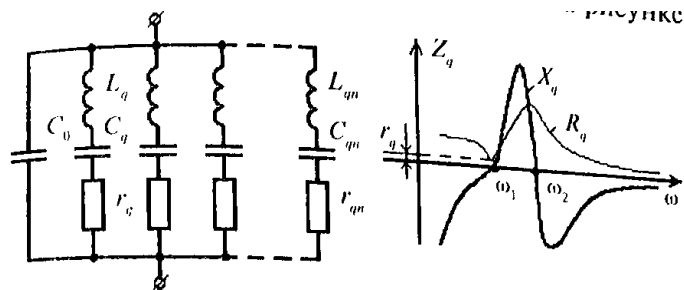


Рисунок 2.63 - Эквивалентная схема кварцевого резонатора

Каждый последовательный контур эквивалентной схемы соответствует одной из механических гармоник. Емкость C_0 образует дополнительные параллельные контуры.

Активное сопротивление r_q отображает тепловые потери в резонаторе, обусловленные внутренним трением в кристалле r_1 и трением кристалла в обкладках конденсатора r_0 , т.е. $r_q = r_0 + r_1$.

На рисунке 2.64 приведена схема генератора Пирса с кварцевой стабилизацией частоты колебаний.

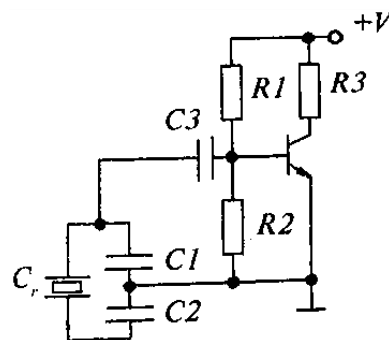


Рисунок 2.64 - Схема генератора с кварцевой стабилизацией частоты колебаний

RC-генераторы используют для формирования синусоидальных колебаний низкой и инфранизкой частот. В этом диапазоне колебания имеют высокую стабильность частоты за счет применения резисторов и конденсаторов с хорошей стабильностью частот.

Один из вариантов схемы RC-генератора приведен на рисунке 2.65. Данный генератор представляет собой усилитель, охваченный положительной обратной связью: вход усилителя соединен с выходом и поэтому он постоянно находится в самовозбуждении.

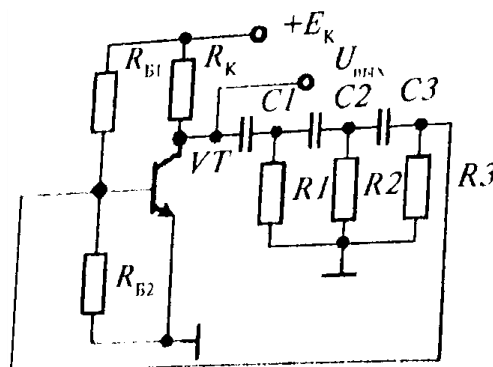


Рисунок 2.65 - Схема RC-генератора с фазовращающей цепочкой

Частотой колебаний RC-генератора управляет так называемая фазовращающая цепочка, которая состоит из элементов C_1-R_1 , C_2-R_2 и C_3-R_3 . С помощью одной цепочки из резистора и конденсатора можно получить сдвиг фаз не более чем на 90° . Реально же

сдвиг получается близким к 60° , поэтому для получения сдвига фазы на 180° приходится устанавливать три цепочки. С выхода последней RC -цепи (C_3-R_3) сигнал подается на базу транзистора. В момент включения источника питания возникающий при этом импульс коллекторного тока содержит широкий и непрерывный спектр частот, в который обязательно входит и необходимая частота генерации. При данных условиях колебания частоты, на которую настроена фазовращающая цепочка, станут незатухающими. При этом должно соблюдаться условие:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = R_3 = R; \\ C_1 &= C_2 = C_3 = C. \end{aligned}$$

Коэффициент передачи трехзвенной RC -цепи равен примерно $1/29$, поэтому, если коэффициент усиления транзистора каскада $K_u < 29$, в схеме возникают колебания, частота которых определяется по формуле:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC} \approx \frac{0,065}{RC}.$$

Несмотря на простоту схемы, данный генератор находит ограниченное применение в практических устройствах, так как способен работать только на фиксированной частоте. Кроме того, коэффициент нелинейных искажений выходного напряжения может достигать 10%, а стабильность частоты недостаточна.

Кроме использования фазовращающей цепочки имеется ещё один, более распространенный вариант генератора, также построенного на транзисторном усилителе, в котором вместо фазовращающей цепочки применен мост Вина-Робинсона (рис. 2.66).

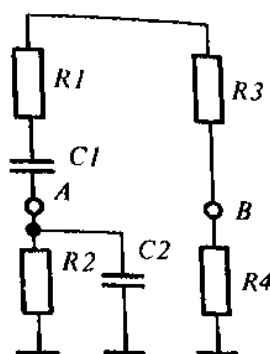


Рисунок 2.66 - RC -генератор с мостом Вина – Робинсона

Левая часть схемы – это пассивный полосовой RC -фильтр, в точке А снимается выходное напряжение. Правая часть работает как частотно-независимый делитель. Принято считать, что $R_1=R_2=R$, $C_1=C_2=C$, тогда резонансная частота будет определяться следующим выражением:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}.$$

При этом модуль коэффициента усиления максимален и равен $1/3$, а фазовый сдвиг равен нулю. Если коэффициент передачи делителя равен коэффициенту передачи полосового фильтра, то на резонансной частоте напряжение между точками А и В

будет равно нулю, фазочастотная характеристика на резонансной частоте делает скачок от -90° до $+90^\circ$, а между резисторами должно выполняться соотношение $R_3 = 2R_4$.

Генераторы с мостом Вина обладают хорошим свойством: если R_1 и R_2 заменить переменным сдвоенным резистором, то можно будет регулировать в некоторых пределах частоту генерации. Емкости C_1 и C_2 можно разбить на секции, тогда появится возможность переключать диапазоны, а сдвоенным переменным резистором R_1 - R_2 плавно регулировать частоту в диапазонах.

Генератор пилообразного напряжения (генератор линейно изменяющегося напряжения – ГЛИН) применяют для развертки электронного луча в электронно-лучевых трубках телевизионных, осциллографических и радиолокационных устройств, а также в схемах сравнения для задержки импульсов во времени и т.п.

ГЛИН могут работать в режиме самовозбуждения и в ждущем режиме, когда период повторения пилообразного напряжения определяется запускающими импульсами. Режим самовозбуждения применяют, например, для получения непрерывной развертки в осциллографах, а ждущий режим – для получения ждущей развертки.

Напряжением пилообразной формы называется напряжение, которое в течение определенного времени нарастает или убывает пропорционально времени (линейно), а затем быстро возвращается к исходному уровню.

Пилообразное напряжение может быть линейно нарастающим (рис. 2.67, а) или линейно падающим (рис. 2.67, б).

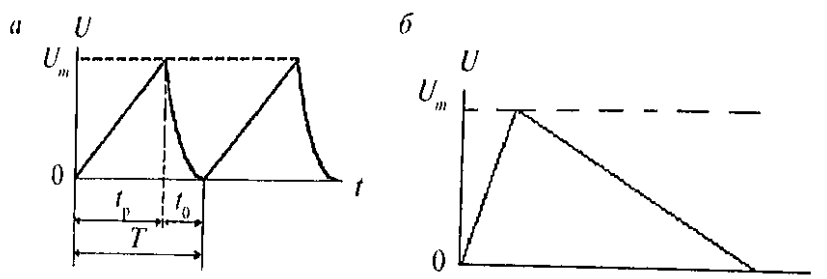


Рисунок 2.67 - Схемы изменения пилообразного напряжения

Пилообразное напряжение характеризуется: длительностью прямого, или рабочего, хода t_p , в течение которого напряжение изменяется линейно; длительностью обратного хода t_0 , в течение которого напряжение обычно изменяется по экспоненте; амплитудой U_m .

Принцип получения пилообразного напряжения заключается в медленном заряде (или разряде) конденсатора через большое сопротивление во время прямого хода и в быстром его разряде (или зарядке) через малое сопротивление во время обратного хода. В упрощенном виде это показано на рисунке 2.68.

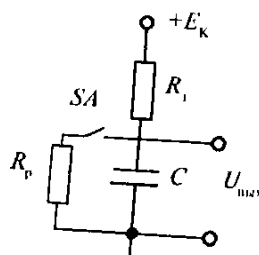


Рисунок 2.68 - Схема получения пилообразного напряжения

Конденсатор C заряжается при разомкнутом ключе SA через резистор R_3 , а разряжается при замкнутом ключе SA через резистор R_p .

Такая схема не позволяет получить напряжения высокой линейности, поскольку повышение напряжения на конденсаторе C уменьшает зарядный ток. Для получения линейного напряжения конденсатор необходимо заряжать постоянным во все время заряда током.

Рассмотрим схему ГЛИН на транзисторе $p-n-p$ структуры, приведенную на рис. 2.69.

В исходном состоянии транзистор VT открыт и насыщен, следовательно, напряжение на его коллекторе и конденсаторе C близко к нулю (рис. 2.70).

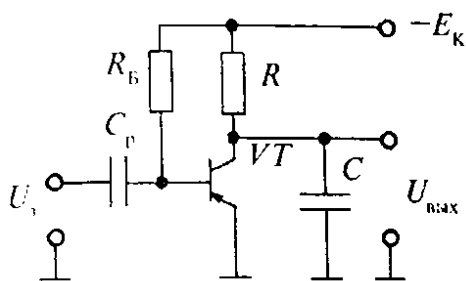


Рисунок 2.69 - Схема ГЛИН

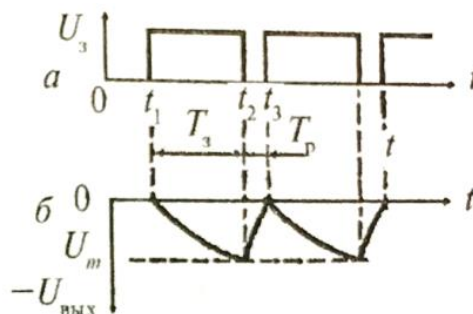


Рисунок 2.70 - Графики запускающего (а) и выходного (б) напряжения

В момент времени t_1 на базу транзистора VT подают положительный запускающий импульс и транзистор запирается, а конденсатор C начинает заряжаться по цепи от положительной клеммы E_k через конденсатор C , резистор R до отрицательной клеммы E_k . Таким образом, в течении времени действия запускающего импульса $T_з$ напряжение на конденсаторе растет. По окончании действия запускающего импульса в момент времени t_2 транзистор VT открывается и через него конденсатор C быстро разряжается. В момент времени t_3 вновь начинается процесс зарядки, и цикл повторяется.

Мультивибратор

Мультивибратор – это генератор несинусоидальных колебаний, близких по форме к прямоугольным.

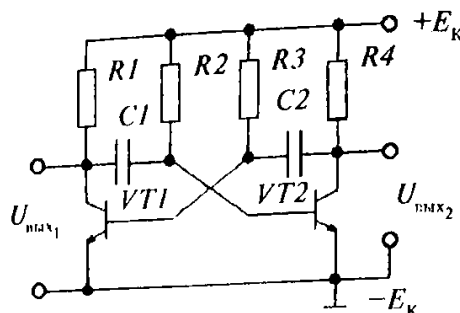


Рисунок 2.71 - Схема мультивибратора

Схема мультивибратора может быть более сложной в зависимости от необходимых выполняемых функций, но все элементы, представленные на рисунке 2.71, являются обязательными, без них мультивибратор работать не будет.

Работа симметричного мультивибратора основана на зарядно-разрядных процессах конденсаторов, образующих совместно с резисторами RC -цепочки.

В начальный момент подачи питания конденсаторы C_1 и C_2 разряжены, поэтому их сопротивление току мало, в результате чего происходит «быстрое» открывание транзисторов, вызванное протеканием тока: $VT2$ – по пути от положительной клеммы источника питания к отрицательной через резистор R_1 , разряженный конденсатор C_1 и базово-эмиттерный переход транзистора $VT2$; $VT1$ – по пути от положительной клеммы источника питания к отрицательной через резистор R_4 , разряженный конденсатор C_2 и базово-эмиттерный переход $VT1$.

Такое состояние называется *неустановившимся режимом работы* мультивибратора. Предположим, что в рассматриваемой схеме быстрее открылся транзистор $VT2$, тогда через малое сопротивление разряженного конденсатора C_2 и малое сопротивление коллекторно-эмиттерного перехода транзистора $VT2$ база и эмиттер транзистора $VT1$ окажутся замкнутыми и транзистор $VT1$ закроется. В результате закрытия транзистора $VT1$ происходит заряд конденсатора C_1 от источника питания через резистор R_1 и базово-эмиттерный переход транзистора $VT2$. Конденсатор заряжается до напряжения источника питания. Одновременно происходит заряд конденсатора C_2 током обратной полярности через резистор R_3 и коллекторно-эмиттерный переход транзистора $VT2$. Длительность заряда определяется величиной сопротивления резистора R_3 и емкости конденсатора C_2 . Пока конденсатор C_2 заряжается, транзистор $VT1$ будет находиться в закрытом состоянии.

По окончании заряда конденсатора C_2 его сопротивление увеличится и транзистор $VT1$ откроется напряжением источника питания через резистор R_3 и базово-эмиттерный переход транзистора $VT1$. При этом напряжение заряженного конденсатора C_1 через открытый коллекторно-эмиттерный переход $VT1$ окажется приложенным к эмиттерно-базовому переходу транзистора $VT2$ обратной полярностью, в результате чего транзистор $VT2$ закроется, а ток, который ранее проходил через открытый коллекторно-эмиттерный переход транзистора $VT2$, будет протекать через резистор R_4 , конденсатор C_2 и базово-эмиттерный переход транзистора $VT1$. По этой цепи произойдет перезарядка конденсатора C_2 и описанный цикл повторится. С этого момента начинается установившийся режим автоматической генерации.

Длительность перезаряда конденсаторов определяется по формуле:

$$T = \tau_1 + \tau_2,$$

где $\tau_1 = R_3 C_2$; $\tau_2 = R_1 C_1$ – длительность импульса, с;

R_2 ; R_3 – сопротивление резисторов R_2 и R_3 соответственно;

C_1 и C_2 – емкости конденсаторов C_1 и C_2 соответственно.

При выполнении условий равенства $R_2 = R_3$ и $C_1 = C_2$ на выходах мультивибратора длительность прямоугольных импульсов будет равна длительности пауз между ними (рис. 2.72).

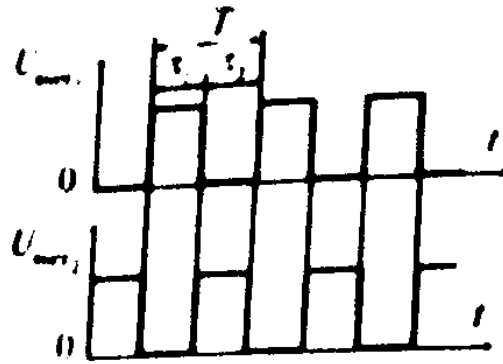


Рисунок 2.72 - Диаграмма выходных импульсов мультивибратора

Триггер

Триггер – устройство, способное находиться длительное время в одном из двух состояний устойчивого равновесия и скачком переходить из одного состояния в другое под воздействием внешнего управляющего сигнала.

Состояние устойчивого равновесия характеризуется тем, что после слабого внешнего воздействия триггер возвращается в исходное состояние, т.е. токи и напряжения принимают исходные значения в отличие от состояния неустойчивого равновесия, которое нарушается любым слабым внешним воздействием. Для перехода триггера из одного состояния в другое необходимо, чтобы входной сигнал превысил пороговое значение.

Упрощенная принципиальная схема симметричного транзисторного триггера и временные диаграммы приведены на рисунке 2.73.

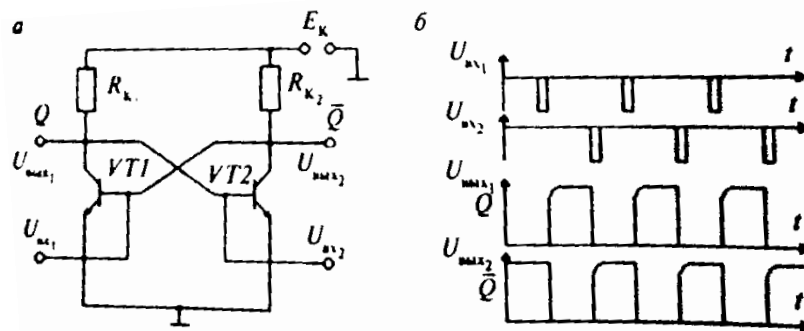


Рис. 2.73

Рисунок 2.73 - Схема (а) и временные диаграммы (б) симметричного транзисторного триггера

Если допустить, что после подачи напряжения источника E_k на триггер оба транзистора $VT1$ и $VT2$ оказались открытыми, то вследствие даже незначительного различия параметров элементов первого и второго плеч появятся различия в коллекторных точках и напряжениях, которые благодаря действию положительной обратной связи будут увеличиваться до тех пор, пока один из транзисторов не закроется, а другой не перейдет в режим насыщения.

Если после подачи напряжения E_k транзистор $VT1$ оказался в режиме насыщения, а транзистор $VT2$ – в режиме отсечки, то первый отрицательный импульс, поступив-

ший на базу транзистора VT1, вызывает уменьшение тока $I_{к1}$ и увеличение напряжения $Kэ1$. Скачок напряжения $Kэ1$ поступает на базу транзистора VT2. Это приводит к увеличению тока $I_{к2}$ и уменьшению напряжения $Kэ2$ который передаётся на базу транзистора VT1. В результате действия положительной обратной связи транзистор VT1 запирается, а транзистор VT2 отпирается и переходит в режим насыщения. Такое состояние триггера сохраняется до прихода отрицательного импульса на базу транзистора VT2 (Второй вход). Уменьшение напряжения $U_{б2}$ вызывает уменьшение тока $I_{к2}$ и увеличение напряжения $U_{кэ2}$, в результате чего будут созданы условия для нового срабатывания триггера.

Транзистор VT1 открывается и переходит в режим насыщения, а транзистор VT2 запирается. В таком состоянии триггер будет находиться до поступления на первый вход следующего отрицательного импульса, который вызовет его “Опрокидывание” в первое устойчивое слияние и т.д.

Кроме симметричного широко используется несимметричный триггер, который часто называют триггером Шмитта. На рисунке 2.74 представлены схема триггера Шмитта и его временные диаграммы.

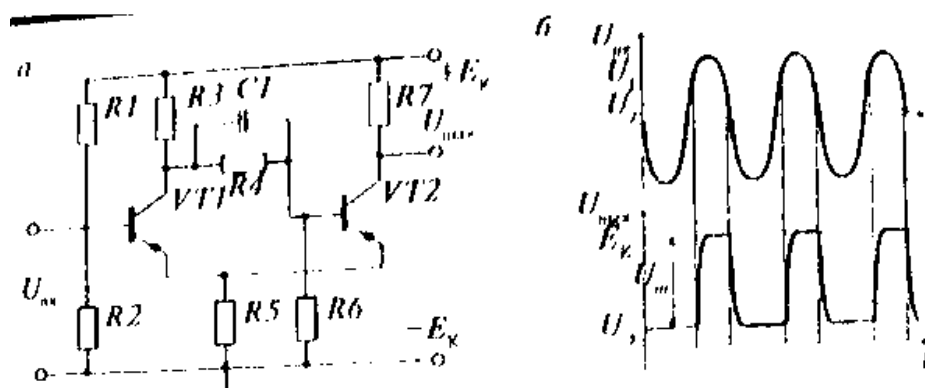


Рисунок 2.74 - Схема (а) и временные диаграммы (б) триггера Шмитта

Триггер Шмитта имеет схожую структуру с симметричным триггером. Различие между ними заключается в том, что одна из электронно-базовой цепи симметричного триггера заменена общей эмиттерной связью. В результате коллектор транзистора VT2 не связан с базовой цепью VT1 и нагрузка, подключённая к коллектору VT2 практически не влияет на работу триггера.

Рассмотрим принцип работы триггера Шмитта по приведённым временным диаграммам. При подключении источника питания к триггеру он переходит в исходное состояние, при котором транзистор VT1 закрыт, а транзистор VT2 открыт. В этом случае на выходе триггера присутствует некоторое напряжение $U_э$, зависящая от элементов, с которыми связан транзистор VT2:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{E_k R_5}{R_5 + R_7}$$

В случае, когда входное напряжение превысит порог срабатывания, транзистор VT1 откроется, а VT2 соответственно закроется и напряжение на выходе триггера резко возрастёт до значения, примерно равного напряжению источника питания: $U_{\text{ВЫХ}} = E_k$.

В триггере Шмитта переход из одного устойчивого состояния в другое осуществляется только при определённых значениях входного напряжения которые называются уровнями срабатывания триггера или просто пороговыми уровнями. Этими уровнями являются напряжения срабатывания $U_{ср}$ и напряжение отпускания $U_{отп}$.

На рисунке 2.75 показано зависимость выходного напряжения триггера Шмитта от входного, которое называется передаточной характеристикой.

Из передаточной характеристики видно, что для триггера Шмитта напряжение отпускания $U_{отп}$ меньше напряжения срабатывания $U_{ср}$. Если входное напряжение элемента триггера Шмитта $U_{вх}=0$ (точка А), то выходное напряжение $U_{вых}=U_{max}$. При повышении $U_{вх}$ до $U_{ср}$ выходной сигнал скачком уменьшается до U_{min} (переход от точки Б к точке В). Если продолжать увеличивать входное напряжение, например, до величины U_T , то состояние триггера изменяться не будет. Если постепенно уменьшать входное напряжение от U_T (точка Г), то при достижении значения $U_{вх}=U_{отп}$ (точка Д) выходное напряжение скачком перейдёт от низкого уровня к высокому (линия Д-Е). При дальнейшем снижении $U_{вх}$ до нуля возвращаемся в точку А передаточной характеристики. Таким образом, передаточная характеристика несимметричного триггера образует гистерезисную петлю. Разность между напряжением срабатывания и напряжением отпускания называется *шириной петли гистерезиса*.

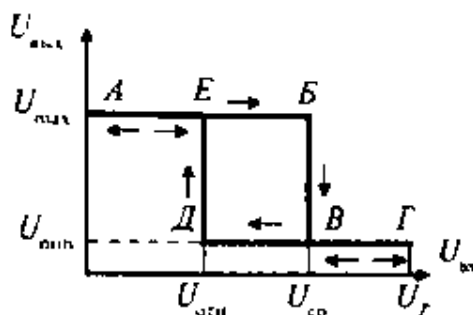


Рисунок 2.75 - Передаточная характеристика триггера Шмитта

Наличие гистерезиса приводит к тому, что любой шум, любые помехи с амплитудой, меньшей ширины петли гистерезиса, отсекаются, а любые фронты входного сигнала, даже самые пологие, преобразуются в крутые фронты выходного сигнала.

Ширина петли гистерезиса зависит от величины резистора, а порог срабатывания триггера - от соотношения делителя напряжения, который образуется резисторами R_4 и R_6 . Это приводит к усложнению схемы за счет необходимости отдельно регулировать ширину петли гистерезиса и пороги срабатывания триггера.

Триггеры Шмитта широко применяются для преобразования синусоидального напряжения в прямоугольные импульсы, в качестве дискриминатора (различителя) амплитуд или сравнивающего устройства (компаратор), а также для предотвращения «дребезга» (в широком смысле этого слова).

Электронно-лучевая трубка

Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) – электровакуумный прибор, в котором поток электронов, сформированный в электронный луч и управляемый электрическими или магнитными полями, используется для преобразования электрических сигналов в световые.

Классификация ЭЛТ осуществляется:

1) По способу фокусировки и отклонения электронного луча: с электростатическим управлением, когда электронный луч фокусируется и отклоняется электрическим полем; электромагнитным управлением, когда фокусировка и отклонение луча осуществляются магнитным полем;

2) **Функциональному признаку:** осциллографическим, предназначенные для наблюдения и изучения периодических сигналов и получения осциллограмм (применяются в основном в измерительной технике); индикаторные, предназначенные для регистрации объектов в радиолокационных и радионавигационных устройствах; приемные телевизионные, предназначенные для преобразования электрического видеосигнала в сигнал изображения.

На рисунке 2.76 схематично показано устройство ЭЛТ с электростатическим управлением.

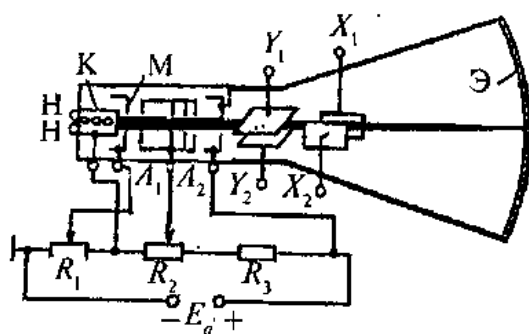


Рисунок 2.76 - Устройство ЭЛТ с электростатическим управлением

Элементы трубки размещены в стеклянном баллоне, из которого откачан воздух до остаточного давления 1-10 мкПа. Металлический катод К подогревается током металлической нити Н, выполненной в форме стакана. Катод охвачен полым цилиндрическим модулятором М с отверстием на оси. Модулятор имеет отрицательный относительно катода потенциал, регулируемый потенциометром R1 в пределах от нуля до нескольких десятков вольт. Чем больше отрицательный потенциал модулятора, тем меньше плотность электронного потока, прошедшего через отверстие модулятора, и, следовательно, тем меньше яркость изображения на экране Э. При определенном значении потенциала модулятора электроны вообще не пройдут через модулятор и экран не будет светиться. Электроны, прошедшие через модулятор, попадают в электрическое поле первого (A1) и второго (A2) анодов, выполненных в виде полых тонкостенных металлических цилиндров. Анодам сообщают высокие положительные потенциалы от источника питания через делитель R1—R2—R3 (первому аноду — несколько сотен вольт, второму — до десятков киловольт), благодаря чему электроны приобретают достаточную для возбуждения атомов люминофора скорость. В пространстве между катодом и модулятором существует неоднородное электростатическое поле, которое образует часть первой электростатической линзы (рис. 2.77) и служит для фокусировки электронного луча.

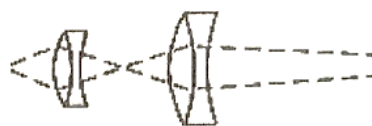


Рисунок 2.77 - Фокусировка электронного луча

Форму, размеры и потенциалы анодов рассчитывают таким образом, чтобы сфокусировать пучок электронов на поверхности экрана Э. Регулировкой потенциала первого анода с помощью потенциометра R_2 добиваются точной фокусировки. Вся система электродов, формирующая электронный луч, крепится на держателях (траверсах) и образует электронный прожектор. Для управления положением светящегося пятна на экране применяют две пары специальных электродов - отклоняющих пластин X и Y, расположенных взаимно перпендикулярно. Изменяя разность потенциалов между пластинами каждой пары, можно изменять положение электронного луча во взаимно перпендикулярных плоскостях воздействием электростатических полей, отклоняющих пластин на электроны. Разность потенциалов между пластинами X (горизонтального отклонения) определяет положение луча по горизонтали, а между пластинами Y (вертикального отклонения) - по вертикали.

ЭЛТ с электромагнитным отклонением луча (рис. 2.78) содержит только один управляющий электрод 1 второй анод отсутствует. Роль собирающей линзы играет магнитное поле. Последнее образуется охватывающей горловину трубки катушкой 2, по которой пропускают постоянный ток. Магнитное поле катушки создает вращательное движение электронов. В то же время электроны большой скоростью движутся параллельно оси трубки к люминесцирующему экрану под действие положительного напряжения на нём, в результате чего траектории электронов представляют собой кривую, напоминающую винтовую линию.

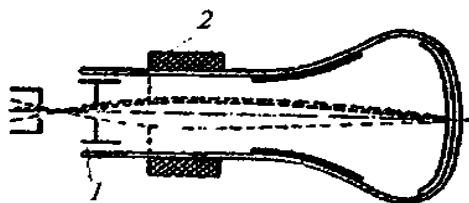


Рисунок 2.78 - ЭЛТ с электромагнитным отклонением луча

По мере приближения к экрану скорость поступательного движения электронов возрастает, а действие магнитного поля ослабляется, поэтому радиус кривой постепенно уменьшается и вблизи экрана пучок электронов вытягивается в тонкий прямой луч. Хорошей фокусировки, как правило, добиваются путем изменения тока в фокусирующей катушке, т. е. путем изменения напряжённости магнитного поля.

Осциллограф

Электронный осциллограф — это прибор, предназначенный для записи и визуальных наблюдений электрических сигналов, меняющихся по времени, а также для измерения электрического напряжения, частоты и временных интервалов.

На рисунке 2.79 приведена структурная схема осциллографа. Рассмотрим назначение этих основных узлов.

Блок питания обеспечивает энергией работу всех узлов электронного осциллографа. Он преобразует поступающее на вход переменное напряжение величиной 220 В в напряжения разной величины: переменное напряжение 6,3 В для питания нити накала электронно-лучевой трубки, постоянное напряжение 12—24 В для питания усилителей и генератора, если они полупроводниковые (или 250 В, если ламповые), около 150 В для питания оконечных усилителей горизонтального и вертикального отклонения

луча, несколько сотен вольт для фокусировки электронного луча и несколько тысяч вольт для ускорения электронного пучка.

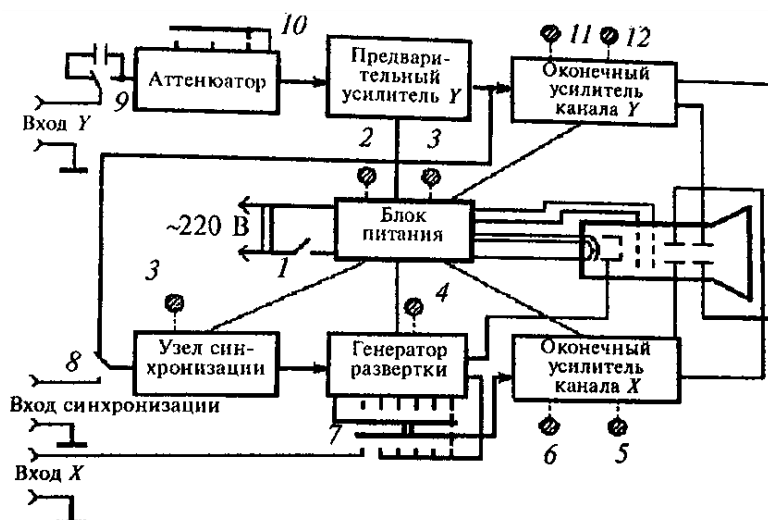


Рисунок 2.79 – Структурная схема осциллографа: ● - ручки плавных регулировок

Из блока питания кроме выключателя 1 выведены на переднюю панель осциллографа регуляторы фокусировки 2 и яркости 3. При вращении ручек этих регуляторов изменяются напряжения, подаваемые на первый анод и модулятор. При изменении напряжения на первом аноде меняется конфигурация электростатического поля, что приводит к изменению ширины электронного луча. Модулятор в электронно-лучевой трубке выполняет роль управляющей сетки в ламповом триоде. При изменении напряжения на модуляторе изменяется ток электронного луча (изменяется кинетическая энергия электронов), что приводит к изменению яркости свечения люминофора экрана.

С генератора развертки сигнал подается на усилитель канала горизонтального отклонения (канала X). Усилитель необходим для получения такой амплитуды пилообразного напряжения, при которой электронный луч отклоняется на весь экран. В усилителе расположены регулятор длины линии развертки (регулятор амплитуды выходного пилообразного напряжения) 6 (на передней панели осциллографа он называется «УСИЛЕНИЕ X» или «АМПЛИТУДА X») и регулятор смещения линии развертки по горизонтали 5.

Канал вертикальной развертки состоит из входного аттенюатора (делителя входного сигнала) и двух усилителей — предварительного и оконечного. Аттенюатор позволяет выбирать нужную высоту рассматриваемого изображения в зависимости от амплитуды исследуемых колебаний. С помощью переключателя 10 входного аттенюатора амплитуду сигнала можно уменьшить в 10 или 100 раз. Возле переключателя расположены надписи: 1:1 — в этом случае входной сигнал не ослабляется; 1:10 и 1:100 — в этих случаях сигнал ослабляется в 10 и 100 раз соответственно. Более плавные изменения уровня сигнала, а значит и размера изображения на экране, получают с помощью регулятора чувствительности оконечного усилителя канала Y 11. В оконечном усилителе этого канала, как и канала горизонтального отклонения, есть регулировка смещения луча 12, а значит и изображения, по вертикали. Кроме того, на входе канала вертикального отклонения имеется переключатель 9, с помощью которого

можно через аттенюатор либо подавать на усилитель постоянную составляющую исследуемого сигнала, либо избавляться от нее включением разделительного конденсатора. Это, в свою очередь, позволяет пользоваться осциллографом как вольтметром постоянного тока с высоким, более 1 Мом, входным сопротивлением.

Кроме переключателя 7 и регулятора 4 длительности развертки у генератора развертки есть еще переключатель режима работы развертки. Он также выведен на переднюю панель осциллографа (на структурной схеме не указан). Генератор разверток может работать в двух режимах: в автоматическом (генерирует пилообразное напряжение заданной длительности) и ждущем («ожидает» прихода входного сигнала и с его появлением запускается). Ждущий режим используется при исследовании сигналов, появляющихся случайно, либо при исследовании параметров импульса, когда его передний фронт должен быть в начале развертки. В автоматическом режиме работы случайный сигнал может появиться в любом месте развертки, что усложняет его наблюдение.

Переключатель 7 спаренный. Во всех положениях верхней (по чертежу) секции переключателя, кроме крайнего левого, генератор вырабатывает пилообразное напряжение различной длительности, а в крайнем левом положении генератор разверток отключается. Нижняя секция переключателя 7 подключает окончательный усилитель канала горизонтального отклонения к гнездам «ВходХ». Теперь горизонтальная линия развертки будет получаться только при подаче сигнала на указанные гнезда. Причем чувствительность этого канала меньше, чем канала вертикального отклонения. Длину линии развёртки может устанавливать регулятор 6. Такой режим работы осциллографа используется, например, при исследовании частотных и фазовых соотношений гармонических колебаний так называемом методом фигур Лиссажу, когда одни колебания подают на вход Y осциллографа, а другие – на вход X.

Если между генератором развертки и сигналом нет никакой связи, то начинаться развертка и появляться сигнал будут в разное время, изображение сигнала на экране осциллографа будет перемещаться либо в одну, либо в другую сторону — в зависимости от разности частот сигнала и развертки. Для того чтобы остановить изображение, нужно «за синхронизировать» генератор, т. е. обеспечить такой режим работы, при котором начало развертки будет совпадать с началом появления периодического сигнала, например синусоидального. Причем синхронизировать генератор можно как от внутреннего сигнала с усилителя вертикального отклонения, так и от внешнего, подаваемого на гнезда «ВХОД СИНХРОНИЗАЦИИ». Выбирают тот или иной режим переключателем 8 (на структурной схеме переключатель находится в положении внутренней синхронизации).

Синхронизация плавно регулируется регулятором 4. Ручку последнего можно поворачивать от крайнего левого положения (знак -) до крайнего правого (знак +). Регулировка синхронизации развертки зависит от сигнала соответствующей полярности. Когда ручка регулятора находится в крайнем левом положении (-), генератор развертки синхронизируется отрицательным фронтом синусоидального напряжения), в крайнем правом (+) - положительным. В среднем положении ручки синхронизация выключается в некоторых конструкциях осциллографов переключение синхронизации от (+) или от (-) осуществляется отдельным переключателем. В этом случае ручки регулятора меняет амплитуду сигнала синхронизации, что способствует получению более устойчивого изображения на экране.

Современные приборы отображения информации

Приборы для отображения информации применяются в системах, где информацию требуется представить в форме, удобной для визуального восприятия.

К приборам отображения информации относятся:

ЭЛТ;

Индикаторы: единичные(отображают информацию в виде простой геометрической фигуры – точки, запятой, круга, квадрата и др); цифровые(отображают информацию в виде цифр); буквенно-цифровые (отображают информацию в виде букв и цифр, включая и специальные математические символы); матричные (элементы отображения имеют форму квадратов, кругов, прямоугольников, сгруппированных и управляемых по строкам и столбцам); вакуумные электролюминесцентные; жидкокристаллические; шкальные (отображают информацию в дискретной или аналоговой форме в виде уровней или значений величин); мнемонические (отображают информацию в виде мнемосхемы или ее частей); графические (отображают сложную информацию в виде графиков, специальных знаков, символов, букв и цифр).

Среди **буквенно-цифровых индикаторов** различают накаливные, газоразрядные, светодиодные, вакуумные электролюминесцентные, жидкокристаллические.

Накаливные и газоразрядные индикаторы в настоящее время практически не применяются.

Светодиодные индикаторы бывают двух видов: семисегментные и матричные.

Семисегментные светодиодные индикаторы предназначены для отображения информации в виде цифр и включают в свой состав восемь светодиодов, семь из которых имеют форму сегментов, а один, восьмой - форму точки (рис. 2.80).

Матричные светодиодные индикаторы (рис. 2.81) имеют в своём составе большое количество светодиодов. Путем подключения тех или иных светодиодов в матрицу можно сформировать любую цифру, букву, знак или символ. Достоинствами светодиодных индикаторов являются малое потребление электроэнергии и четкая конфигурация отображаемых символов.

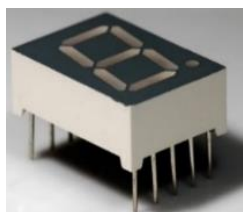


Рисунок 2.80 - Семисегментные светодиодные индикаторы



Рисунок 2.81 - Матричные светодиодные индикаторы

Шкальные индикаторы — это приборы, состоящие из размещенных на одной подложке в линию нескольких светодиодов. Являются простейшей разновидностью матричных индикаторов. В шкальных индикаторах в зависимости от величины входного сигнала изменяется длина светящейся линии. Применяются они для наглядного отображения аналоговой информации в измерительных, контрольных и информационных устройствах.

Мнемонические индикаторы имеют различные конфигурации излучающей поверхности (квадрат, треугольник, стрелка) и используются в указателях, технологических табло, приборных панелях, информационных и рекламных щитах.

Принцип работы вакуумного электролюминесцентного индикатора (рис. 2.82) основан на том, что аноды в виде металлизированных сегментов, покрытых люминофором, будут светиться при попадании на них электронного потока. Индикатор содержит катод для создания термоэлектронной эмиссии 1, ускоряющую сетку 2, маску 3 и аноды 4. Катод создает электронный поток, который ускоряется сеткой через маску попадает на те аноды, к которым подведено напряжение и вызывает свечение люминофора. Маска представляет собой металлическую фольгу с прорезами по конфигурации анодов и предназначена для более четкой конфигурации цифр.

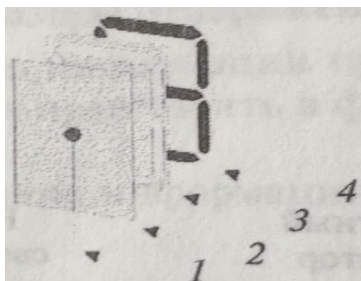


Рисунок 2.82 - Вакуумный электролюминесцентный индикатор

По виду отображения информации различают единичные, цифровые, буквенные, шкальные, мнемонические и графические вакуумные электролюминесцентные индикаторы, по исполнению они могут быть одно-, многоразрядными, а также без фиксированных знакомест.

Из всех типов индикаторов вакуумные электролюминесцентные индикаторы обладают максимальной яркостью свечения. Они применяются в широком спектре аппаратуры - электроизмерительной технике, часах, информационных табло и т. д. Недостатком является большой потребляемый ток.

Принцип действия жидкокристаллического индикатора основан на электрооптических эффектах в жидких кристаллах.

Различают мозаичные, матричные и аналоговые жидкокристаллические индикаторы.

Мозаичный жидкокристаллический индикатор состоит из двух герметично скрепленных по периметру стеклянных пластин: передней / и задней 3 (рис. 2.83), между которыми имеется зазор (5-20 мкм), заполненный жидким кристаллом. На внутренних поверхностях пластин нанесены прозрачные электроды 2 и ориентирующие покрытия. Вид отображаемой информации зависит от формы электродов, которые представляют собой сегменты цифровых или буквенно-цифровых символов, условные символы, целые слова или элементы мнемосхемы.

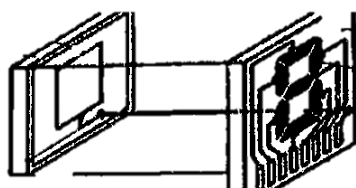


Рисунок 2.83 - Схема жидкокристаллического цифрового индикатора

В матричном жидкокристаллическом индикаторе множество одинаковых элементов образовано на пересечении строк и столбцов электродов, расположенных взаимно перпендикулярно. Управляющие электрические сигналы подаются на элементы по

каждой строке последовательно. Контраст изображения существенно увеличивается, а время записи кадра уменьшается при использовании в матричных индикаторах транзисторов, диодов и других нелинейных управляющих элементов. В таких активных индикаторах матрица управляющих элементов расположена на одной из подложек жидкокристаллического индикатора, а каждый элемент отображения соединен последовательно с управляющим элементом и управляется им.

Аналоговый жидкокристаллический индикатор используется для отображения информации в аналоговой (непрерывной) форме. Он представляет собой слой жидкого кристалла, ориентированный ограничивающими поверхностями электродных пластин. Измеряемое напряжение прикладывается между обоими электродами.

Жидкокристаллические индикаторы широко применяются в качестве цифровых индикаторов наручных и настольных часов, микрокалькуляторов, комнатных термометров, медицинских термометров и тонометров (приборов для измерения артериального давления), рекламных устройств, дорожных знаков, мониторов персональных компьютеров и т. д.

Контрольные вопросы и задания

1. Объясните для чего предназначен электронный генератор. Приведите классификацию электронных генераторов.
2. Поясните принцип работы кварцевого генератора.
3. Поясните принцип работы генератора пилообразного напряжения.
4. Поясните принцип работы мультивибратора.
5. Поясните принцип работы симметричного триггера на транзисторах.
6. Дайте понятие электронно-лучевой трубке. Приведите классификацию ЭЛТ.
7. Объясните для чего предназначен блок питания.

Тема 2.6 Интегральные схемы микроэлектроники

Общие сведения

Микроэлектроника – область электроники, занимающаяся созданием электронных функциональных узлов, блоков и устройств в микроминиатюрном интегральном исполнении.

Интегральная микросхема (ИМС) – совокупность электрически связанных компонентов (транзисторов, диодов, резисторов, и др.), изготовленных в едином технологическом цикле на единой полупроводниковой основе (подложке).

Современная ИМС – это миниатюрный электронный блок, содержащий в своём корпусе транзисторы, диоды, резисторы и другие активные и пассивные радиоэлектронные компоненты (РЭК), общее число которых может достигать нескольких десятков и даже сотен тысяч. В зависимости от числа элементов различают микросхемы малой степени интеграции, микросхемы средней степени интеграции, большие интегральные микросхемы (БИС) и сверхбольшие интегральные микросхемы (СБИС). Микросхемы малой степени интеграции могут содержать до 10-30, а СБИС – до 100 тыс. и более активных и пассивных РЭК.

Одна цифровая микросхема может выполнять функцию целого блока измерительного прибора, микрокалькулятора, устройства автоматического управления производственным процессом, микропроцессора, узла ЭВМ.

Классификация и маркировка микросхем

ИМС различают по следующим признакам.

- **По виду обрабатываемого сигнала:** Аналоговые - предназначены для и преобразования обработки сигнала, изменяющихся по закону непрерывной функции; Цифровые - предназначены для преобразования сигналов, изменяющихся по законам дискретной функций и выраженных в цифровом коде. Частным случаем цифровой микросхемы является логическая микросхема (см. подп. 2.6.8).

Следует иметь в виду, что не всегда существует такое строгое разделение, так как появился ряд схем, работа которых основана на использовании смешанных сигналов. В первую очередь это относится к аналого-цифровым и цифроаналоговые преобразователи.

- **Цифровые ИМС, в свою очередь, классифицируются по трём дополнительным признакам:** виду компонентов логической схемы на которых выполняются логические операции над входными операциями; способу соединения полупроводниковых приборов в логическую схему; виду связи между логическими схемами.

В соответствии с перечисленными признаками логические ИМС можно классифицировать следующим образом: ДТЛ– схемы, входная логика которых выполняется на диодах; ТТЛ– схемы, входная логика которых выполняется на многоэмиттерном транзисторе; ЭСЛ– схемы со связанными эмиттерами.

- **По технологии изготовления:** полупроводниковые. Все РЭК и их соединения изготавливаются в объёме (внутри) и частично на поверхности полупроводника; плёночные. Все РЭК и их соединения выполнены в виде плёнок из проводящих и диэлектрических материалов и размещены на диэлектрическом основании. Эти ИМС не содержат транзисторов и диодов; гибридные. Пассивные РЭК и соединительные проводники изготавливают по плёночной технологии, а бескорпусные транзисторы и диоды,

изготовленные отдельно по полупроводниковой технологии, соединяют тонкими проводами диаметром 0.04 мм с контактными площадками.

• **По степени интеграции:** ИМС малой степени интеграции содержат 1-10 РЭК; ИМС средней степени интеграции содержат 10-100 РЭК; ИМС высокой степени интеграции содержат свыше 100 РЭК.

Обозначение ИМС осуществляется в соответствии с ГОСТ 19480-89 и состоит из четырёх основных элементов:

- первый элемент (цифра) соответствует конструктивно-технологической группе:
 - 1, 5, 6, 7 – полупроводниковые ИМС;
 - 2, 4, 8 – гибридные ИМС;
 - 7 – бескорпусные полупроводниковые ИМС;
 - 3 – прочие ИМС, в том числе плёночные, вакуумные, керамические и т.д. ;
- второй элемент – две, а в последнее время три цифры, следующие за первой цифрой (обозначают порядковый номер разработки ИМС);
- третий элемент – две буквы (обозначают подгруппу (первая буква) и вид (вторая буква) ИМС);
- четвёртый элемент – условный номер разработки ИМС по функциональному признаку в данной серии (ставится в сериях разработок ИМС, предназначенных для совместного применения в аппаратуре и имеющих единое конструкторско-технологическое исполнение).

В маркировке ИМС, выпускаемых для широкого применения, перед всеми элементами обозначения серии ставят индекс «К».

Тонкоплёночные интегральные

Тонкоплёночные ИМС – это схемы, элементы которых совместно с соединениями между ними создаются в виде тонких плёнок толщиной до 1 мкм из проводящих, резистивных, диэлектрических и полупроводниковых материалов, осаждённых на общей стеклянной или керамической подложке.

По тонкоплёночной технологии изготавливают резисторы и конденсаторы. Для изготовления тонкоплёночных резисторов и конденсаторов применяют множество различных методов, в частности масочный, фотолитографический, электронно-лучевой, лазерный.

Масочный метод заключается в том, что соответствующие материалы напыляют на подложку через съёмные маски.

При фотолитографическом методе плёнку наносят на всю поверхность подложки, а затем вытравливают с определённых участков.

При электронно-лучевом методе некоторые участки плёнки удаляют с подложки путём испарения под воздействием электронного луча по заданной программе.

Лазерный метод аналогичен электронно-лучевому, только вместо электронного применяют луч лазера.

При изготовлении тонкоплёночных ИМС, содержащих резисторы и конденсаторы, формирование слоёв осуществляется следующим образом: слой, содержащий резисторы; слой проводников с контактными площадками для соединения резисторов; слой межслойной изоляции; слой проводников. При отсутствии пересечения слой межслойной изоляции и данный слой не напыляют; слой нижних обкладок конденсаторов; слой диэлектрика; слой верхних обкладок конденсатора; защитный слой.

Таким образом, тонкоплёночная микросхема представляет собой многослойную структуру. Обычно в виде тонкоплёночных схем изготавливаются пассивные схемы (рис.2.84).

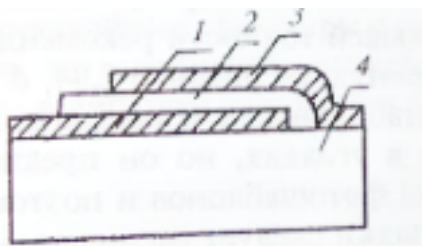


Рисунок 2.84 - Конструкция тонкоплёночного конденсатора

Нижняя 1 и верхняя 3 пластины конденсатора выполнены в виде тонких плёнок из меди, серебра, алюминия или золота. Однако эти металлы не обеспечивают хорошую адгезию с материалом подложки 4, т.е. в данном случае сцепление тонких металлических плёнок с поверхностью подложки. Для улучшения адгезии напыление указанных металлов производят с подслоем хрома, титана или молибдена.

В качестве диэлектрика 2 в конденсаторах применяют плёнки из силиката алюминия, титаната бария, двуокиси титана, окиси бериллия, кремния и др., обладающие хорошей электрической прочностью и высокой диэлектрической проницаемостью. Ёмкость тонкоплёночных конденсаторов не зависит от напряжения и может принимать значения от десятых долей пикофарады до десятков тысяч пикофарад. Для получения больших ёмкостей формируют многослойные конденсаторы. В зависимости от ёмкости тонкоплёночные конденсаторы занимают площадь в пределах 10^{-3} -1 см².

На рисунке 2.85 приведены типовые конфигурации тонкоплёночных резисторов.

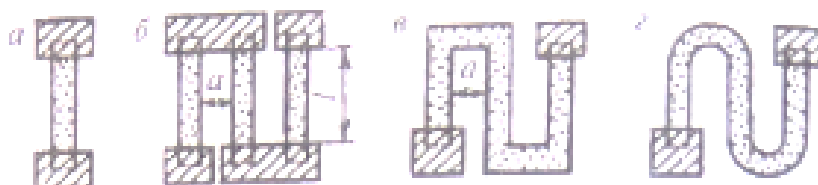


Рисунок 2.85 - Конструкция тонкоплёночных резисторов

Наиболее распространённой является прямоугольная форма (рис. 2.85, а) как самая простая по технологическому исполнению.

Резистор в виде полосок (рис. 2.85, б) занимает большую площадь, чем резисторы типа «меандр» (рис. 2.85, в) или «змейка» (рис. 2.85, г).

При масочном методе изготовления резисторов (рис. 2.85, б-г) расстояние между соседними резистивными полосками должно быть не менее 300 мкм, длина резистивных участков l не должна превышать расстояние a более чем в 10 раз. Выполнение этих условий необходимо для обеспечения требуемой жесткости маски. При этом точность изготовления резисторов типа «меандр» и «змейка» не превышает 20 %. Для получения большей точности рекомендуется применять конфигурацию, приведенную на рисунке 2.85, б.

«Меандр» уступает в отношении стабильности и надежности конструкции «змейка» из-за перегрева в уголках, но он предпочтительнее с точки зрения изготовле-

ния фотошаблонов и поэтому более распространён. Контактные площадки следует располагать с противоположных сторон резистора для устранения погрешности совмещения проводящего и резистивного слоёв.

Тонкоплёночные резисторы из плёнок чистого хрома, никрома или тантала имеют сопротивление от тысячных долей ома до десятков килоом. Для получения резисторов с большим сопротивлением (до десятков мегаом) применяют металлодиэлектрические смеси, например из хрома и монооксида кремния. Заданное значение сопротивления тонкоплёночного резистора обеспечивается выбором материала резистивной плёнки и геометрическими параметрами резистора.

Проводники, осуществляющие межэлементные соединения и подключение к выводным зажимам ИМС, обычно выполняют в виде тонкой плёнки золота, меди или алюминия, обеспечивающей электропроводность. Проводящая плёнка наносится на подслои никеля, хрома или титана для обеспечения хорошей адгезии к изоляционному основанию.

Толстоплёночные интегральные микросхемы

Толстоплёночные ИМС изготавливают на основе термостойкой и высокотеплопроводной керамической подложки, например алунда (96 % Al_2O_3). На подложки наносятся проводящие и резистивные пасты, представляющие собой смеси порошков благородных металлов и стекла, взвешенных в связующей органической жидкости. Нанесение паст производится через сетчатую трафаретную маску. После отжига на подложке образуются пассивные элементы, соединительные проводники и контактные площадки. Толщина плёнок не превышает 20 мкм. Недостатком толстоплёночных ИМС является значительный разброс параметров.

Полупроводниковые интегральные микросхемы

Полупроводниковые ИМС состоят из единого кристалла полупроводника, отдельные области которого выполняют функции транзистора, диода, резистора или конденсатора.

Транзисторы в полупроводниковых ИМС представляют собой трёхслойные структуры с двумя р-п-переходами, обычно п-р-п-типа, двухслойные структуры с одним р-п-переходом или транзисторы в диодном включении (рис. 2.86).

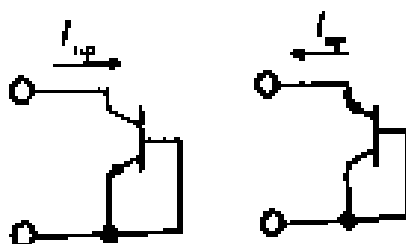


Рисунок 2.86 - Транзисторы в диодном включении

Роль конденсаторов в полупроводниковых ИМС выполняют р-п-переходы, запертые обратным постоянным напряжением. Максимальная величина ёмкости таких кон-

денсаторов 100-200 пФ, а во многих схемах менее 50 нФ, что является следствием малой площади используемых р-п-переходов (обычно 0.05 мм² и менее). Отклонение ёмкости конденсаторов от номинальной обычно составляет $\pm 20\%$.

Резисторы полупроводниковых интегральных микросхем представляют собой участки легированного полупроводника с двумя выводами. Сопротивление такого резистора зависит от удельного сопротивления полупроводника и геометрических размеров резисторов. Сопротивление резисторов обычно не превышает нескольких килоом. В качестве более высокоомных резисторов иногда используют обратное сопротивление р-п-перехода или входные зажимы эмиттерных повторителей, входные сопротивления которых могут достигать десятков и даже сотен килоом. Температурная стабильность резисторов полупроводниковых микросхем удовлетворительна во всём рабочем диапазоне. Отклонение сопротивления от номинального значения $\pm 20\%$ и более.

Дроссели в полупроводниковых ИМС получают в едином технологическом цикле в кристалле полупроводника.

На рисунке 2.87 в качестве примера показана последовательность получения изолированных участков кремния n-типа.

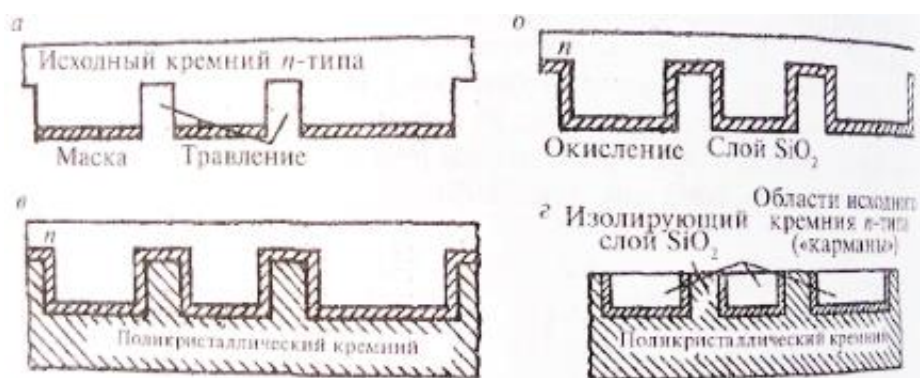


Рисунок 2.87 - Последовательность получения изолированных областей кремния n-типа

Технологический процесс разделяется на ряд этапов. Сначала на пластину исходного кремния n-типа методом фотолитографии наносят защитную маску и производят избирательное травление исходного кристалла кремния (рис. 2.87, а). Затем после смыывания маски осуществляют окисление поверхности кристалла кремния, на которой образуется изоляционный слой SiO₂ (рис. 2.87, б). На поверхность, защищенную слоем SiO₂, напыляют слой поликристаллического кремния (рис. 2.87, в). После повторного травления исходного кристалла кремния образуются изолированные области («карманы») исходного кремния n-типа (рис. 2.87, г).

В этих изолированных областях с помощью различных примесей создаются участки с электропроводностью р- и n-типов (рис. 2.88), которые образуют различные элементы микросхемы.



Рисунок 2.88 - Структура части полупроводниковой ИМС

Для соединения элементов между собой применяют золотые или алюминиевые плёнки, получаемые методом вакуумного напыления через маску соответствующей формы.

Соединения ИМС с внешними выводами осуществляют золотыми или алюминиевыми проводниками диаметром около 10 мкм, которые присоединяют к золотым или алюминиевым плёнкам методом термокомпрессии и приваривают к внешним выводам микросхемы.

Большинство микросхем имеют корпус, т.е. прямоугольный контейнер (пластмассовый, керамический, металлокерамический) с металлическими выводами (ножками). Существует множество различных типов корпусов, но наибольшее распространение получили два основных типа:

корпус с двухрядным вертикальным расположением штыревых выводов, например DIP (Dual In Line Package, Plastic) – пластмассовый корпус, DIC (Dual In Line Package, Ceramic) – керамический корпус. Эти корпуса носят общее название DIL (рис. 2.89, а). Расстояние между выводами составляет 0.1 дюйма (2.54 мм). Расстояние между рядами выводов зависит от количества выводов;

корпус с двухрядным плоскостным (планарным) расположением выводов, например FP (Flat-Package, Plastic) – пластмассовый плоский корпус, FPC (Flat-Package, Ceramic) – керамический плоский корпус. Расстояние между выводами составляет 0.05 дюйма (1.27 мм) или 0.025 дюйма (0.628 мм).

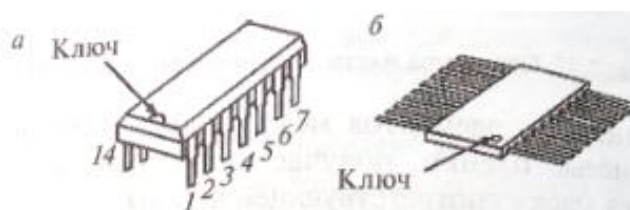


Рисунок 2.89 - Корпуса микросхем

Номера внешних выводов всех корпусов отсчитываются начиная с вывода, помеченным ключом, по направлению против часовой стрелки (если смотреть на микросхему сверху). Ключом может служить вырез на одной из сторон микросхемы, точка около первого вывода или утолщение первого вывода. Первый вывод может находиться в левом верхнем или в правом нижнем углу (в зависимости от того, как повернут корпус). Микросхемы обычно имеют стандартное число выводов из ряда: 4, 8, 14, 16, 20, 24, 28... Для микросхем стандартных цифровых серий используются корпуса с количеством выводов начиная с 14 (тип корпуса DIP14).

Назначение каждого из выводов микросхемы приводится в справочниках по микросхемам.

Микросхемы, которые производятся в странах – членах СНГ, выпускаются в корпусах, очень похожих на DIP и Flat, расстояния между их выводами вычисляются по метрической шкале и поэтому отличаются от принятых за рубежом на 0.4 мм. Для корпусов с малым числом выводов (до 20) это не слишком заметно, но для больших корпусов расхождение в расстоянии может стать существенным, в результате чего на плату, рассчитанную для зарубежных микросхем, нельзя устанавливать отечественные микросхемы, и наоборот.

Изготовление большого числа микросхем в едином технологическом цикле позволяет существенно усложнять их схемы и увеличивать число активных и пассивных элементов практически без повышения трудоёмкости изготовления.

Гибридные интегральные микросхемы

Гибридные ИМС содержат следующие конструктивные элементы: изоляционное основание из стекла, керамики или другого материала, на поверхности которого расположены плёночные проводники, контактные площадки, резисторы и конденсаторы; навесные бескорпусные активные элементы в специальном микроминиатюрном исполнении, которые невозможно выполнить в виде плёнок (трансформаторы, дроссели, конденсаторы большой ёмкости); пластмассовый или металлический корпус, который служит для герметизации схемы и крепления выводных контактов.

Применение интегральных микросхем

ИМС применяются во всех областях современной техники, где используют полупроводниковые приборы. Малые габариты и масса, большая надёжность, высокая стабильность и воспроизводимость параметров, низкий уровень собственных шумов, малое потребление энергии способствуют расширению номенклатуры РЭС, в которых вместо дискретных РЭК используют ИМС. Особенно велико значение ИМС для дальнейшего развития вычислительной техники, автоматики, телеизмерительной техники, систем управления технологическими процессами в промышленности и сельском хозяйстве, проводной, радио- и телевизионной связи и всех видов транспорта.

Логические элементы

Логический элемент – это электронная схема, реализующая логическую функцию над входными двоичными сигналами.

Логический элемент может иметь один или несколько входов для приёма сигналов, соответствующих исходным переменным – аргументам, и выход для сигнала, соответствующего результату операции.

На входы логических элементов подаются сигналы двух типов: 1 – с высоким потенциалом и 0 – с низким потенциалом. Соответственно, высокий уровень напряжения (напряжение логической единицы) символизирует **истинное** значение аргумента, а низкий (напряжение логического нуля) – **ложное**. Значение высокого и низкого уровней напряжения определяются электрическими параметрами схемы логического элемента и одинаковы как для входных, так и для выходных сигналов.

Логические элементы могут быть реализованы на дискретных полупроводниковых электронных приборах и резисторах. В настоящее время логические элементы выпускаются в виде отдельных ИМС.

Основными логическими операциями являются: НЕ – отрицание (инверсия); ИЛИ – дизъюнкция (логическое сложение); И – конъюнкция (логическое умножение).

С помощью перечисленных логических операций можно реализовать любую логическую схему. Совокупность логических элементов, обеспечивающих реализацию любых заданных функций, образует систему элементов любой ЭВМ.

Логический элемент И выполняет операцию логического умножения (конъюнкция) над входными сигналами. Он имеет от 2 до 8 входов и один выход. Как правило, выпускаются элементы с двумя, четырьмя и восемью входами.

Работу логического элемента И с двумя входами поясним на примере простейшей электрической цепи, содержащей последовательно соединённые источник питания, лампочку и два выключателя (рис. 2.90). Отсутствие сигнала на входе (логический ноль) соответствует разомкнутому положению выключателя, наличие сигнала (логическая единица) – замкнутому положению.

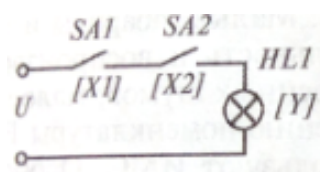


Рисунок 2.90 - Электрическая модель логического элемента И

Как видно из схемы, лампочка будет светиться только тогда, когда оба выключателя будут замкнуты.

Простейшая схема реализации логического элемента И на диодах представлена на рисунке 2.91.

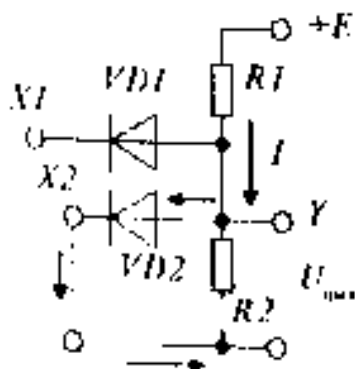


Рисунок 2.91 - Схема логического элемента И на диодах

Напряжение на выходе $U_{\text{вых}} = E$ ($Y=1$) только в том случае, когда все диоды будут заперты, т.е. на всех диодах будет потенциал E ($X1=1$ и $X2=1$). В противном случае открытый диод будет шунтировать нагрузочный резистор $R2$ и на нём будет напряжение $U_{\text{вых}} = 0$ (логический ноль, $Y=0$). На рисунке 2.101 показан вариант, когда $X2=0$ и диод $VD2$ проводит ток I , шунтируя нагрузку ($Y=0$).

На рисунке 2.92 приведены стандартные обозначения наиболее часто используемых логических элементов И с двумя, тремя и четырьмя входами, выполненных в

виде ИМС. В буквенно-цифровом формате эти элементы обозначаются 2И, 3И и 4И соответственно.

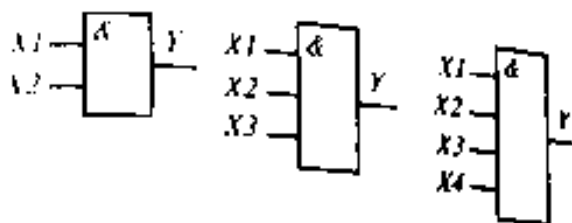


Рисунок 2.92 - Стандартные обозначения логических элементов И

Состояние и логическую связь между входными и выходными сигналами логического элемента И отражает таблица истинности (табл. 2.1), которая показывает выходное состояние двухвходового элемента для любых возможных состояний входов: X1 и X2 – входы; Y – выход.

Таблица 2.1 - Состояния логического элемента И

X1	X2	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Математическая конъюнкция записывается в виде

$$Y=X1 \wedge X2.$$

Логический элемент ИЛИ выполняет операцию логического сложения (дизъюнкцию) над входными сигналами и так же, как и логический элемент И, имеет от 2 до 8 входов и один выход.

На рисунке 2.93 представлена электрическая модель двухвходового логического элемента ИЛИ с использованием тех же элементов, что и на рисунке 2.101. Из рисунка 2.92 видно, что лампочка будет светиться ($Y=1$), если замкнуть один из выключателей, т.е. если подать на вход сигнал X1 или X2.

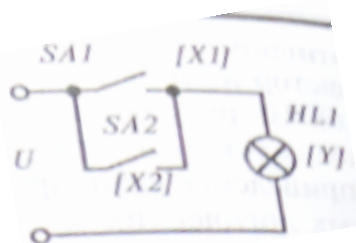


Рисунок 2.93 - Электрическая модель логического элемента ИЛИ

Реализация логического элемента ИЛИ с использованием диодов представлена на рисунке 2.94.

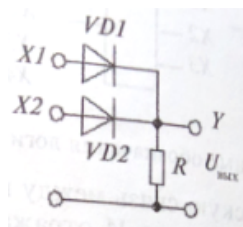


Рисунок 2.94 - Схема логического элемента ИЛИ на диодах

К диоду, на который входной сигнал не подаётся, приложено обратное напряжение, он будет находиться в закрытом состоянии.

На рисунке 2.95 приведены стандартные обозначения логического элемента ИЛИ с двумя, тремя и четырьмя входами, выполненными в виде ИМС. В буквенно-цифровом формате эти элементы обозначаются 2ИЛИ, 3ИЛИ и 4ИЛИ соответственно. Математически конъюнкция записывается в виде

$$Y = X1 \vee X2.$$

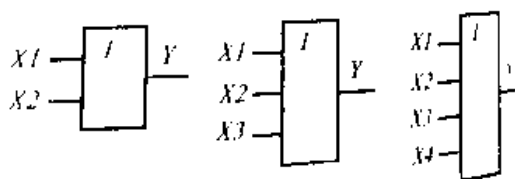


Рисунок 2.95 - Стандартные обозначения логических элементов ИЛИ

Выходное состояние двухвходового логического элемента ИЛИ для любых возможных состояний входов приведено в таблице истинности (табл. 2.2).

Таблица 2.2 - Состояния логического элемента ИЛИ

X1	X2	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Логический элемент НЕ выполняет операцию отрицания (инверсия) и имеет один вход X и один выход Y. Реализация логического элемента НЕ поясняется электрической схемой, представленной на рисунке 2.96.

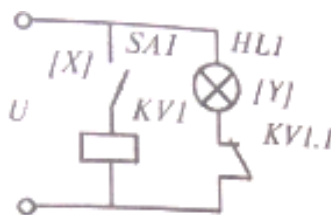


Рисунок 2.96 – Электрическая модель логического элемента НЕ

Цепь содержит источник питания, выключатель, лампочку и электромагнитное реле. При разомкнутом выключателе SA1 (X=0) напряжение на катушке электромагнитного реле KV1 отсутствует. Размыкающий контакт KV1.1 замыкает цепь питания

лампочки HL1 и она светится ($Y=1$). После замыкания выключателя SA1 ($X=1$) на катушку реле KV1 поступает напряжение, контакт KV1.1 разомкнёт цепь питания лампочка HL1 и она погаснет ($Y=0$). Таким образом, если на входе логического элемента НЕ есть сигнал, то на выходе сигнала не будет, и наоборот.

Реализацию логического элемента НЕ осуществляют с использованием транзистора, работающего в режиме ключа (рис. 2.97).

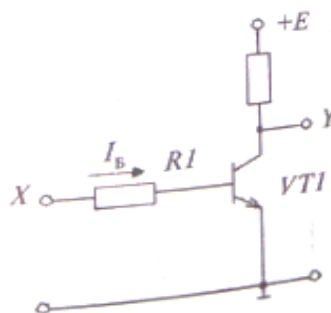


Рисунок 2.97 – Схема логического элемента НЕ на транзисторе

При отсутствии входного сигнала X транзистор VT1 закрыт и на его выходе устанавливается напряжение высокого уровня $U_{\text{вых}} = E$.

При поступлении входного сигнала ($X=1$) транзистор VT1 открывается за счет тока базы I_B , который вводит транзистор в режим насыщения и в результате этого на выходе транзистора устанавливается напряжение $U_{\text{вых}} = 0$.

Состояния логического элемента НЕ приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Состояние логического элемента НЕ

X	Y
0	1
1	0

Математически отрицание (инверсия) записывается в виде

$$Y = \bar{X}$$

Стандартное обозначение логического элемента НЕ представлено на рисунке 2.98.

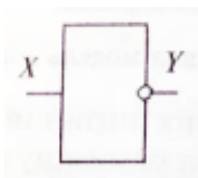


Рисунок 2.98 –Обозначение логического элемента НЕ

Комбинированные логические элементы представляют комбинацию логических элементов И, ИЛИ и НЕ в различных сочетаниях, что позволяет реализовать более сложные логические операции. В качестве примера на рисунке 2.99 приведён логический элемент 2И-ИЛИ-НЕ и его функциональный эквивалент, поясняющий операцию, выполняемую этим логическим элементом.

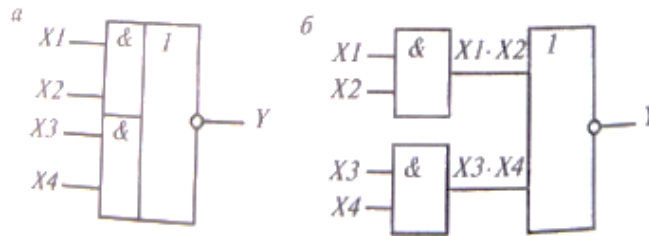


Рисунок 2.99 – Схема логического элемента 2И-ИЛИ-НЕ (а) и его функциональный эквивалент (б)

На рисунке 2.100 приведён логический элемент 2И-ИЛИ с инверсными входами по И и его функциональный эквивалент.

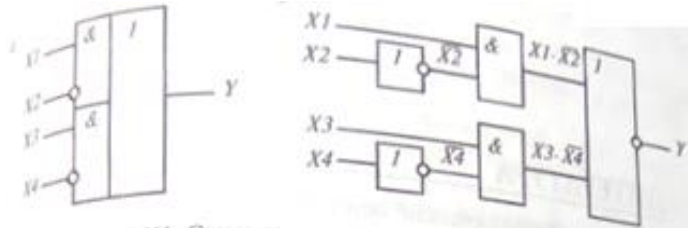


Рисунок 2.100 – Схема логического элемента 2И-ИЛИ (а) и его функциональных эквивалент (б)

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте общую характеристику интегральных микросхем.
2. Приведите классификацию интегральных микросхем.
3. Поясните особенности толстопленочных интегральных микросхем.
4. Объясните как устроены полупроводниковые интегральные микросхемы.
5. Объясните из чего состоят гибридные интегральные микросхемы.
6. Поясните работу логического элемента И.
7. Поясните работу логического элемента ИЛИ.
8. Поясните работу логического элемента НЕ.

Контрольные вопросы и задания

9. Дайте общую характеристику интегральных микросхем.
10. Приведите классификацию интегральных микросхем.
11. Поясните особенности толстопленочных интегральных микросхем.
12. Объясните как устроены полупроводниковые интегральные микросхемы.
13. Объясните из чего состоят гибридные интегральные микросхемы.
14. Поясните работу логического элемента И.
15. Поясните работу логического элемента ИЛИ.
16. Поясните работу логического элемента НЕ.

ОБУЧАЮЩИЙ РАЗДЕЛ

Методические указания и материалы для проведения лабораторных и практических работ

Лабораторная работа №1

Сборка цепей и исследование схем соединения резисторов

Цель работы: развить умение собирать цепи и анализировать схемы соединения резисторов.

Оснащение рабочего места:

- лабораторный стенд.
- методические указания.

1 Краткие теоретические сведения

Основные соотношения для последовательного соединения резисторов



Рисунок 1 - Схема электрическая принципиальная последовательного соединения.

Последовательное соединение резисторов характеризуется одинаковым током ($I_{\text{общ}}=I_1=I_2$) во всех резисторах, а падение напряжения прямо пропорциональны сопротивлениям.

$$U=\Sigma U_n, \quad (1)$$

где U – напряжение на входе схемы, В;

U_n – напряжение на каждом резисторе, В.

$$R_3=\Sigma R_n, \quad (2)$$

где R_3 – эквивалентное сопротивление схемы, Ом;

R_n – сопротивления отдельных элементов схемы, Ом.

$$P_3=\Sigma P_n, \quad (3)$$

где P_3 – эквивалентная (общая) мощность, Вт;

P_n – мощность на отдельных сопротивлениях схемы, Вт.

Основные соотношения для параллельного соединения резисторов

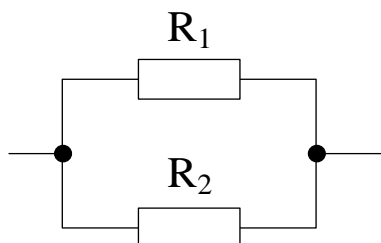


Рисунок 2 - Схема электрическая принципиальная параллельного соединения.

Параллельное соединение резисторов характеризуется одинаковым напряжением ($U_{\text{общ}}=U_1=U_2$) на каждом резисторе и всей цепи.

Ток на входе схемы

$$I=\Sigma I_n, \quad (4)$$

где I – ток на входе схемы, А;

I_n – токи на отдельных ветвях схемы, А.

Величина обратная электрическому сопротивлению R называется *электрической проводимостью* g .

$$g=1/R, \quad (5)$$

$$g_3=\Sigma g_n, \quad (6)$$

где g_3 – общая проводимость цепи, См;

g_n – проводимости отдельных ветвей, См.

Формула закона Ома для участка цепи.

$$I=U/R, \quad (7)$$

где I – величина тока, протекающего через участок цепи, А;

U – величина приложенного напряжения к участку цепи, В;

R – величина сопротивления рассматриваемого участка цепи, Ом.

При помощи *закона Ома для участка* цепи можно вычислить приложенное напряжение к участку цепи, либо напряжение на входных зажимах цепи.

Следовательно напряжение и сопротивление будет иметь следующий вид:

$$U = I \cdot R, \quad (8)$$

$$R = U/I, \quad (9)$$

Работа, совершаемая в единицу времени, называется мощностью:

$$P = \frac{W}{t} = UI \quad (10)$$

Используя закон Ома для участка цепи, согласно выражению $U = I \cdot R$ можно получить еще две формулы для вычисления мощности

$$P = I^2 \cdot R \quad (11)$$

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (12)$$

$$P_3=\Sigma P_n, \quad (13)$$

где P_3 – эквивалентная (общая) мощность, Вт;

P_n – мощность на отдельных сопротивлениях схемы, Вт.

2.7 Рассчитать значения R_1 , R_2 , R используя формулу (9), P_1 , P_2 , P используя формулы (11), (13).

2.8 Изучить и собрать электрическую цепь (рисунок 4, б). Проверить начальное положение органов управления: все тумблеры отключены, переключатели ЛАТРа установлены в положение, соответствующее $U_{\text{ВЫХ}} = 0 \text{ В}$.

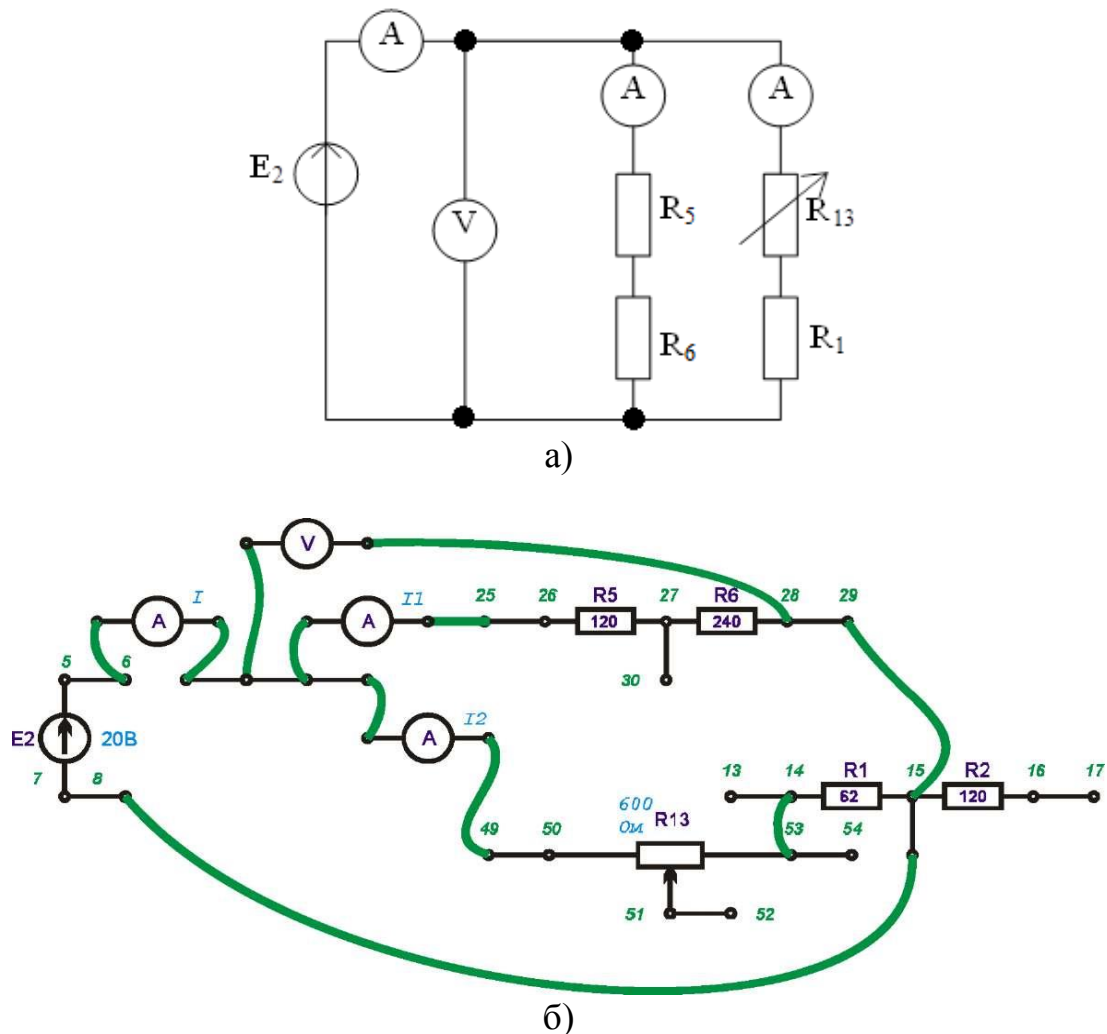


Рисунок 4 - Схема соединения резисторов: а) - Схема электрическая принципиальная параллельного соединении резисторов, б) – Схема сборки стенда параллельного соединения.

2.9 Переключатель на резистор R_{13} установить в положение 500 Ом. Установить галетными переключателями ЛАТРа напряжение источника E_2 около 20 В. Включить тумблер «Вкл.ИП», контролировать по вольтметру соответствие напряжения заданному значению, при необходимости подрегулировать его с помощью галетных переключателей. Занести показания приборов в таблицу 2. Увеличить выходное напряжение на ЛАТРе на несколько вольт, не допуская «зашкаливания» амперметра, измеряющего суммарный ток цепи. Занести показания приборов в таблицу 2.

2.10 Установить галетными переключателями ЛАТРа напряжение источника E_2 около 20 В. Перевести переключатель резистора R_{13} в положение 400 Ом. Занести показания приборов в таблицу 2.

Таблица 2 — Результаты измерений и вычислений при параллельном соединении резисторов

№ измерения	Измерить				Вычислить									
	U, В	I, А	I ₁ , А	I ₂ , А	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R, Ом	g ₁ , См	g ₂ , См	g, См	P ₁ , Вт	P ₂ , Вт	P, Вт	
1														
2														

2.11 Вычислите значения сопротивлений по формуле (9), проводимостей используя формулы (5), (6) и мощностей при параллельном соединении резисторов (11), (13) и результаты занести в таблицу 2.

2.12 Ответить на контрольные вопросы письменно.

2.13 Сделать вывод по работе.

3 Содержание отчёта

3.1 Название.

3.2 Цель работы.

3.3 Оснащение рабочего места.

3.4 Схема цепи: рисунок 3, а.

3.5 Таблица 1 с результатами измеренных и вычисленных параметров.

3.6 Схема цепи: рисунок 3, б.

3.7 Таблица 2 с результатами измеренных и вычисленных параметров.

3.8 Формулы с расчётами (5), (6), (9), (11), (13).

3.9 Ответы на контрольные вопросы.

3.10 Вывод по работе.

4 Контрольные вопросы и задания

4.1 Сформулируйте первый закон Кирхгофа.

4.2 Сформулируйте второй закон Кирхгофа.

4.3 Определите значения тока в неразветвленной части цепи. Если известно, что три резистора $R_1=9$ Ом, $R_2=3$ Ом, $R_3=6$ Ом соединены параллельно. Сила тока во втором сопротивлении $I_2=12$ А.

4.4 Укажите параметрами определяющие сопротивление проводника (Ответ подтвердите формулой)?

4.5 Начертите схему со смешанным соединением сопротивлений (не меньше 6) и рассчитайте общее сопротивление цепи, если $R_1=R_2=\dots=R_n=2$ Ом.

Лабораторная работа №2

Снятие регулировочной характеристики двигателя постоянного тока, построение графика

Цель работы:

- изучить конструкцию двигателя постоянного тока параллельного возбуждения;
- приобрести практические навыки в сборке схем и опытным исследовании двигателя при снятии показаний и построении основных характеристик;
- получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о двигателях постоянного тока параллельного возбуждения.

Оснащение рабочего места:

- лабораторный стенд.
- методические указания.

1 Краткие теоретические сведения

Двигатели постоянного тока имеют следующие характеристики:

Моментная характеристика – зависимость момента на валу двигателя от тока якоря при постоянном напряжении сети, представленная на рисунке 1.

Механическая характеристика – зависимость частоты вращения якоря от момента на валу двигателя при постоянном напряжении сети, представленная на рисунке 2.

Скоростная характеристика – зависимость частоты вращения якоря двигателя от момента на тока якоря $n=f(M)$ при $U=\text{const}$, представленная на рисунке 3.

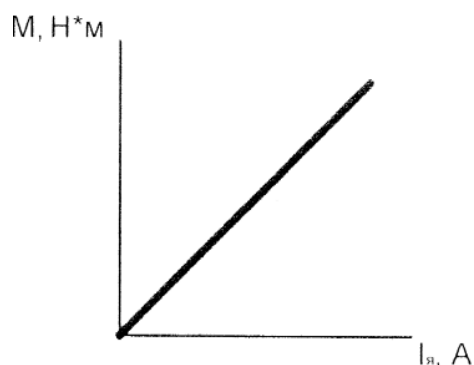


Рисунок 1 – Моментная характеристика

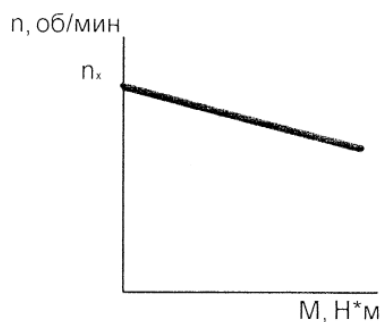


Рисунок 2 – Механическая характеристика

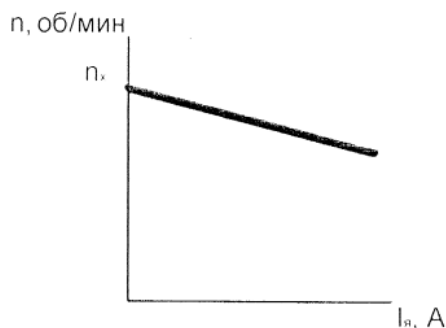


Рисунок 3 – Скоростная характеристика

Рабочие характеристики - представляют собой зависимость частоты вращения n , полезного момента M_2 и КПД η от полезной мощности P_2 при неизменных значениях напряжения питания двигателя U и тока возбуждения I_a , представлены на рисунке 4.

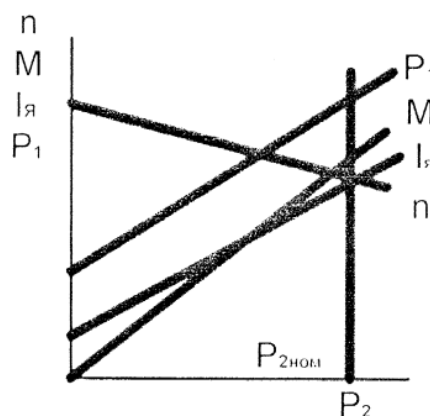


Рисунок 4 – Рабочие характеристики

2 Порядок выполнения работы:

2.1 Изучить краткие теоретические сведения п. 1.

2.2 Опыт холостого хода. Собрать схему, представленную на рисунке 5.

Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26, SA38), находятся в положении «выключено», все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении, все дополнительные переключатели (SA4, SA6, SA7, SA34, SA36, SA37, SA40) находятся в выключенном положении, коммутатор SA39 находится в крайнем левом положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки.

Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда – надпись «Сеть»).

Тумблер SA35 установить в положение «спарка M1, M2, M3».

Тумблером SA25 включить ШИП2.

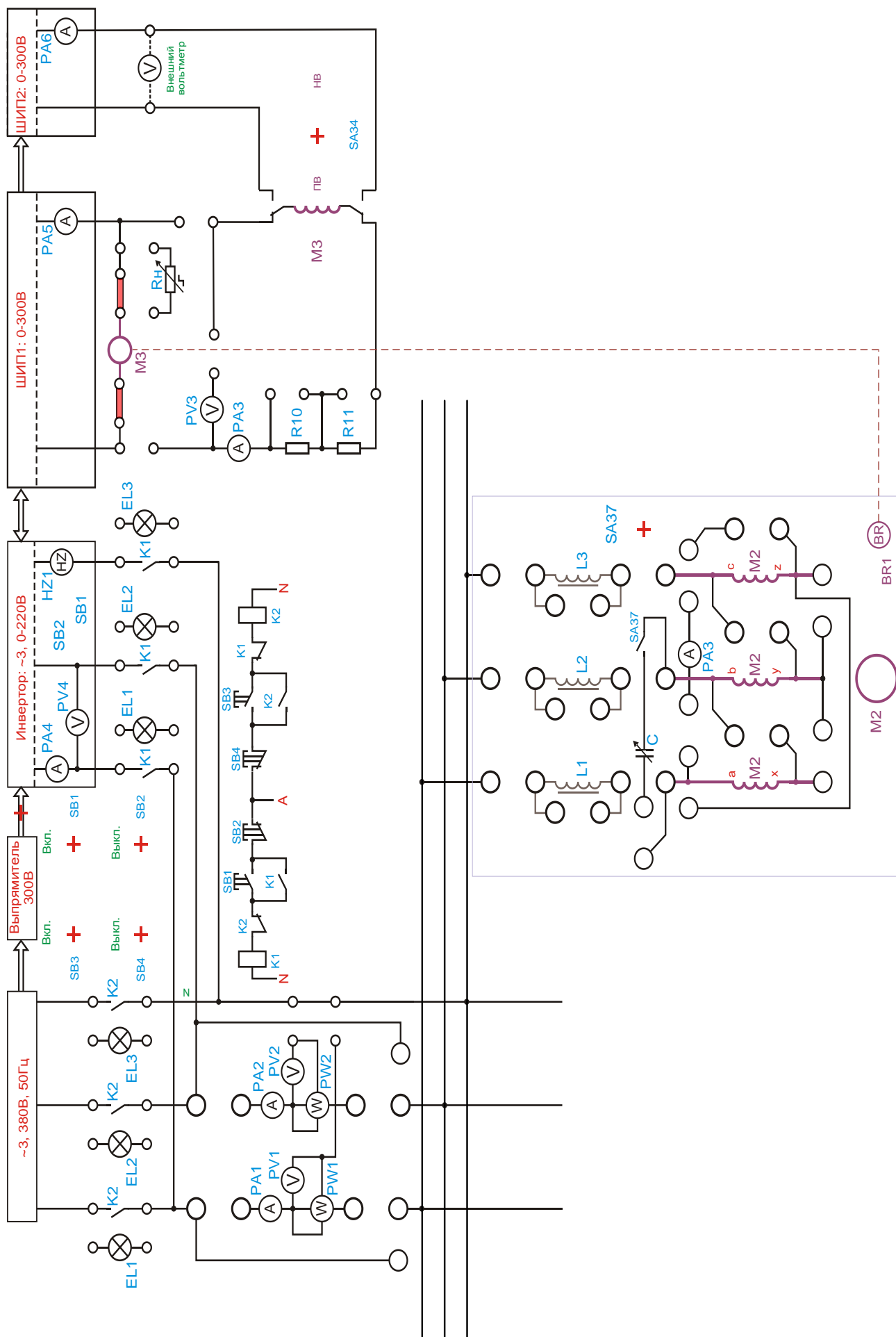


Рисунок 5 - Опыт холостого хода

С помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения исследуемой машины (контролировать по амперметру PA7).

Установить режим работы ШИП1: SA20 «Отключить замкнутую СУ», SA21 «Задание скорости», SA22 «Двигательный режим».

Тумблером SA23 включить ШИП1.

С помощью регулятора RP1 «Задание» плавно увеличить напряжение на якоре двигателя М3 до номинального значения (контролировать по вольтметру PV3).

Прогреть двигатель М3 в течение 5 минут.

С помощью регулятора RP1 «Задание» плавно уменьшить до нуля скорость вращения двигателя М3 (контролировать по прибору BR1).

Плавнo увеличивая регулятором RP1 «Задание» напряжение на якоре двигателя М3 до значения $U=250\text{В}$, снять 5-6 значений тока в цепи якоря двигателя М3, данные занести в таблицу 1.

Таблица 1 - Данные опыта холостого хода

№	Измерено			Вычислено	
	U_0 , В	I_{a0} , А	ω , рад/с	n , об/мин	P_{10} , Вт
1					
2					
...					

Завершив эксперимент, необходимо:

с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 уменьшить ток в цепи якоря двигателя М3 до нуля (контролировать по прибору PA5);

тумблером SA23 выключить ШИП1;

с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины М3 равное нулю (контролировать по амперметру PA6);

тумблером SA25 отключить ШИП2;

выключить автоматический выключатель «Сеть».

2.3 Выполнить расчет, используя формулы

Мощность при холостом ходе P_{10} , Вт, рассчитывается по формуле

$$P_{10} = U_0 \cdot I_{a0} \quad (1)$$

где P_{10} – мощность при опыте холостого хода, Вт.

U_0 – напряжение при опыте холостого хода, В.

I_{a0} – ток холостого хода в обмотке якоря, А.

Частота вращения якоря n , об/мин, рассчитывается по формуле

$$n = \frac{60\omega}{2\pi} \quad (2)$$

где n – частота вращения якоря, об/мин.

ω – угловая скорость вращения якоря, рад/с.

$\pi = 3,14$.

Мощность при холостом ходе $P_{1к}$, Вт, рассчитывается по формуле

$$P_{1к} = U_k \cdot I_{ак} \quad (3)$$

где $P_{1к}$ – мощность при опыте короткого замыкания, Вт.

U_k – напряжение при опыте короткого замыкания, В.

$I_{ак}$ – ток короткого замыкания в обмотке якоря, А.

Сопротивление якоря R_a , Ом, рассчитывается по формуле

$$R_a = \frac{P_{1к}}{I_{ак}^2} \quad (4)$$

где R_a – сопротивление якоря, Ом.

$P_{1к}$ – мощность при опыте короткого замыкания, Вт.

$I_{ак}^2$ – ток короткого замыкания в обмотке якоря, А.

2.4 Опыт короткого замыкания. **Внимание! Ток якоря не должен превысить $1,25I_n$ исследуемого двигателя.** Следует избегать продолжительной работы при токах якоря превышающих I_n , чтобы избежать перегрева двигателя.

Собрать схему, представленную на рисунке 6. Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26, SA38), находятся в положении «выключено», все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении, все дополнительные переключатели (SA4, SA6, SA7, SA34, SA36, SA37, SA40) находятся в выключенном положении, коммутатор SA39 находится в крайнем левом положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки.

Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда – надпись «Сеть»).

Тумблер SA35 установить в положение «спарка M1, M2, M3».

Установить выключатель SA30 в положение «PV1», SA31 в положение «PW2», SA31 в положение «PV3».

Тумблер SA34 перевести в положение «НВ».

Тумблером SA27 установить режим управления инвертора «U/f=const».

С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты Инвертора $f=0$ Гц (контролировать по прибору HZ1).

Кнопкой SB1 подключить асинхронный двигатель к выходу инвертора.

Тумблером SA26 включить Инвертор.

С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» плавно увеличить частоту вращения двигателей до номинального значения частоты вращения исследуемого двигателя (машины M3).

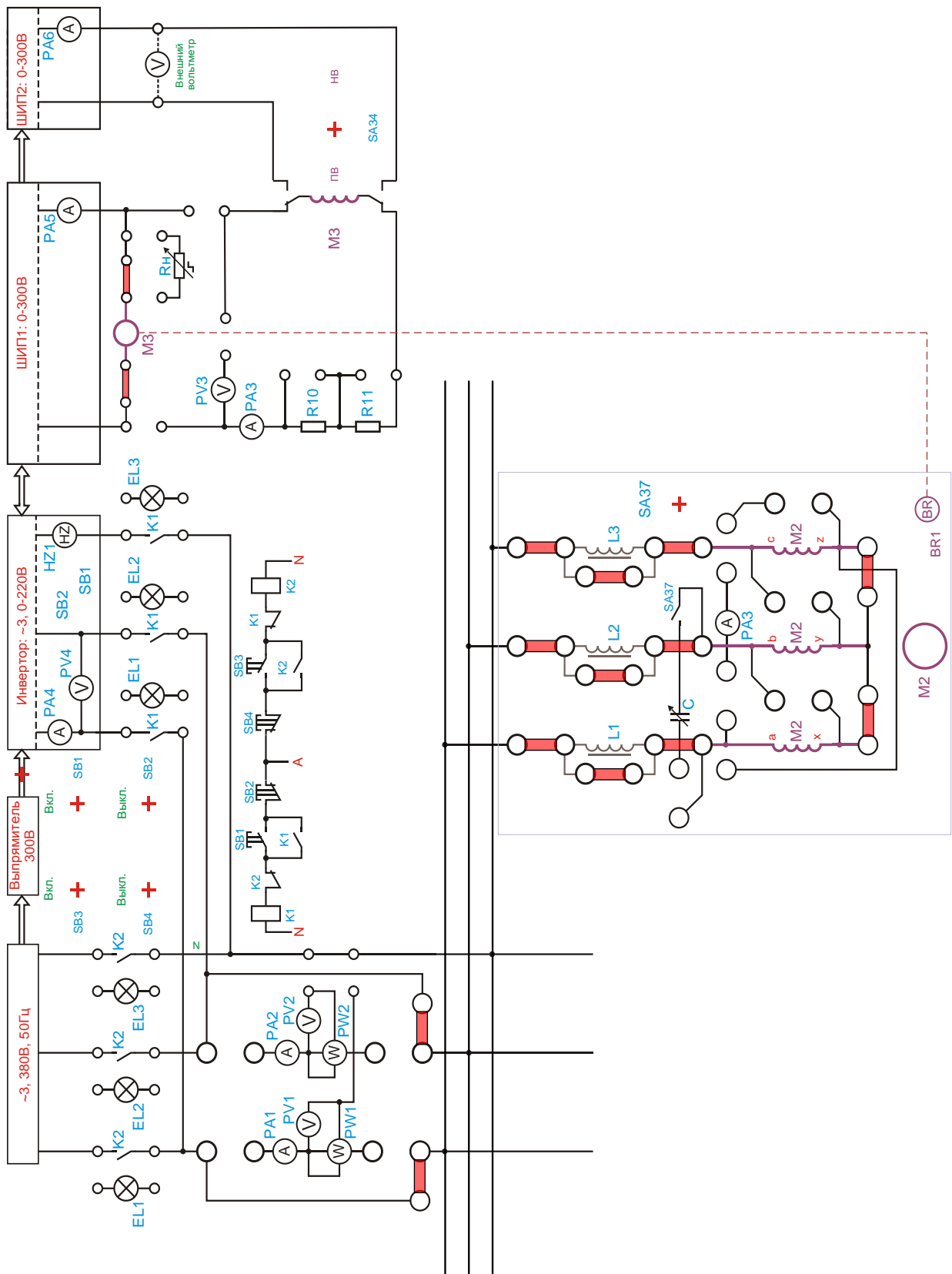


Рисунок 6 - Исследование двигателя постоянного тока параллельного возбуждения
 Установить режим работы ШИП1: SA20 «Отключить замкнутую СУ», SA21 «Задание скорости», SA22 «Генераторный режим».
 Установить регулятор RP1 «Задание» в крайнее правое положение.
 Тумблером SA23 включить ШИП1.
 Убедиться, что регулятор RP3 «Задание тока» ШИП2 находится в положении, соответствующем минимальному току возбуждения (крайнее левое положение).
 Тумблером SA25 включить ШИП2.

С помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 увеличивать ток возбуждения двигателя МЗ (контролировать по прибору РА6) до величины, при которой ток якоря будет не более $1,2I_n$ (контролировать по прибору РА5), занести данные 5-6 точек в таблицу 2.

Таблица 2 - Данные опыта короткого замыкания

№	Измерено		Вычислено		
	$U_K, В$	$I_{aK}, А$	$P_{1K}, Вт$	$r_a, Ом$	$r_a, Ом$
1					
2					
...					

Завершив эксперимент, необходимо:

- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 уменьшить ток в цепи якоря двигателя МЗ до нуля (контролировать по прибору РА5);
- тумблером SA23 выключить ШИП1;
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины МЗ равное нулю (контролировать по амперметру РА6);
- тумблером SA25 отключить ШИП2;
- выключить автоматический выключатель «Сеть».

Выполнить расчет, используя формулы (1), (2), (3), (4).

По результатам измерений и вычислений построить механическую, регулировочную и рабочие характеристики.

2.5 Ответить на контрольные вопросы письменно.

2.6 Сделать вывод по работе.

3. Содержание отчета:

3.1 Название.

3.2 Цель работы.

3.3 Оснащение рабочего места.

3.4 Схема цепи: рисунок 5, а.

3.5 Схема цепи: рисунок 6, б.

3.6 Таблица 1, 2 с результатами измеренных и вычисленных параметров.

3.7 Формулы с расчётами (1), (2), (3), (4).

3.8 Механическая, регулировочная и рабочие характеристики ДПТ параллельного возбуждения.

3.9 Ответы на контрольные вопросы.

3.10 Вывод по работе.

4 Контрольные вопросы и задания

4.1 Объясните, с какой целью при пуске ДПТ параллельного возбуждения на регулировочном реостате устанавливается минимальное сопротивление?

4.2 Установите, что произойдет с работающим двигателем, если произойдет обрыв цепи возбуждения?

4.3 Укажите способы регулировки частоты вращения возможны в двигателях с параллельным возбуждением? Пояснить математически.

4.4 Укажите, какие достоинства имеет ДПТ с параллельным возбуждением? Чем объясняется их сравнительно низкий КПД?

4.5 Объясните, почему при увеличении нагрузки на двигатель уменьшается частота вращения? Чем объяснить при этом увеличение искрения под щетками?

4.6 Опишите из каких цепей состоит пусковой реостат?

Лабораторная работа № 3

Измерение сопротивлений с помощью амперметра и вольтметра, измерительного моста.

Цель работы:

опытным путем измерить сопротивление методом амперметра и вольтметра, и рассчитать погрешности.

Оснащение рабочего места:

- лабораторный стенд.
- методические указания.

1 Краткие теоретические сведения

Метод амперметра-вольтметра

Данный метод основан на измерении тока, протекающего через измеряемое сопротивление и падения напряжения на нем. Применяют две схемы измерения: измерение больших сопротивлений (1, а) и измерение малых сопротивлений (1, б). По результатам измерения тока и напряжения определяют искомое сопротивление.

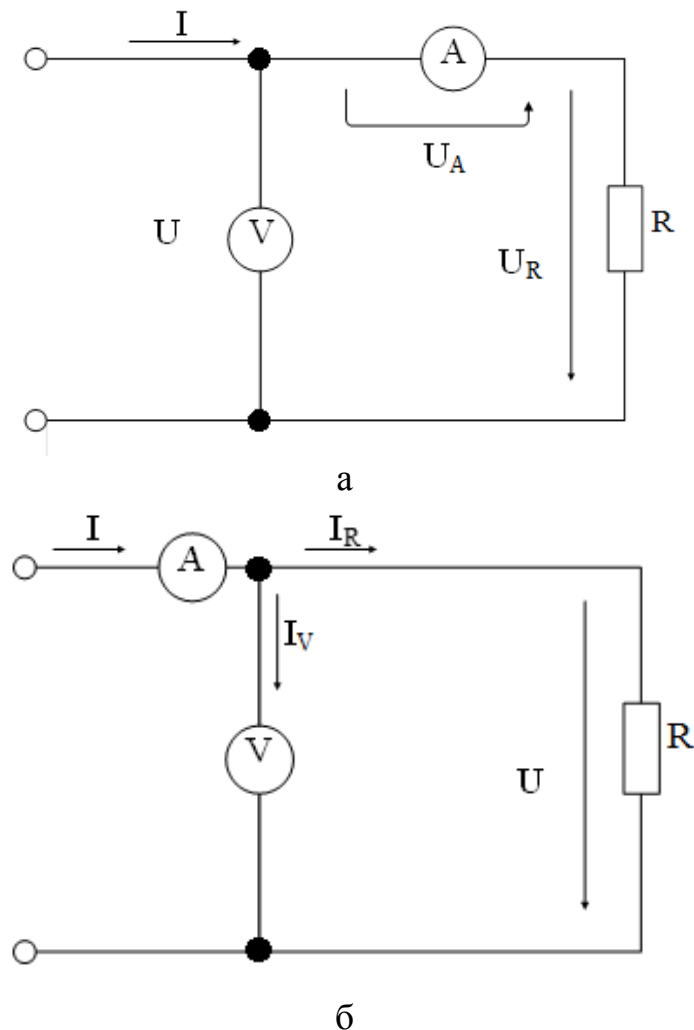


Рисунок 1 а, б - Схема электрическая принципиальная для измерения методом амперметра и вольтметра

При использовании варианта измерений, изображенного на рис.2б, последовательно с измеряемым сопротивлением включается амперметр, и поэтому ток, протекающий через него, равен току, протекающему через резистор. Падение напряжения на вольтметре, однако, в этом случае, равно сумме падений напряжения на амперметре и на исследуемом резисторе:

$$U = U_R + U_A = U_R + IR_A, \quad (1)$$

где R_A – сопротивление амперметра.

В качестве оценки измеряемого сопротивления в этом случае также следует принять отношение показаний измерительных приборов, которое составляет величину:

$$\frac{U}{I} = \frac{U_R + IR_A}{I} = R + R_A, \quad (2)$$

то есть при использовании этого метода также возникает систематическая погрешность, относительная величина которой равна:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_A}{R}, \quad (3)$$

и стремится к нулю при уменьшении сопротивления амперметра: $R_A \ll R$.

Таким образом, оба рассмотренных варианта применения метода амперметра-вольтметра обладают систематическими погрешностями, то есть их использование приводит к *смещенным оценкам* измеряемого сопротивления.

Достоинство схем метода измерения амперметром и вольтметром заключается в том, что по резистору с измеряемым сопротивлением можно пропускать тот же ток, как и в условии его работы, что является важным при измерении сопротивлений, значения которых зависят от тока.

2 Порядок выполнения работы

2.1 Изучить краткие теоретические сведения п.1.

2.2 Изучив измерительные приборы заполните таблицу 1.

Таблица 1 – Оборудование рабочего места

Прибор	Количество	Система приборов	Предел измерения	Цена деления	Класс точности	Примечания

2.3 Собрать цепь (рисунок 2) и получить разрешение на проведение измерений у преподавателя.

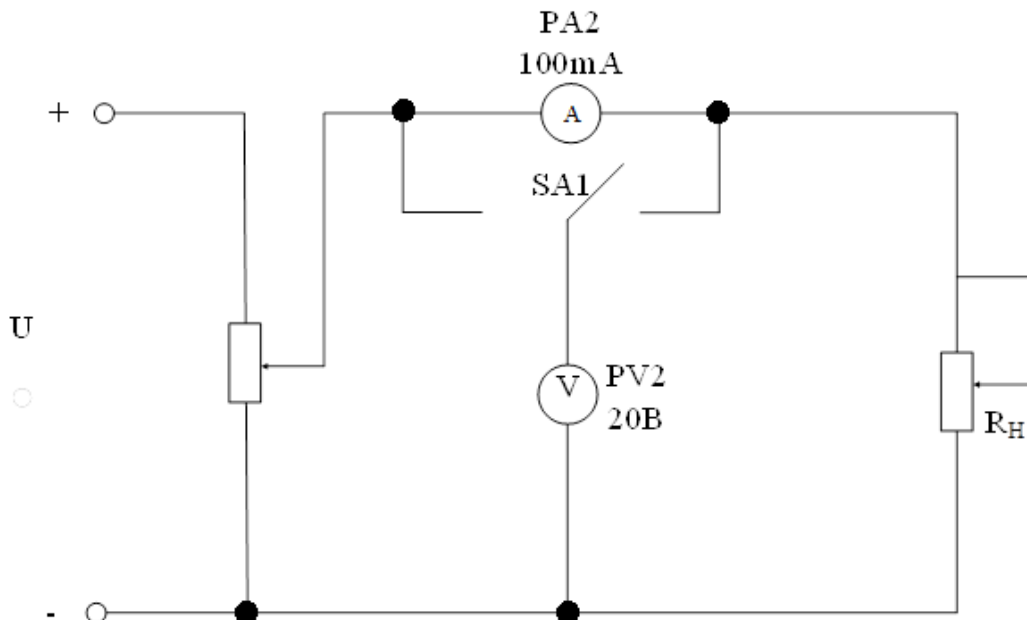


Рисунок 2 – Принципиальная схема электрической цепи

2.4 Измерить сопротивление резисторов методом амперметра и вольтметра в двух положениях переключателя SA1.

2.5 Измерить сопротивление тестером.

2.6 Данные измерений и вычислений занести в таблицу 2.

Таблица 2 – Измеренные и вычисленные величины.

Измерить				Вычислить					
$U_1, В$	$U_2, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_{ср}, Ом$	$R_д, Ом$	$\Delta R, Ом$	$\delta, \%$

2.7 Произвести расчеты используя ниже приведенные формулы. Сопротивления R , Ом, рассчитывается по формуле

$$R = \frac{U}{I}, \quad (4)$$

где R – сопротивление, Ом;

U – напряжение, В;

I – сила тока, А.

Среднее значение сопротивления $R_{ср}$, Ом, рассчитывается по формуле

$$R_{ср} = \frac{R_1 + R_2}{2}, \quad (5)$$

где $R_{ср}$ – среднее значение сопротивления резисторов, Ом;

R_1 – значение сопротивления первого резистора, Ом;

R_2 – значение сопротивления второго резистора, Ом.

Сопротивление добавочного резистора $R_д$, Ом, рассчитывается по формуле

$$R_{\text{д}} = R_{\text{ПР}} \left(\frac{U_{\text{х}}}{U_{\text{ПР}}} - 1 \right), \quad (6)$$

где $U_{\text{х}}$ – максимально напряжение на входе схемы, подлежащее измерению, В;

$U_{\text{ПР}}$ – максимальные пределы измерения непосредственно вольтметром, В;

$R_{\text{ПР}}$ – измеренное сопротивление вольтметра, Ом.

Абсолютная методическая погрешность ΔR , Ом, рассчитывается по формуле

$$\Delta R = R_{\text{ср}} - R_{\text{д}}, \quad (7)$$

где ΔR – абсолютная методическая погрешность, Ом;

$R_{\text{ср}}$ – среднее значение сопротивления резисторов, Ом;

$R_{\text{д}}$ – добавочный резистор, Ом.

Относительная методическая погрешность измерения δ , %, рассчитывается по формуле

$$\delta = \frac{\Delta R}{R_{\text{д}}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где δ – относительная методическая погрешность измерения, %;

ΔR – абсолютная методическая погрешность, Ом;

$R_{\text{д}}$ – добавочный резистор, Ом.

2.8 Ответить на контрольные вопросы письменно.

2.9 Сделать вывод по работе.

3 Содержание отчёта

3.1 Название.

3.2 Цель работы.

3.3 Оснащение рабочего места.

3.4 Схема цепи: рисунок 2.

3.5 Таблица 1, 2 с результатами измеренных и вычисленных параметров.

ров.

3.6 Формулы с расчётами (4), (5), (6), (7), (8).

3.7 Ответы на контрольные вопросы.

3.8 Вывод по работе.

4 Контрольные вопросы и задания

4.1 Перечислите, какие существуют методы измерения сопротивления

4.2 Сформулируйте понятие электрического сопротивления?

4.3 Укажите факторы, от которых зависит величина сопротивления.

4.4 Перечислите приборы, которыми измеряют сопротивление в цепи.

4.5 Укажите алгоритм для измерения сопротивления мостовым методом.

4.6 Сформулируйте понятие логометра.

Лабораторная работа № 4

Составление схемы и исследование работы неразветвленной цепи переменного тока с активным сопротивлением и индуктивностью.

Цель работы: исследовать свойства цепи переменного тока при последовательном соединении активного сопротивления и катушки индуктивности, построить векторные диаграммы.

Оснащение рабочего места:

- лабораторный стенд.
- методические указания.

1 Краткие теоретические сведения

Неразветвленная цепь обладает активным сопротивлением R и индуктивностью L и подключается к источнику синусоидального напряжения.

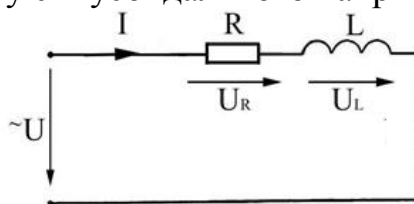


Рисунок 1 – Принципиальная схема электрической цепи с активным сопротивлением и индуктивностью

Активное сопротивление R , Ом, рассчитывается по формуле

$$R = \frac{P}{I^2}, \quad (1)$$

где R – активное сопротивление, Ом;

P – активная мощность, Вт;

I – сила тока, А.

Активное сопротивление катушки R_2 , Ом, рассчитывается по формуле

$$R_2 = \frac{U_2}{I}, \quad (2)$$

где R_2 – активное сопротивление катушки, Ом;

U_2 – напряжение, В;

I – сила тока, А.

Активное сопротивление катушки R_1 , Ом, рассчитывается по формуле

$$R_1 = R - R_2, \quad (3)$$

где R_1 – активное сопротивление, Ом;

R – активное сопротивление, Ом;

R_2 – активное сопротивление катушки, Ом;

Полное сопротивление катушки Z_K , Ом, рассчитывается по формуле

$$Z_k = \frac{U_1}{I}, \quad (4)$$

где Z_k – полное сопротивление катушки, Ом;

U_1 – напряжение, В;

I – сила тока, А.

Реактивно индуктивное сопротивление X_L , Ом, рассчитывается по формуле

$$X_L = \sqrt{Z_k^2 - R_1^2}, \quad (5)$$

где X_L – реактивно индуктивное сопротивление, Ом;

Z_k – полное сопротивление катушки, Ом;

R_1 – активное сопротивление, Ом.

Индуктивность катушки L , Гн, рассчитывается по формуле

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}, \quad (6)$$

где L – индуктивность катушки, Гн;

X_L – реактивно индуктивное сопротивление, Ом;

f – частота сети, Гц;

$\pi = 3,14$.

Напряжение U , В, рассчитывается по формулам

$$U_{R1} = I R_1, \quad (7)$$

$$U_{R2} = I R_2, \quad (8)$$

$$U_L = I X_L, \quad (9)$$

$$U_R = U \cos \varphi. \quad (10)$$

где U_{R1} , U_L , U_{R2} , U_R , U – напряжение, В;

I – сила тока, А;

R_1 – активное сопротивление, Ом;

I – сила тока, А;

X_L – реактивно индуктивное сопротивление, Ом;

R_2 – активное сопротивление, Ом;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности.

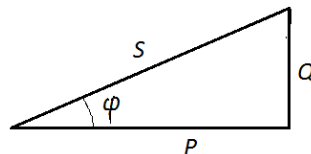


Рисунок 2 – Треугольник мощностей.

Угол сдвига фаз между векторами входного напряжения и тока в цепи определяют из треугольника мощностей:

$$\cos\varphi = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{P}{S}, \quad (11)$$

где $\cos\varphi$ - коэффициент мощности;

P – активная мощность, Вт;

I – сила тока, А;

U – напряжение, В.

2 Порядок выполнения работы

2.1 Изучить краткие теоретические сведения п. 1.

2.2 Ознакомиться с приборами и оборудованием работы.

2.3 Собрать схему работы (рисунок 2).

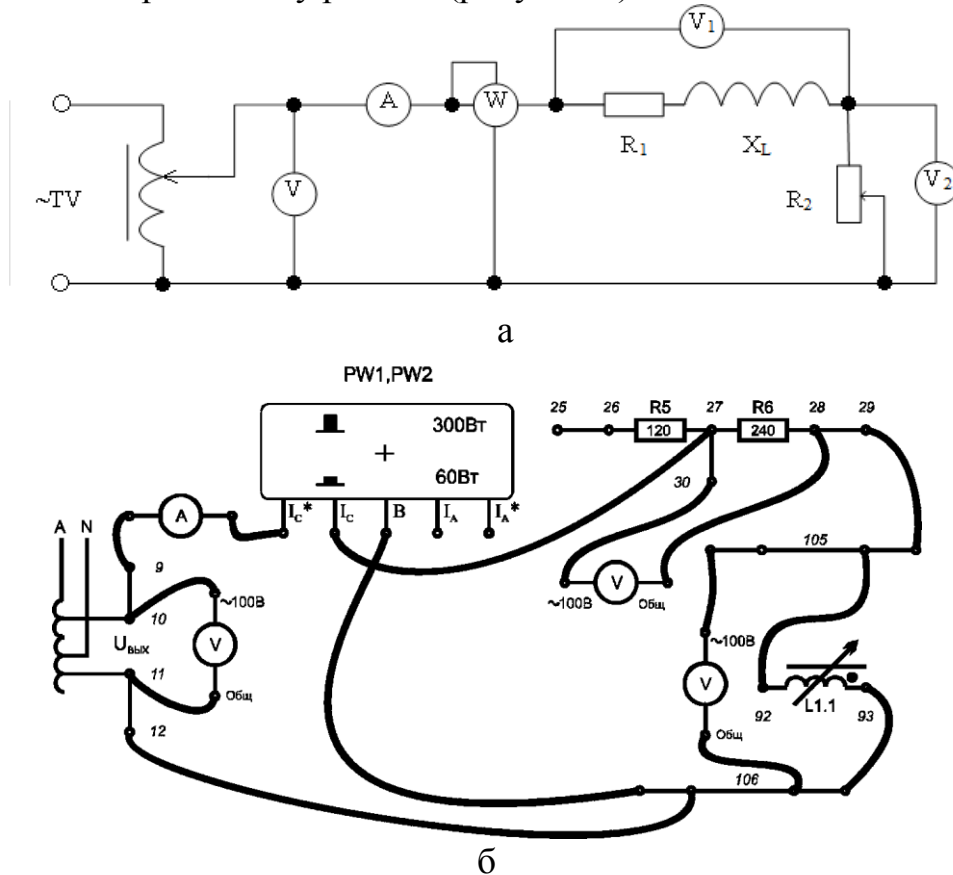


Рисунок 2 — а) Схема электрическая принципиальная неразветвленной цепи переменного тока с активным сопротивлением и индуктивностью; б) Схема сборки стенда неразветвленной цепи переменного тока с активным сопротивлением и индуктивностью

2.4 Проверить начальное положение органов управления: все тумблеры отключены, переключатели ЛАТРа установлены в положение, соответствующее $U_{\text{вых}} = 0$ В, а тумблер переключения диапазона регулирования напряжения ЛАТРа - в «нижнее» положение «0 - 100 В». Установить переключатель на катушке L1.1 в положение «5».

2.5 Получив разрешение преподавателя, включить стенд. Увеличивать напряжение от «0» до значения 35-45 В, при котором ток не превышает 0,1 А. Показания приборов записать в таблицу 1. Выключить тумблер «Вкл.ИП».

2.6 Поочередно устанавливая переключатель L1.1 в положение - «9», включить тумблер «Вкл.ИП» и повторить измерения. Показания приборов записать в таблицу 1.

2.7 Выключить тумблер «Вкл.ИП». Выключить стенд. Переключатели ЛАТРа установить в положение, соответствующее $U_{\text{вых}} = 0 \text{ В}$.

Таблица 1 — Результаты измерений и вычислений

№ опыта	Измерить					Рассчитать										
	U, В	U ₁ , В	U ₂ , В	I, А	P, Вт	R, Ом	R ₁ , Ом	R ₂	Z _к ,	X _L ,	L, Гн	U _{R1} , В	U _{R2} , В	U _L , В	U _R , В	cosφ

2.8 Произвести расчет по формулам (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11) из теоретических сведений.

2.9 Построить векторные диаграммы напряжений в масштабе по данным из таблицы 1.

2.10 Ответить на контрольные вопросы письменно.

2.11 Сделать вывод по работе.

3 Содержание отчёта

3.1 Название.

3.2 Цель работы.

3.3 Оснащение рабочего места.

3.4 Схема цепи: рисунок 2, а.

3.5 Таблица 1 с результатами измеренных и вычисленных параметров.

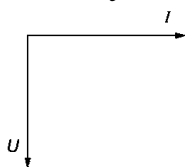
3.6 Формулы с расчётами (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11).

3.7 Ответы на контрольные вопросы.

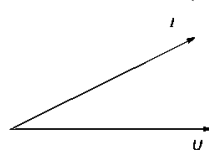
3.8 Вывод по работе.

4 Контрольные вопросы и задания

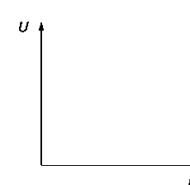
4.1 Выберите правильную векторных диаграмму, которая соответствует цепи с идеальной катушкой индуктивности (Вращение против часовой стрелки)?



а)



б)



в)

4.2 Укажите связь между активным, реактивным и полным сопротивлением.

4.3 Запишите, как изменится реактивно-индуктивное сопротивление, если увеличить частоту.

4.4 Определите ток при известных параметрах в неразветвленной цепи $U_m=311 \text{ В}$, активное сопротивление равно 10 Ом реактивно-емкостное сопротивление 15 Ом

Лабораторная работа №5

Сборка и исследование работы трехфазной цепи при соединении потребителей энергии звездой.

Цель работы: изучить режим работы приёмников при соединении звездой, выявить роль нейтрального провода, построить топографическую диаграмму.

Оснащение рабочего места:

- лабораторный стенд;
- методические указания.

1 Краткие теоретические сведения

Фазы трехфазного потребителя могут соединяться в звезду при равномерной (асинхронный двигатель) и неравномерной (осветительные, бытовые приборы) нагрузке фаз.

При неравномерной нагрузке фаз ($Z_A \neq Z_B \neq Z_C$) между узловыми токами генератора и потребителя возникает смещение нейтрали, которое определяется по методу узлового напряжения.

$$U'_{Nn} = \frac{E_A * Y_A + E_B * Y_B + E_C * Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0}, \quad (1)$$

где U_{Nn} – напряжение смещения нейтрали, В;

$E_{a,b,c}$ – Э.Д.С. в фазах источника, В;

$Y_{A,B,C}$ – проводимость в фазах, См.

Это напряжение искажает напряжение на отдельных фазах потребителя:

$$\begin{aligned} U_A &= E_A - U_{Nn}; \\ U_B &= E_B - U_{Nn}; \\ U_C &= E_C - U_{Nn}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $U_{A,B,C}$ – напряжение в фазах потребителя, В.

Это что ведет к не симметрии фазных токов. Для выравнивания фазных напряжений необходим нулевой провод. При обрыве линейного провода на месте разрыва возникает напряжение, равное $1,5 U_{\phi}$, а на оставшихся фазах напряжения уменьшается до значения половины фазного напряжения. Если нагрузка несимметрична, то напряжения на фазах окажутся неодинаковыми.

2 Порядок выполнения работы

2.1 Изучить краткие теоретические сведения п.1.

2.2 Соберите схему (рисунок 1). Включить тумблеры S1 - S15, т.е. установить симметричную нагрузку фаз - в каждой фазе включено по 5 ламп (рычажок в верхнее положение; схема включения нагрузки: 5=5=5). Получив разрешение преподавателя, включить стенд тумблером «СЕТЬ».

При равномерной нагрузке фаз измерьте линейные токи, фазные и линейные напряжения. При замкнутом тумблере S24 (схема включения нагрузки - звезда с нейтралью) включить тумблер подачи трехфазного питания в схему S25. Любым сво-

2.6 Рассчитать мощности используя формулы

$$P_A=I_A U_A, P_B=I_B U_B, P_C=I_C U_C, \quad (3)$$

где P – мощность фазы, Вт;

I_A, I_B, I_C – сила токи фаз А, В, С, А;

U_A, U_B, U_C - коэффициент мощность.

$$P_\Phi=P_A+P_B+P_C, \quad (4)$$

Для нахождения $\cos\phi$ необходимо будет использовать $U_L=2 \cdot U_\Phi \cdot \cos\phi$, данные занести в таблицу 1.

2.7 Построить в масштабе векторные диаграммы.

2.8 Ответить на контрольные вопросы письменно.

2.9 Сделать вывод по работе.

3 Содержание отчёта

3.1 Название.

3.2 Цель работы.

3.3 Оснащение рабочего места.

3.4 Схема цепи: рисунок 1, а.

3.5 Таблица 1 с результатами измеренных и вычисленных параметров.

3.6 Формулы с расчётами (3), (4).

3.7 Постройте в масштабе векторные диаграммы.

3.8 Ответы на контрольные вопросы.

3.9 Вывод по работе.

4 Контрольные вопросы и задания

4.1 Укажите роль нейтрального провода?

4.2 Назовите условия симметрии трехфазных систем?

4.3 Назовите, чему равен ток в нейтральном проводе при симметричной системе.

4.4 Нарисуйте включение трех лампочек “треугольником” в трехпроводную линию передач.

Лабораторная работа № 6

Составление схемы и исследование работы однофазного трансформатора

Цель работы:

- ознакомиться с устройством трансформатора;
- усвоить практические приемы лабораторного исследования трансформатора методом холостого хода и короткого замыкания;
- соблюдать правила безопасности при работе в лаборатории.

Оснащение рабочего места:

- лабораторный стенд.
- методические указания.

1 Краткие теоретические сведения

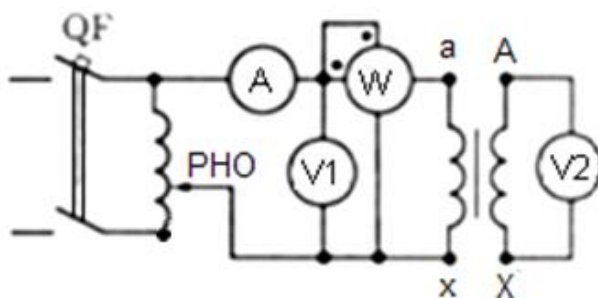


Рисунок 1 – Опыт холостого хода

Опыт холостого хода. В схеме включения однофазного трансформатора при опыте х.х. применен регулятор, позволяющий плавно регулировать подводимое к первичной обмотке напряжение. В качестве первичной обмотки обычно используют обмотку низшего напряжения НН. Всего делают не менее пяти замеров через приблизительно одинаковые интервалы тока х.х. изменяя подводимое к трансформатору напряжение от $0.5U_{\text{НОМ}}$ до $1.15U_{\text{НОМ}}$.

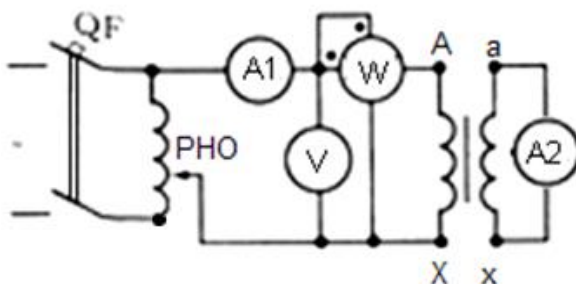


Рисунок 2 – Опыт короткого замыкания

Опыт короткого замыкания. При опыте короткого замыкания трансформатора напряжение обычно подводят к обмотке ВН, номинальное значение тока в которой меньше, чем в обмотке НН. В некоторых случаях это позволяет включать ваттметр в первичную цепь без трансформатора тока.

Вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко медным проводом достаточного поперечного сечения, чтобы не создавать во вторичной цепи трансформатора значительного электрического сопротивления.

2 Порядок выполнения работы

- 2.1 Изучить краткие теоретические сведения п.1.
- 2.2 Провести исследования на лабораторном стенде, снять данные.
- 2.3 Опыт холостого хода. Собрать схему, представленную на рисунке

3.

Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда – надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26, SA38), находятся в положении «выключено», все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении, все дополнительные переключатели (SA4, SA6, SA7, SA34, SA36, SA37) находятся в выключенном положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключатели.

Установить выключатель SA30 в положение «PV1», SA31 в положение «PW2». Тумблером SA27 установить независимый режим управления Инвертора. С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты $f=50\text{Гц}$ (контролировать по прибору HZ1).

Подключить исследуемый трансформатор к выходу Инвертора, нажав кнопку SB1. Включить тумблеры SA6, SA7.

Тумблером SA26 включить Инвертор. При помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» Инвертора плавно увеличивая напряжение на первичной обмотке трансформатора от 50В до 220В (контролировать по вольтметру PV4) через приблизительно равные промежутки для 5-6 точек (одна из них должна соответствовать номинальному напряжению) снять показания приборов PV1, PW2, PA2, PV3. Данные занести в таблицу 1.

Таблица 1 - Данные опыта холостого хода

№	Измерено				Вычислено				
	$U_1, \text{В}$	$I_0, \text{А}$	$P_0, \text{Вт}$	$U_{20}, \text{В}$	R_0	X_0	Z_0	$\cos\varphi_0$	n
1									
2									
...									

Завершив эксперимент, необходимо:

- плавно вывести регулятор RP5 «Задание напряжения» в крайнее левое положение;
- выключить тумблеры SA6, SA7;
- тумблером SA26 выключить Инвертор;
- отключить исследуемый трансформатор от выхода инвертора, нажав кнопку SB2;
- выключить автоматический выключатель «Сеть».

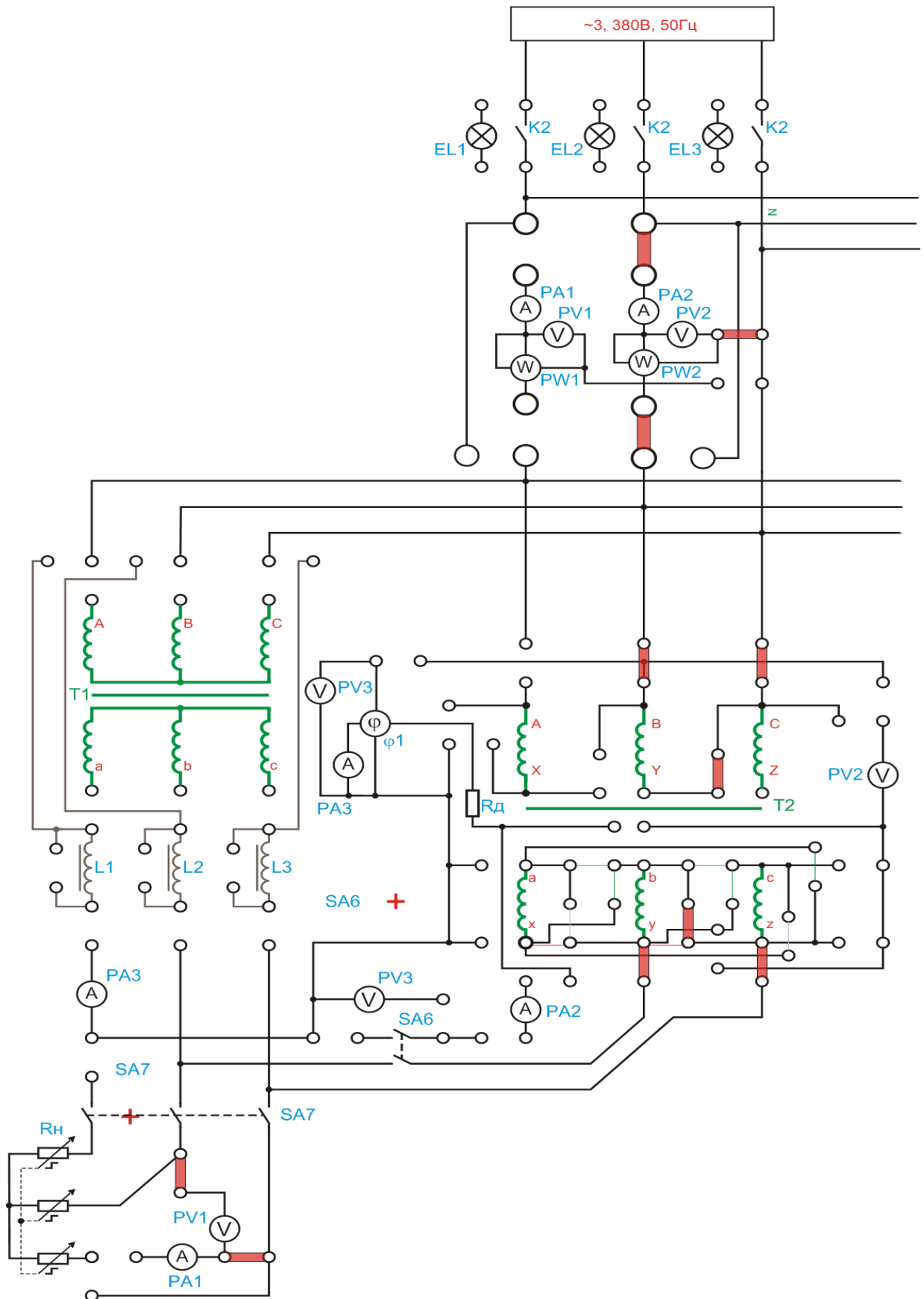


Рисунок 3 – Исследование однофазного трансформатора методом холостого хода

Выполнить расчет, используя формулы:

Коэффициент трансформации K_T , рассчитывается по формуле

$$K_T = \frac{U_1}{U_2}, \quad (1)$$

где K_T – коэффициент трансформации.

U_1 – напряжение первичной обмотки трансформатора, Вт.

U_2 – напряжение вторичной обмотки трансформатора, Вт.

Полное сопротивление холостого хода трансформатора Z_0 , Ом, рассчитывается по формуле

$$z_0 = z_m \cos \varphi, \quad (2)$$

где z_0 – полное сопротивление холостого хода трансформатора, Ом.

z_m – полное сопротивление намагничивающей ветви, Ом.

Коэффициент мощности $\cos \varphi$ рассчитывается по формуле

$$\cos \varphi = \frac{P_0}{U_1 I_0}, \quad (3)$$

где φ – угол между током и напряжением, град.

Индуктивное сопротивление x_m рассчитывается по формуле

$$x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2}, \quad (4)$$

где x_m – индуктивное сопротивление, Ом.

r_m – активное сопротивление намагничивающей ветви, Ом.

2.4 Опыт короткого замыкания. ВНИМАНИЕ! Ток первичной обмотки трансформатора не должен превысить $1,2 \cdot I_n$.

Продолжительность каждого отсчёта не должна превышать 10с.

Опыт требует хорошей организации и слаженной работы бригады студентов. На каждого наблюдателя возлагается наблюдение за одним - двумя приборами в момент отсчёта (времени включения).

Собрать схему, представленную на рисунке 4.

Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда – надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26, SA38), находятся в положении «выключено», все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении, все дополнительные переключатели (SA4, SA6, SA7, SA34, SA36, SA37) находятся в выключенном положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключатели.

Тумблером SA27 установить независимый режим управления Инвертора.

Установить выключатель SA31 в положение «PW2», выключатель SA32 в положение «PV3».

С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты $f=50\text{Гц}$ (контролировать по прибору HZ1).

Подключить исследуемый трансформатор к выходу Инвертора, нажав кнопку SB1.

Тумблером SA26 включить Инвертор. При помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» Инвертора плавно увеличивать напряжение на первичной обмотке трансформатора так, чтобы ток в первичной обмотке трансформатора не превышал 1А .

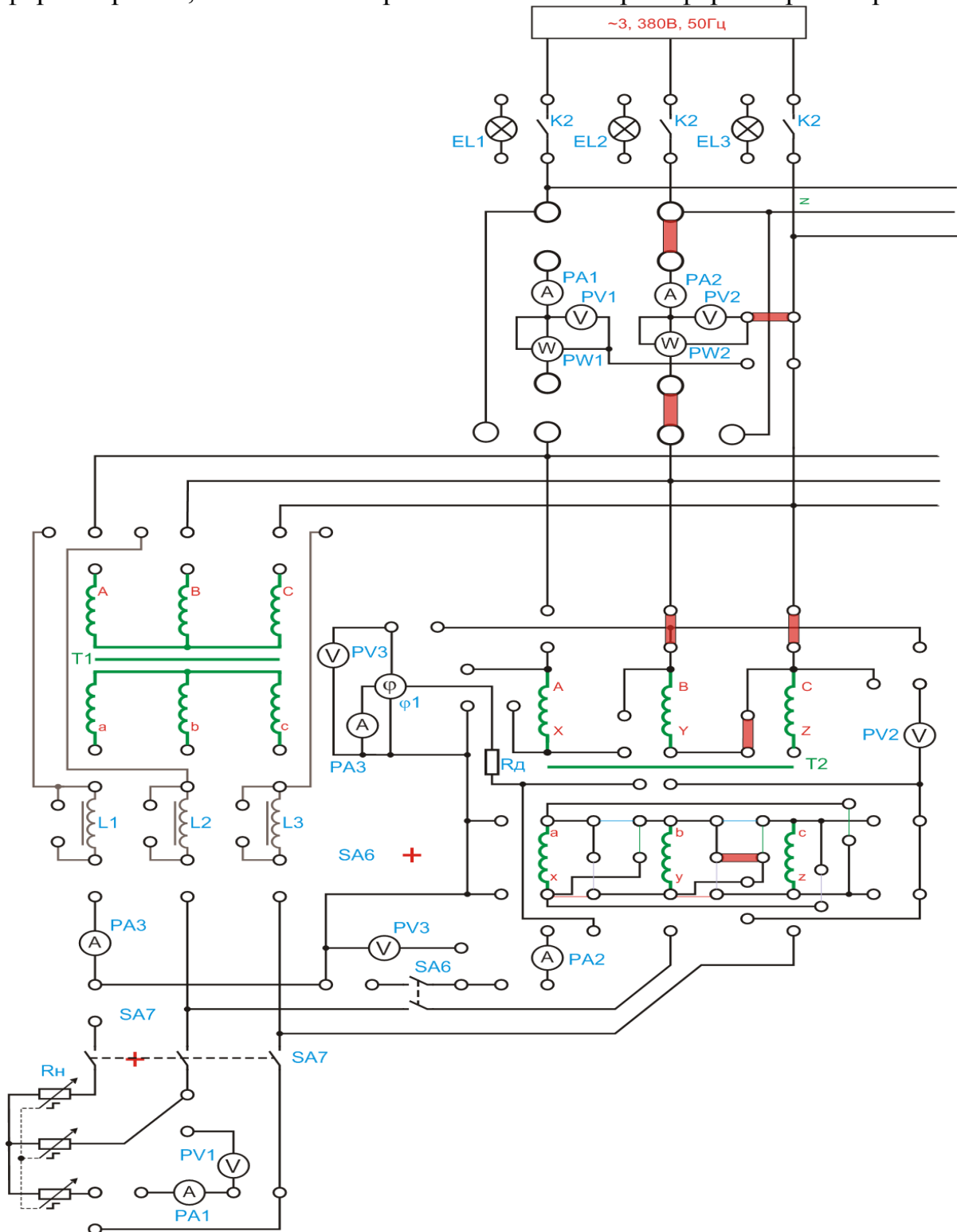


Рисунок 4 – Исследование трансформатора методом короткого замыкания

Уменьшая регулятором RP5 «Задание напряжения» напряжение на выходе Инвертора через приблизительно равные промежутки тока (5-6 точек, одна из них

должна соответствовать номинальному значению тока) снять показания приборов PW2, PV2, PA2. Данные занести в таблицу 2.

Таблица 2 - Данные опыта короткого замыкания

№	Измерено			Вычислено					
	$U_K, В$	$I_{1K}, А$	$P_K, Вт$	$U_{K.A}, \%$	$U_{K.P}, \%$	$R_K, Ом$	$X_K, Ом$	$Z_K, Ом$	$\cos\varphi_0$
1									
2									
...									

Завершив эксперимент, необходимо:

- плавно вывести регулятор RP5 «Задание напряжения» в крайнее левое положение;
- тумблером SA26 выключить Инвертор;
- отключить исследуемый трансформатор от выхода инвертора, нажав кнопку SB2;
- выключить автоматический выключатель «Сеть».

Выполнить расчет, используя формулы (1), (2), (3), (4).

2.5 Исследование рабочих характеристик. Собрать схему, представленную на рисунке 5. Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда – надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26, SA38), находятся в положении «выключено», все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении, все дополнительные переключатели (SA4, SA6, SA7, SA34, SA36, SA37) находятся в выключенном положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключатели.

Переключатель SA39 перевести в положение «100R» шкалы «T1, T2 и Синхр.Ген-р» (крайнее левое положение).

Установить выключатель SA30 в положение «PV1», выключатель SA31 в положение «PW2», выключатель SA32 в положение «PV3».

С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты $f=50Гц$ (контролировать по прибору HZ1).

Подключить исследуемый трансформатор к выходу Инвертора, нажав кнопку SB1.

Тумблером SA26 включить Инвертор. При помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» Инвертора установить номинальное напряжение на первичной обмотке трансформатора (контролировать по прибору PV4).

Занести показания приборов PA2, PV2, PW2 (первичная цепь), PV1, PA1 (вторичная цепь) в таблицу 3.

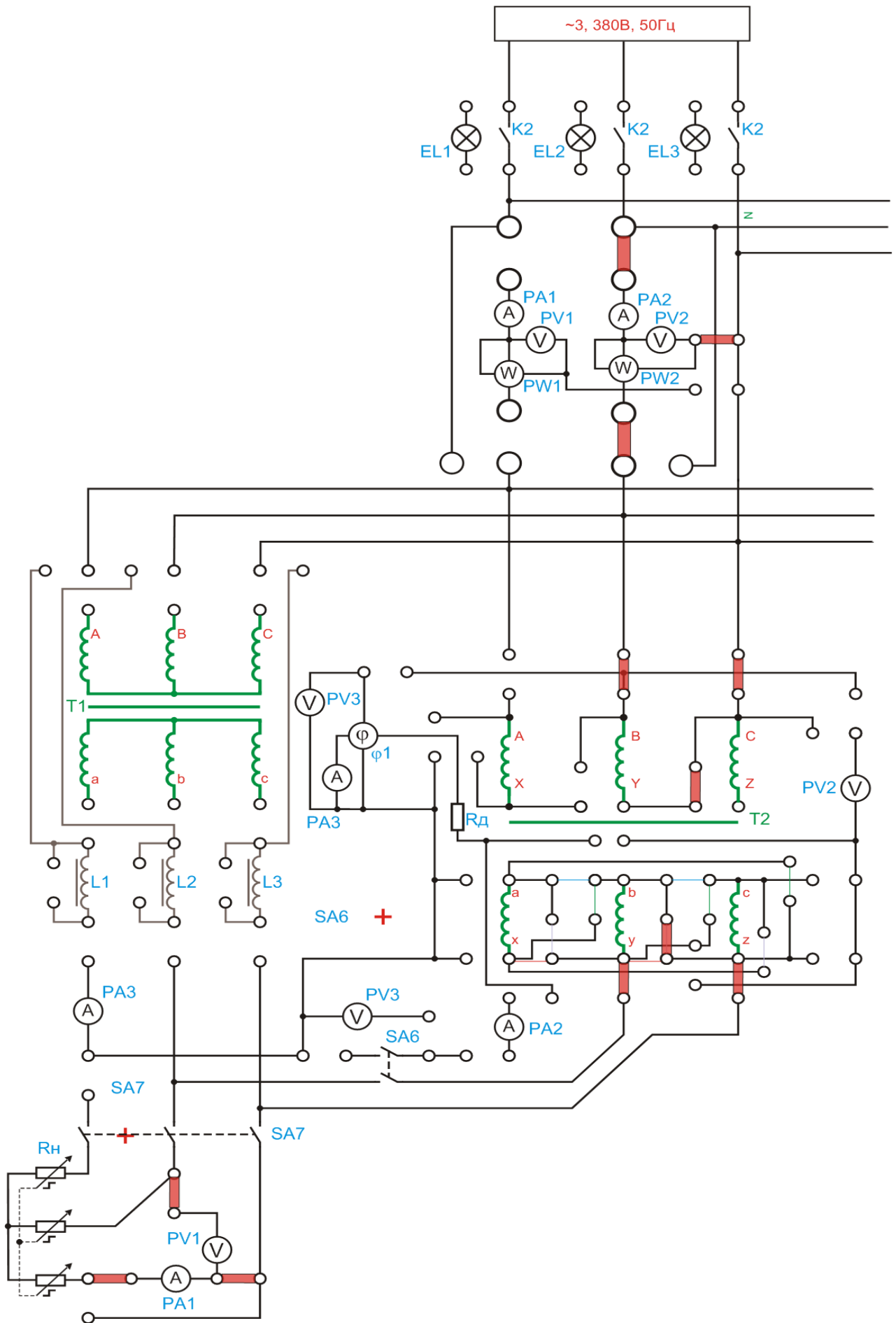


Рисунок 5 – Исследование рабочих характеристик трансформатора

Включить тумблер «SA7». Изменяя переключателем SA39 величину нагрузки от 100 Ом до 50 Ом, занести показания приборов PA2, PV2, PW2, PV1, PA1 в таблицу 3.

Таблица 3 - Рабочие характеристики

№	R _н , Ом	Измерено				
		U ₁ , В	I ₁ , А	P ₁ , Вт	U ₂ , В	I ₂ , А
1	100					
2	75					
3	50					

Завершив эксперимент, необходимо:

- переключатель SA39 перевести в положение «100R» шкалы «T1, T2 и Синхр. ген-р» (крайнее левое положение);
- тумблером SA7 отключить нагрузку от вторичной обмотки трансформатора;
- регулятором RP 5 уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля (контролировать по прибору PV4);
- тумблером SA26 отключить Инвертор;
- отключить первичную обмотку трансформатора от выхода Инвертора, нажав кнопку SB2;
- выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

По опытным данным построить рабочие характеристики однофазного трансформатора: $U_2 = f(I_2)$, $\eta = f(\beta)$.

2.6 Ответить на контрольные вопросы письменно.

2.7 Сделать вывод по работе.

3 Содержание отчета:

- 3.1 Название.
- 3.2 Цель работы.
- 3.3 Оснащение рабочего места.
- 3.4 Схемы цепи: рисунок 1, 2, 5.
- 3.5 Таблица 1, 2, 3 с результатами измеренных и вычисленных параметров.
- 3.6 Формулы с расчётами (1), (2), (3), (4).
- 3.7 Постройте графики рабочих характеристик.
- 3.8 Ответы на контрольные вопросы.
- 3.9 Вывод по работе.

4 Контрольные вопросы и задания.

- 2.1 Объясните принцип действия трансформатора?
- 2.2 Объясните, почему трансформаторы «гудят», почему меняется звук гудения?
- 2.3 Распишите, что называется напряжением короткого замыкания? В каких единицах его измеряют?
- 2.4 Опишите зачем нужны опыты холостого хода и короткого замыкания?

Лабораторная работа №7

Составление и исследование схем электромагнитного пускателя

Цель работы: проанализировать работу электромагнитного пускателя.

Оснащение рабочего места:

- лабораторный стенд.
- методические указания.

1 Краткие теоретические сведения

Пускатель электромагнитный (магнитный пускатель) — низковольтное электромагнитное (электромеханическое) комбинированное устройство распределения и управления, предназначенное для пуска электродвигателя, обеспечения его непрерывной работы, отключения питания, защиты электродвигателя и подключенных цепей, и иногда для реверсирования направления его вращения.

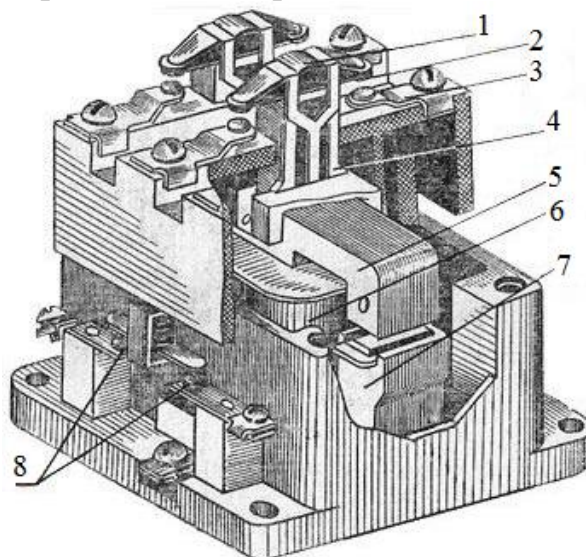


Рисунок 1 - Электромагнитный пускатель: 1 – Контактные пружины, которые обеспечивают плавное замыкание контактов при включении пускателя, а также создают необходимое усилие нажатия, 2 – Контактные мостики, 3 – Контактные пластины, 4 – Пластмассовая траверса, 5 – Якорь, 6 – Обмотка, 7 – Ш-образная часть сердечника (неподвижная), 8 – Дополнительные контакты.

Магнитный пускатель устанавливается на стенке или на щите в вертикальном положении. Это делается для того, чтобы при нажатии на кнопку «Стоп», т.е. разрыве цепи оперативного тока, якорь электромагнита под действием силы тяжести сместился вниз и разомкнул главные контакты и блок-контакт. Верхние зажимы магнитного пускателя через плавкие предохранители подключаются в сеть, а два нижних зажима и один верхний – к двигателю. Зажимы блок-контакта магнитного пускателя соединяются с клеммой 1 кнопки «Стоп» и клеммой 2 кнопки «Пуск», как показано на схеме рисунок 1, а.

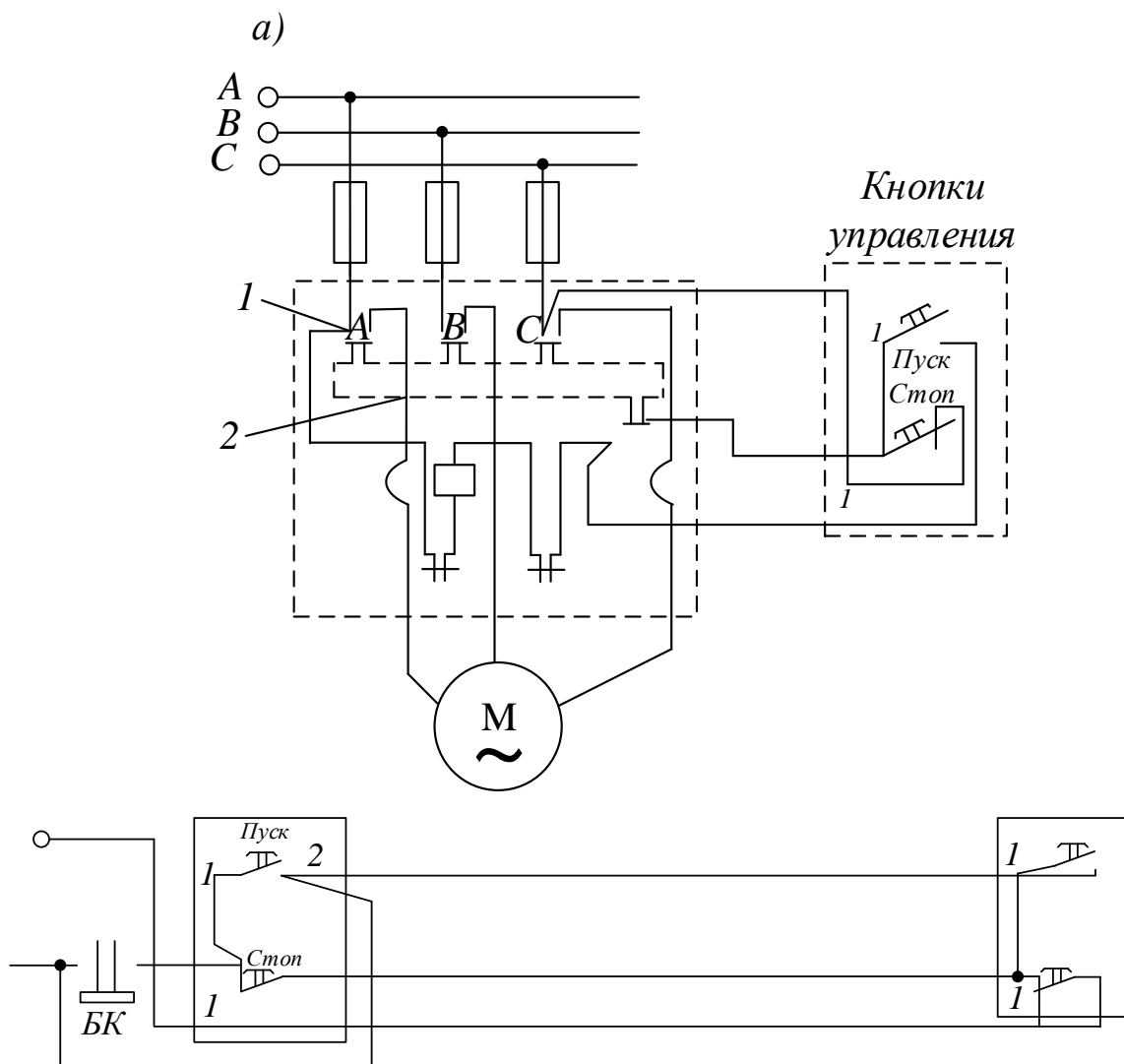


Рисунок 1 - Схема электрическая принципиальная магнитного пускателя: а – схема пуска асинхронного двигателя с помощью магнитного пускателя; б – схема дистанционного независимого управления двигателем из двух мест

На кнопку «Пуск» нажимают только в момент пуска двигателя. При нажатии на кнопку «Пуск» замыкается цепь оперативного тока и якорь электромагнита втягивается в катушку и замыкает главные контакты и блок-контакт. Блок-контакт обеспечивает замкнутость цепи оперативного тока при разомкнутых клеммах кнопки «Пуск», т.е. блокирует кнопку «Пуск».

Магнитный пускатель служит для автоматического пуска и остановки асинхронного двигателя, но он не может обеспечить плавный пуск двигателя или пуск переключением со звезды на треугольник.

2 Порядок выполнения работы

- 2.1 Изучить краткие теоретические сведения п. 1.
- 2.2 Изучите устройство магнитного пускателя и блока кнопок управления (рисунок 2). Проследите путь тока из сети к двигателю, путь оперативного тока при пуске и после пуска двигателя.

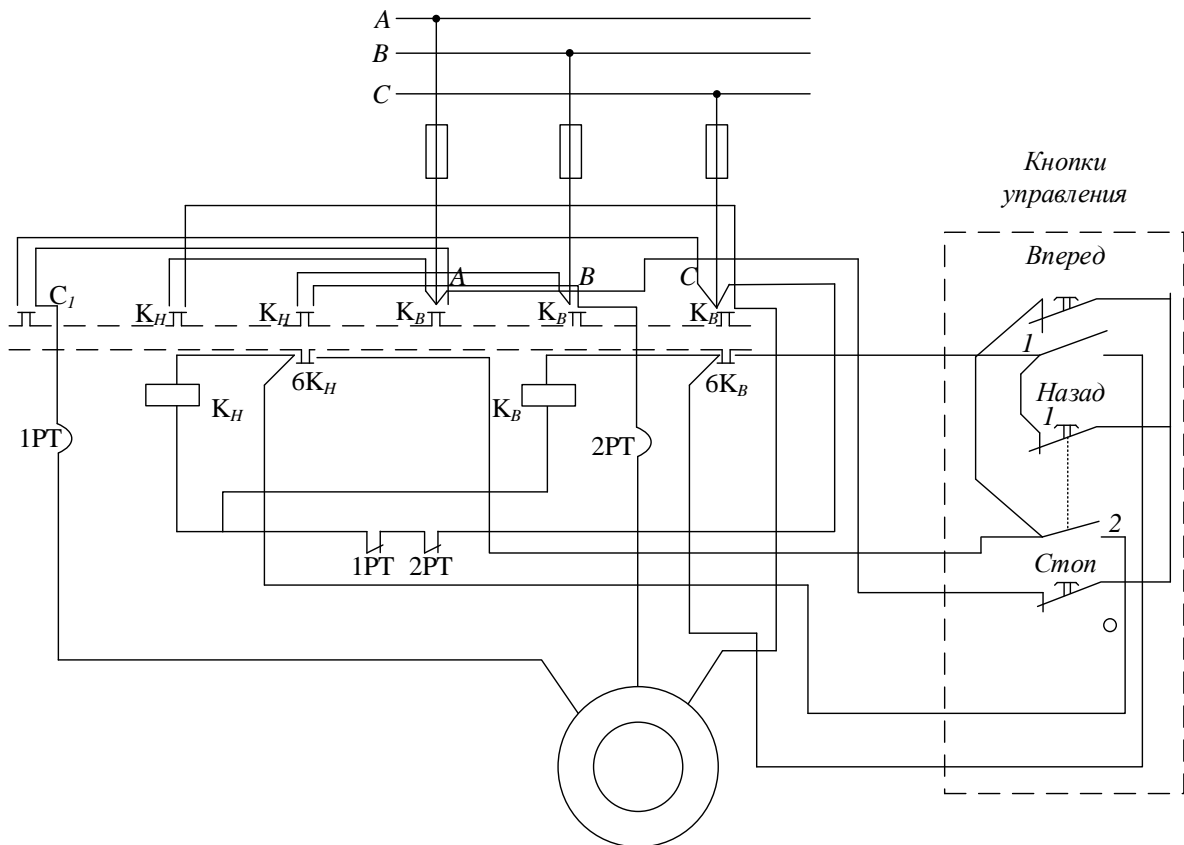


Рисунок 2 - Схема электрическая принципиальная пуска асинхронного двигателя с помощью реверсивного магнитного пускателя

2.3 Собрать схему работы (рисунок 3) и показать ее преподавателю.

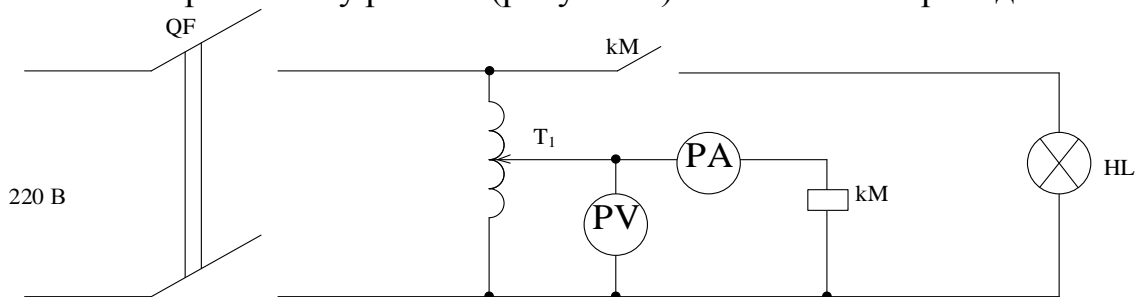


Рисунок 3 – Принципиальная электрическая схема

2.4 Включение электрической цепи под напряжение производится автоматическим выключателем QF.

2.5 Плавно увеличивая напряжение с помощью автотрансформатора Т1 до момента притяжения якоря к электромагниту и замыкания главных контактов (сигнальная лампа HL загорается), зафиксировать значения напряжения $U_{\text{СРАБ}}$ и тока $I_{\text{СРАБ}}$.

2.6 Плавно уменьшая напряжение, определить величину напряжения возврата якоря $U_{\text{ВОЗ}}$ в исходное состояние (сигнальная лампа HL гаснет) и тока возврата $I_{\text{ВОЗ}}$. Значения записать в таблицы 1, 2. Опыт повторить несколько раз, делая перерывы между опытами во избежание перегрева катушки.

Таблица 1 – Результаты измерений и вычислений

Измерено		Вычислено		
$U_{\text{СРАБ}}, \text{В}$	$I_{\text{СРАБ}}, \text{А}$	K	$R, \text{Ом}$	$P_{\text{НОМ}}, \text{Вт}$

Таблица 2 – Результаты измерений и вычислений

Измерено		Вычислено		
$U_{\text{ВОЗ}}, \text{В}$	$I_{\text{ВОЗ}}, \text{А}$	$K_{\text{В}}$	$R, \text{Ом}$	$P_{\text{НОМ}}, \text{Вт}$

2.7 Произвести расчеты

Коэффициент возврата $K_{\text{В}}$, рассчитывается по формуле

$$K_{\text{В}} = \frac{U_{\text{ВОЗ}}}{U_{\text{СРАБ}}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{В}}$ - Коэффициент возврата;

$U_{\text{ВОЗ}}$ – напряжение возврата;

$U_{\text{СРАБ}}$ – напряжение срабатывания.

Кратность коэффициента пускового тока номинальному K , рассчитывается по формуле

$$K = \frac{U_{\text{СРАБ}}}{I_{\text{НОМ}}}, \quad (2)$$

где K – кратность коэффициента пускового тока номинальному;

$U_{\text{СРАБ}}$ – напряжение срабатывания, В;

$I_{\text{НОМ}}$ – номинальный ток, А.

Формула закона Ома для участка цепи

$$R = \frac{U}{I}, \quad (3)$$

где R – сопротивление, Ом;

U – напряжение, В;

I – ток, А.

2.8 Ответить на контрольные вопросы письменно.

2.9 Сделать вывод по работе.

3 Содержание отчёта

3.1 Название.

3.2 Цель работы.

3.3 Оснащение рабочего места.

3.4 Схема цепи: рисунок 3.

3.5 Таблица 1, 2 с результатами измеренных и вычисленных параметров.

3.6 Формулы с расчётами (1), (2), (3).

3.7 Ответы на контрольные вопросы.

3.8 Вывод по работе.

4 Контрольные вопросы и задания.

4.1 Объясните, в чём заключается конструкция и назначение ЭМП.

4.2 Перечислите характеристики ЭМП.

4.3 Укажите, как определяется коэффициент возврата.

4.4 Укажите, как определяется кратность пускового тока.

4.5 Объясните, для чего служит блок-контакт в магнитном пускателе?

Лабораторная работа № 8

Снятие статических характеристик биполярного транзистора. Построение графиков.

Цель работы: Сформировать умение анализировать устройство и принцип действия биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Рассчитать его параметры.

Оснащение рабочего места:

- лабораторный стенд.
- методические указания.

1 Краткие теоретические сведения

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими ЭДП и тремя или более выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции неосновных носителей заряда. Электрод, подключенный к среднему слою называется базой, электроды, подключенные ко внешним слоям, называют коллектором и эмиттером. С точки зрения типов проводимостей эмиттерный и коллекторный слои не различимы. Но практически, при изготовлении транзисторов для получения электрических параметров прибора они существенно различаются степенью легирования примесями. Эмиттерный слой сильно легированный, коллекторный легируется слабо, что обеспечивает повышение допустимого коллекторного напряжения. Для повышения быстродействия (частотных параметров) биполярного транзистора толщину базового слоя нужно делать тоньше, так как толщиной базового слоя, в том числе, определяется время «пролета» неосновных носителей, но, при снижении толщины базы, снижается предельное коллекторное напряжение, поэтому толщину базового слоя выбирают исходя из разумного компромисса.

2 Порядок выполнения работы:

2.1 Изучить краткие теоретические сведения п.1.

2.2 Изучить схему лабораторного стенда (рисунок 1).

ВНИМАНИЕ! Обратите внимание на расположение измерительных приборов

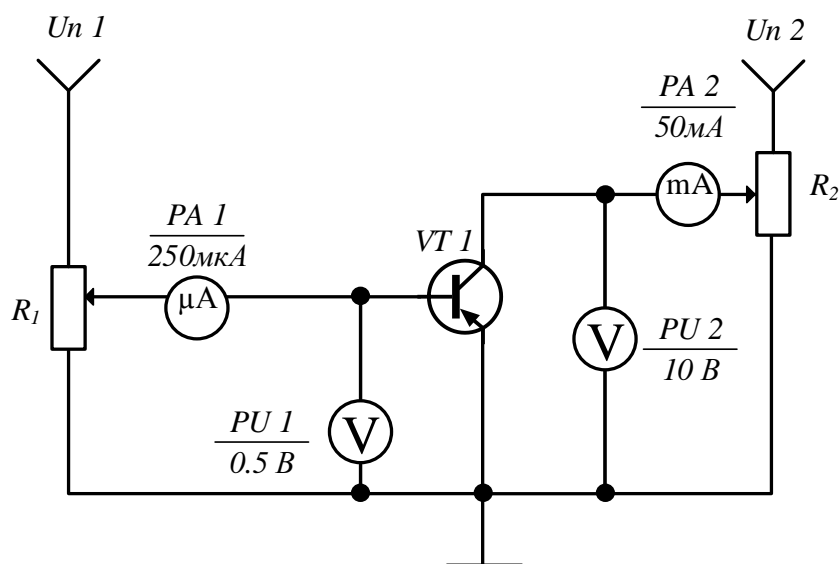


Рисунок 1 – Схема электрическая принципиальная лабораторного стенда

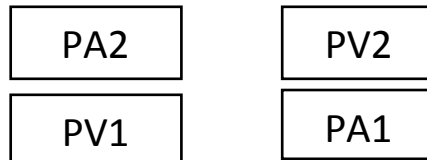


Рисунок 2 – Передняя панель стенда

При проведении эксперимента согласно условиям, один из параметров должен быть постоянным, например ток коллектора – функция от напряжения коллектор – эмиттер при постоянной величине тока базы $I_K = f(U_{КЭ})/I_B = const$. Однако при изменении напряжения коллектор – эмиттер ($U_{КЭ}$) В возможно некоторое изменение тока базы (I_B). Поэтому необходима дополнительная регулировка напряжения базы – эмиттера ($U_{БЭ}$), чтобы поддержать ток базы постоянным ($I_B = const$). Аналогично и в других экспериментах.

- 2.3 Зарисовать схему стенда.
- 2.4 Включить стенд тумблером «Сеть».
- 2.5 Снять входные характеристики транзистора с общим эмиттером. Полученные данные занести в таблицу 1.

Таблицу 1 – Измерение данных

№	$U_{КЭ} = 0В$		$U_{КЭ} = 5В$	
	$U_{БЭ}, В$	$I_B, А$	$U_{БЭ}, В$	$I_B, А$
1				
2				
3				
4				
5				

- 2.6 Построить ВАХ транзистора по результатам таблицы 1.
- 2.7 Снять выходные характеристики транзистора с общим эмиттером. Полученные данные занести в таблицу 2

Таблица 2 – Измеренные данные

№	$I_B = 20мкА$		$I_B = 40мкА$	
	$U_{КЭ}, В$	$I_K, А$	$U_{КЭ}, В$	$I_K, А$
1				
...				
5				

- 2.8 По полученным данным постройте выходную ВАХ транзистора.
- 2.9 Рассчитайте h – параметры схемы транзистора с ЭО:

h_{11} – входное сопротивление транзистора по формуле

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} | U_{КЭ} = const, \quad (1)$$

h_{12} - коэффициент обратной связи по формуле

$$h_{12} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{U_{КЭ}} | I_{Б} = const, \quad (2)$$

h_{21} - коэффициент усиления по току по формуле

$$h_{21} = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} | U_{КЭ} = const, \quad (3)$$

h_{22} - коэффициент обратной связи по формуле

$$h_{22} = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta U_{КЭ}} | I_{Б} = const, \quad (4)$$

2.10 Ответить на контрольные вопросы письменно.

2.11 Сделать вывод по работе.

3 Содержание отчета

3.1 Название.

3.2 Цель работы.

3.3 Оснащение рабочего места.

3.4 Схемы цепи: рисунок 1, 2.

3.5 Таблица 1, 2 с результатами измеренных параметров.

3.6 Построить ВАХ входных характеристик транзистора.

3.7 Построить ВАХ выходных характеристик транзистора.

3.8 Формулы с расчётами h – параметров (1), (2), (3), (4).

3.9 Ответы на контрольные вопросы.

3.10 Вывод по работе.

4 Контрольные вопросы и задания

4.1 Сформулируйте понятие транзистора.

4.2 Перечислите режимы работы транзистора.

4.3 Изобразите условно – графические обозначения биполярных транзисторов.

4.4 Объясните назначение транзистора.

4.5 Назовите выводы БТ.

Лабораторная работа №9

Исследование формы и значения напряжения в выпрямителях с фильтром и без него

Цель работы: изучить влияние на выходное напряжения типа выпрямителей.

Оснащение рабочего места:

- лабораторный стенд.
- осциллограф.
- методические указания.

1 Краткие теоретические сведения

Однофазные неуправляемые выпрямители

Однофазные выпрямители могут быть однополупериодными и двухполупериодными.

Однополупериодные выпрямители. Схема однополупериодного выпрямителя представлен на рисунок 1. Переменное напряжение сети преобразованное трансформатором Т до необходимой величины U_T , подается на конденсатор C_Φ и нагрузку R_H через диод VD.

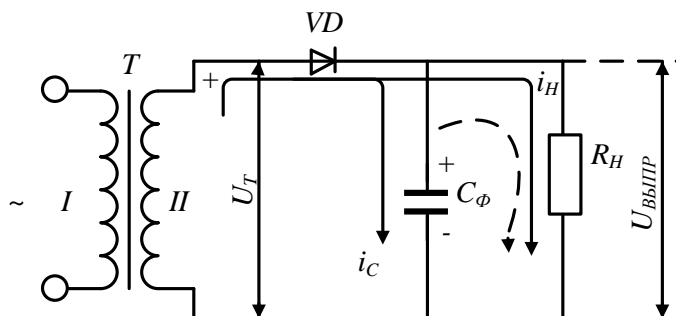


Рисунок 1 - Схема электрическая принципиальная однополупериодного выпрямителя

В течение полупериода, когда напряжение U_T становится прямым для диода, через диод и нагрузку протекает ток. Конденсатор C_Φ при этом заряжается до значения, близко к пиковому значению U_T .

В следующий полупериод напряжение U_T для диода оказывается обратным, и через него протекает лишь незначительный обратный ток. При этом конденсатор C_Φ «отключается» от вторичной обмотки трансформатора и начинает разряжаться через сопротивление нагрузки R_H . Таким образом, через нагрузку ток протекает в оба полупериода сетевого напряжения в одном и том же направлении.

При большом сопротивлении нагрузки конденсатор C_Φ во время второго полупериода напряжения U_T разряжается незначительно, и можно считать, что напряжение на конденсаторе C_Φ остается равным пиковому значению напряжения обратной полярности, равное

$$U_{\text{ОБР}} = U_T + U_{C_\Phi} \approx 2U_T .$$

Качество выпрямления переменного напряжения оценивается коэффициентом выпрямления $K_B = \frac{I_{пр}}{I_{обр}}$, где $I_{пр}$ и $I_{обр}$ – значения прямого и обратного токов, протекающих через диод. Значение этого коэффициента больше у кремниевых диодов, что является одной из причин их более широкого применения в выпрямителях.

Недостатком однополупериодного выпрямителя является то, что выпрямленное напряжение сильно зависит от сопротивления нагрузки и имеет большую амплитуду пульсаций. Поэтому такие выпрямители применяются редко и только при высокоомных нагрузках. В остальных случаях используются, как правило, двухполупериодные выпрямители.

Двухполупериодные выпрямители. На рисунке 2, а представлена схема двухполупериодного выпрямителя с выводом от средней точки вторичной обмотки трансформатора. Обычно эта точка соединяется с проводом нулевого потенциала. Работает такой выпрямитель следующим образом.

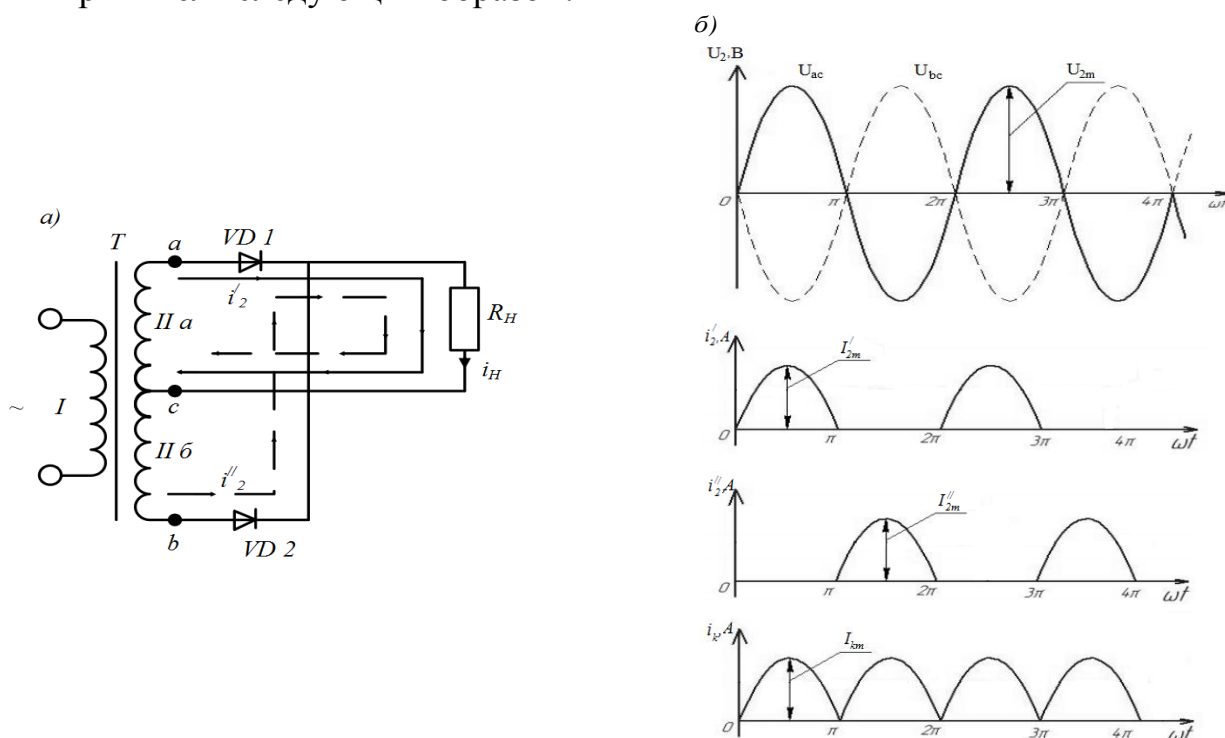


Рисунок 2 – а) Схема электрическая принципиальная, б) Графики напряжений и токов двухполупериодного выпрямителя с выводом от средней точки вторичной обмотки трансформатора

Напряжения u_{ac} и u_{bc} , измеренные на концах а и б вторичной обмотки трансформатора относительно средней точки с, являются противофазными (рисунок 2, б). Во время положительного полупериода напряжения u_{ac} открывается диод VD1, а диод VD2 оказывается закрытым. Поэтому через нагрузку R_H протекает только ток i'_2 , создаваемый верхней половиной вторичной обмотки трансформатора.

В следующий полупериод сетевого напряжения положительным относительно точки с оказывается напряжение u_{bc} , а u_{ac} – отрицательным. Через нагрузку потечет ток i''_2 , создаваемый напряжением u_{bc} . Таким образом, ток через нагрузку протекает в каждый полупериод сетевого напряжения в одном и том же направлении, создавая на ней пульсирующее напряжение с частотой пульсаций, равной удвоенной частоте сетевого напряжения.

Средние значения выпрямленного тока и выпрямленного напряжения в нагрузке

$$I_{CP} = \frac{2}{\pi} I_{2m}; U_{CP} = \frac{2}{\pi} U_{2m}, \quad (1)$$

Обычно значения I_{CP} и U_{CP} задаются при расчете выпрямителя, поэтому выражения (1) позволяют определить амплитудные значения токов и напряжений, действующих во вторичных обмотках ас и бс трансформатора и нагрузке

$$I_{2m} = \frac{\pi}{2} I_{CP}; U_{2m} = \frac{\pi}{2} U_{CP}, \quad (2)$$

Выражение (2) позволяет определить действующие значения тока и напряжения в нагрузке

$$I_H = \frac{I_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_{CP} \approx 1,1 I_{CP}, \quad (3)$$

$$U_H = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{CP} \approx 1,1 U_{CP}, \quad (4)$$

Через каждую половину вторичной обмотки и через диоды VD1 и VD2 ток протекает лишь в течение одного полупериода, поэтому его среднее значение

$$I_{2CP} = 0,5 I_{CP}, \quad (5)$$

а действующее значение

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi [i_2(\omega t)]^2 d\omega t} = \frac{I_{2m}}{2} = \frac{\pi}{4} I_{CP}. \quad (6)$$

Действующее значение напряжения в каждой половине вторичной обмотки на основании (2) определяется по формуле

$$U_2 = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{CP} \approx 1,1 U_{CP}. \quad (7)$$

Выражение (6) и (7) позволяют рассчитывать мощность P_2' , развиваемую каждой половиной вторичной обмотки трансформатора:

$$P_2' = I_2 U_2 = \frac{\pi^2}{8\sqrt{2}} P_{CP} \approx 0,86 P_{CP} \quad (8)$$

Из рисунка 9.2, а видно, что к аноду закрытого диода прикладывается отрицательное напряжение соединенной с ним половины вторичной обмотки, а к его катоду – положительное напряжение другой половины. Следовательно, обратное напряжение, обратное напряжение, прикладываемое к закрытому диоду,

$$U_{\text{обр max}} = 2U_{2m} = \pi U_{\text{CP}}$$

Для определения коэффициента пульсаций пульсирующее напряжение на выходе выпрямителя $u(t)$ представляют рядом Фурье, который при числе пульсаций выпрямленного напряжения $p \geq 2$ имеет вид

$$u(t) = \frac{p}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{p} + \frac{2}{p^2 - 1} \cdot \frac{p}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{p} \cos(p\omega + \varphi_1) + \dots$$

В этом выражении

$\frac{p}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{p}$ – постоянная составляющая,

$\frac{2}{p^2 - 1} \cdot \frac{p}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{p} = U_{1m}$ – амплитуда первой гармоники.

Для рассматриваемого выпрямителя $p = 2$ и коэффициент пульсаций

$$K_H = \frac{U_{1m}}{U_{\text{CP}}} = \frac{2}{p^2 - 1} = 0,67.$$

Недостатками двухполупериодного выпрямителя с выводом от средней точки вторичной обмотки трансформатора являются высокое обратное напряжение, прикладываемое к выпрямительным диодам, и усложненная конструкция трансформатора.

На рисунке 3, а показана схема однофазного двухполупериодного мостового выпрямителя, а на рисунке 3, б – графики токов и напряжений в его цепях. В выпрямителе используются четыре диода VD1 ... VD2, которые включаются в проводящее направление попарно: в один полупериод открыты диоды VD3 и VD2, в другой – VD4 и VD1.

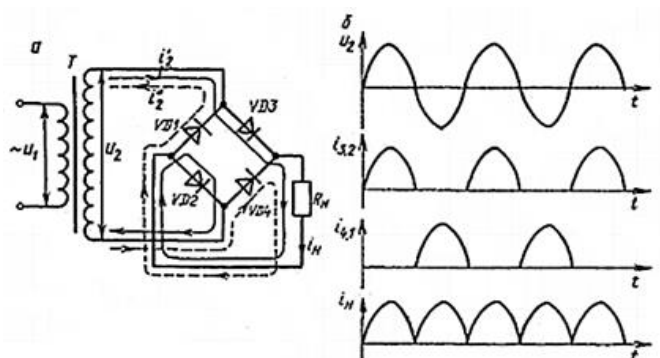


Рисунок 3 – Схема электрическая принципиальная (а) и графики напряжения и токов (б) двухполупериодного мостового выпрямителя

Напряжение на каждом закрытом диоде равно напряжению u_2 , поэтому обратное напряжение на диоде не превышает значения $U_{2m} = \sqrt{2}U_2$, что в 2 раза меньше, чем в двухполупериодном выпрямителе с выводом от средней точки вторичной обмотки трансформатора. В этом одно из достоинств мостового выпрямителя. Кроме того, он имеет более простую конструкцию трансформатора: не нужно делать дополнительного вывода от вторичной обмотки. Значения I_{CP} , U_{CP} в нагрузке и среднего тока, протекающего через выпрямительные диоды, такие же, как и в выпрямителе со средним выводом от вторичной обмотки. Поэтому коэффициент пульсаций в мостовой двухполупериодном выпрямителе также равен 0,67, или 67%.

2 Порядок выполнения работы

- 2.1 Изучить краткие теоретические сведения п.1.
- 2.2 Исследование однополупериодного выпрямителя (SA1 – верхнее положение);
- 2.2.1 Изучить работу выпрямителя с пассивными фильтрами (SA3 – нижнее положение);
- 2.2.2 Зарисовать схему однополупериодного выпрямителя с пассивными фильтрами;
- 2.2.3 Исследовать работу схемы, форму и величину выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$, В при последовательном изменении числа звеньев фильтра.
- Данные измерений занести в таблицу 1, зарисовать в масштабе форму $U_{\text{ВЫХ}}$. При проведении опытов установить максимальное сопротивление нагрузки R_{Hmax} , Ом крайнее правое положение регулятора SA – нижнее.
- Результаты занесите в таблицу 1.

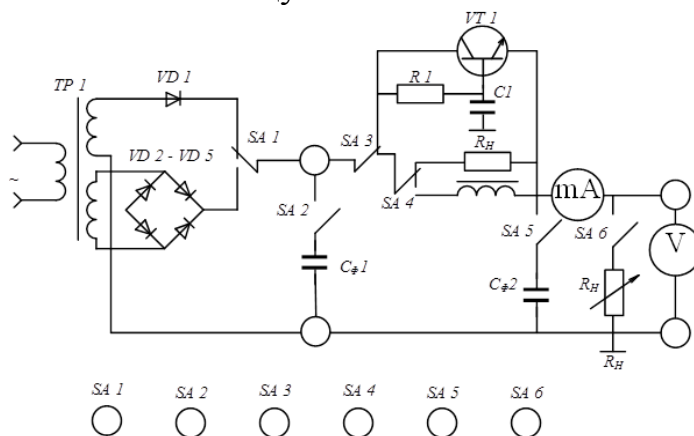


Рисунок 4 – Схема электрическая принципиальная однополупериодного выпрямителя

Таблица 1 – Результаты измерений и вычислений

	Тип фильтра	Экспериментальные данные			Расчет		Положение переключателей					
		h_{\min} , В	h_{\max} , В	U_0 , В	K_n	S	SA1	SA2	SA3	SA4	SA5	SA6
однополупериодный	...						В	В	Н	В	В	Н
	C						В	Н	Н	В	В	Н
	RC						В	Н	Н	В	В	Н
	LC						В	Н	Н	Н	В	Н
	П						В	Н	Н	Н	Н	Н
	АКТ						В	Н	В	---	В	Н
Мостовой	...						Н	В	Н	В	В	Н
	C						Н	Н	Н	В	В	Н
	RC						Н	Н	Н	В	В	Н
	LC						Н	Н	Н	Н	В	Н
	П						Н	Н	Н	Н	Н	Н
	АКТ						Н	Н	В	---	В	Н

Примечание:

- «В» - верхнее положение переключателя; «Н» - нижнее положение переключателя.
- * - осциллограф подключается к гнездам Сф 1.
- ** - осциллограф подключается к выходным гнездам.
- SA2, SA5, SA6 в нижнем положении замкнуты.
- При изменении U_0 в емкостном фильтре с помощью перемычки подключить вольтметр к Сф 1.

2.3.4 Рассчитать коэффициент пульсации K_n по формуле

$$K_n = \frac{h_{max} - h_{min}}{2U_0}, \quad (9)$$

2.3.5 Рассчитать коэффициент сглаживания, по формуле:

$$S = \frac{K_{nвх}}{K_{nвых}}, \quad (10)$$

Результаты занесите в таблицу 1.

В отчет включить один пример расчета K_n и S .

2.4 Исследование мостового выпрямителя (SA1- нижнее) аналогично п.п. 2.2.1-2.2.5. Данные эксперимента и результаты расчета занести в таблицу 1.

2.5 Снять внешнюю характеристику мостового выпрямителя $U_0=f(I_0)$, без фильтра, с П-образным фильтром и емкостным фильтром, изменяя R_H .
Данные занести в таблицу 2.

Таблица 2 - Результаты измерений

	I_0 , Ма	U_0 , В	U_0 , В	U_0 , В
N		без фильтра	Емкостной	П-образный
1				
2				
3				
4				
5				

2.6 Построить внешнюю характеристику $I_0=f(U_0)$.

2.7 Исследовать влияние величин R_H , Ом на уровень пульсации $U_{ввых}$, В в мостовом выпрямителе при емкостном фильтре Сф1 и Г-образном (LCф1).

Таблица 3 - Результаты измерений

Тип фильтра	№	I_H , мА	h_{\min} , В	h_{\max} , В	U_0 , В	K_{Π}	Применение
емкостной	1						$R_{\Phi}=0$
	2						
	3						
	4						
Г-образный	1						
	2						
	3						
	4						

2.8 Ответить на контрольные вопросы письменно.

2.9 Сделать вывод по работе.

3 Содержание отчета

3.3 Название.

3.4 Цель работы.

3.5 Оснащение рабочего места.

3.6 Схема цепи: рисунок 4.

3.7 Таблица 1 с результатами измеренных и вычисленных параметров.

3.8 Формулы с расчётами (9), (10).

3.9 Таблица 2 с результатами измеренных параметров.

3.10 Построить внешнюю характеристику выпрямителя $I_0=f(U_0)$.

3.11 Таблица 3 с результатами измеренных параметров.

3.12 Изобразить осциллограммы $U_{\text{ВЫХ}}=f(t)$ для мостового выпрямителя:

а) без фильтров;

б) с емкостным фильтром;

в) с Г-образным фильтром при $R_H=\text{const}$.

3.13 Ответы на контрольные вопросы.

3.14 Вывод по работе.

4 Контрольные вопросы и задания

4.3 Укажите назначение выпрямителей?

4.4 Перечислите типы выпрямителей которые вам известны?

4.5 Объяснить, что такое коэффициент пульсации?

4.6 Сравните свойства мостового и выпрямителя со средней точкой.

4.7 Укажите назначение фильтров?

4.8 Перечислите типы сглаживающих фильтров?

4.9 Объясните, чем отличаются RC-фильтры от LC?

Практическая работа №1

Расчёт цепи постоянного тока

Цель работы: Научиться определять ток в цепи и составлять баланс мощностей.

Оснащение рабочего места:

- Методические указания.

1 Краткие теоретические сведения

Последовательное соединение

Последовательное соединение – это соединение двух или более резисторов в форме цепи, в которой каждый отдельный резистор соединяется с другим отдельным резистором только в одной точке.

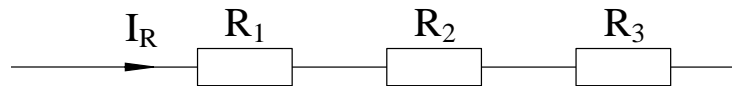


Рисунок 1 – Последовательное соединение резисторов

Общее сопротивление $R_{общ}$

При таком соединении, через все резисторы проходит один и тот же электрический ток. Чем больше элементов на данном участке электрической цепи, тем «труднее» току протекать через него. Следовательно, при последовательном соединении резисторов их общее сопротивление увеличивается, и оно равно сумме всех сопротивлений.

$$R_{общ} = R_1 + R_2 + R_3, \quad (1)$$

Напряжение при последовательном соединении

Напряжение при последовательном соединении распределяется на каждый резистор согласно закону Ома:

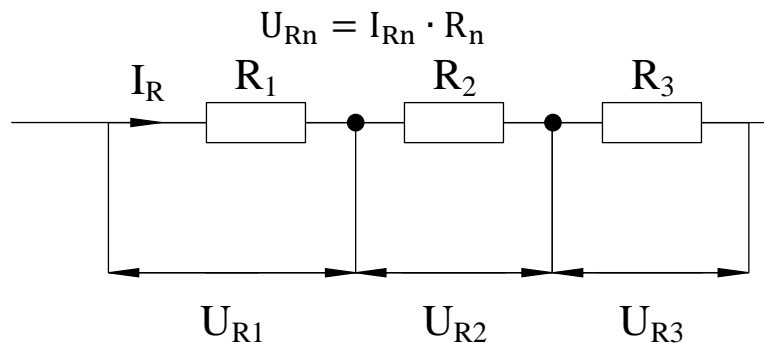


Рисунок 2 – Напряжение при последовательном соединении т.е чем большее сопротивление резистора, тем большее напряжение на него падает.

Параллельное соединение резисторов

Параллельное соединение – это соединение, при котором резисторы соединяются между собой обоими контактами. В результате к одной точке (электрическому узлу) может быть присоединено несколько резисторов.

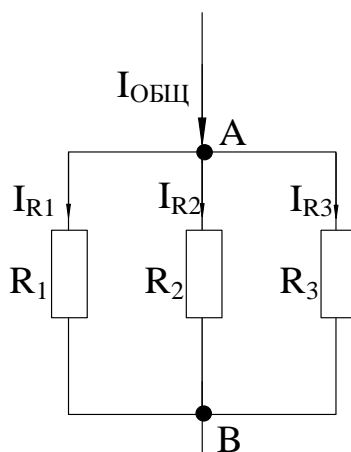


Рисунок 3 – Параллельное соединение резисторов
Общее сопротивление $R_{\text{общ}}$

При таком соединении через каждый резистор потечет отдельный ток. Сила данного тока будет обратно пропорциональна сопротивлению резистора. В результате общая проводимость такого участка электрической цепи увеличивается, а общее сопротивление в свою очередь уменьшается.

Таким образом, при параллельном подсоединении резисторов с разным сопротивлением, общее сопротивление будет всегда меньше значения самого маленького отдельного резистора.

Формула общей проводимости при параллельном соединении резисторов:

$$g_{\text{общ}} = \frac{1}{R_{\text{общ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}, \quad (2)$$

Формула эквивалентного общего сопротивления при параллельном соединении резисторов:

$$R_{\text{общ}} = \frac{1}{g_{\text{общ}}} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_2}, \quad (3)$$

Для двух одинаковых резисторов общее сопротивление будет равно половине одного отдельного резистора:

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_1}{2}, \quad (4)$$

Соответственно, для n одинаковых резисторов общее сопротивление будет равно значению одного резистора, разделенного на n .

$$R_{\text{общ}} = \frac{R^n}{R^{n-1}} = \frac{R}{N} \quad (5)$$

Напряжение при параллельном соединении

Напряжение между точками А и В является как общим напряжением для всего участка цепи, так и напряжением, падающим на каждый резистор в отдельности. Поэтому при параллельном соединении на все резисторы упадет одинаковое напряжение.

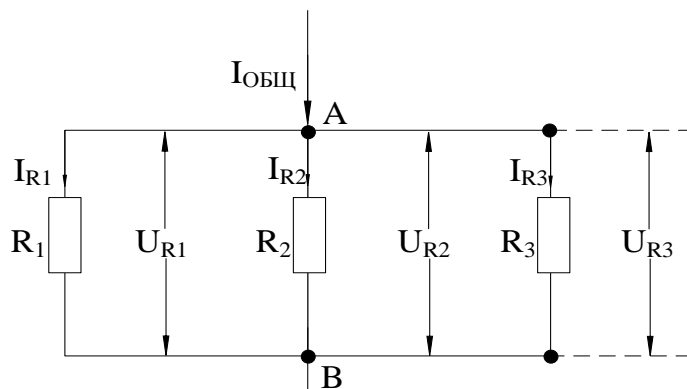


Рисунок 4 – Напряжение при параллельном соединении резисторов ($U_{\text{общ}} = U_{AB} = U_{R1} = U_{R2} = U_{R3}$)

Электрический ток при параллельном соединении

Через каждый резистор течет ток, сила которого обратно пропорциональна сопротивлению резистора. Для того чтобы узнать какой ток течет через определенный резистор, можно воспользоваться законом Ома:

$$I_{Rn} = \frac{U_{Rn}}{R_n} = \frac{U_{\text{общ}}}{R_n} \quad (6)$$

Так же используется закон Ома для участка и полной цепи.

$$I = \frac{U}{R} \quad (7)$$

$$I = \frac{E}{R + R_0} \quad (8)$$

Смешанное соединение резисторов

Смешанным соединением называют участок цепи, где часть резисторов соединяются между собой последовательно, а часть параллельно. В свою очередь, смешанное соединение бывает последовательного и параллельного типов.

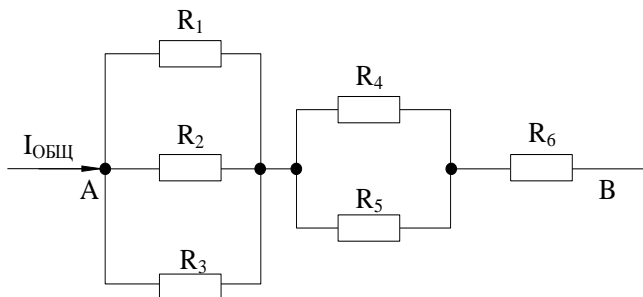


Рисунок 5 – Смешанное соединение последовательного типа

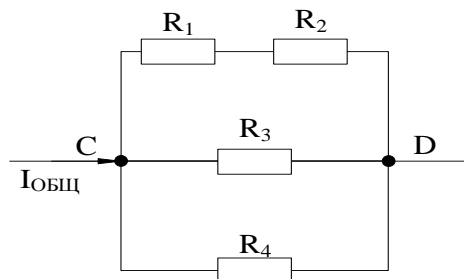


Рисунок 6 – Смешанное соединение параллельного типа

Общее сопротивление $R_{\text{общ}}$

Для того чтобы посчитать общее сопротивление смешанного соединения:

- Цепь разбивают на участки с только параллельным или только последовательным соединением.
 - Вычисляют общее сопротивление для каждого отдельного участка.
 - Вычисляют общее сопротивление для всей цепи смешанного соединения.
- Так это будет выглядеть для схемы 1:

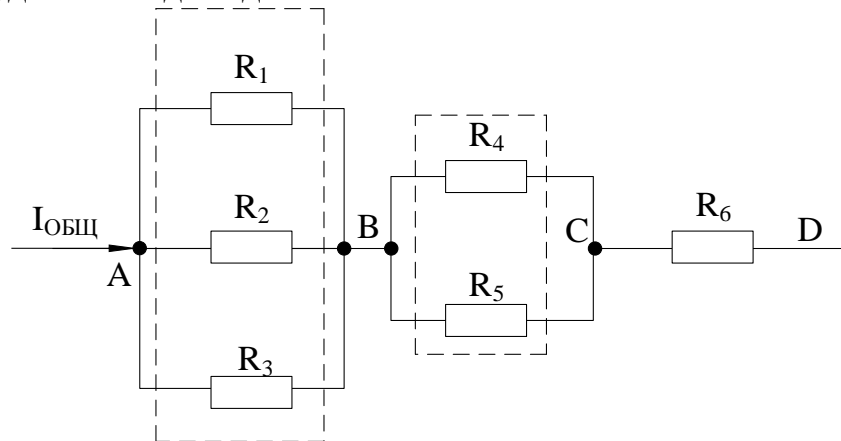


Рисунок 7 – Смешанное соединение последовательного типа

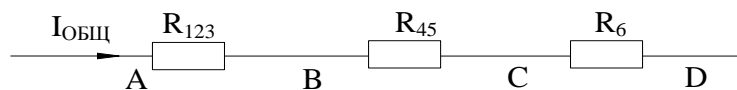


Рисунок 8 – Преобразование схемы 7 в последовательное соединение общих сопротивлений участков АВ и ВС R₆ на отрезке CD остается без изменений

Также существует более быстрый способ расчета общего сопротивления для смешанного соединения. Можно, в соответствии схеме, сразу записывать формулу следующим образом:

- Если резисторы соединяются последовательно - складывать.
 - Если резисторы соединяются параллельно - использовать условное обозначение «||».
 - Подставлять формулу для параллельного соединения где стоит символ «||».
- Так это будет выглядеть для схемы 1:

$$R_{\text{общ}} = R_1 || R_2 || R_3 + R_4 || R_5 + R_6 \quad (9)$$

После подстановки формулы параллельного соединения вместо «||»:

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_2} + \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5} + R_6 \quad (10)$$

Для проверки правильности решения составляем баланс мощностей.

$$P_{\text{источника}} = P_{\text{потребителя}} \quad (11)$$

$$P_{\text{источника}} = E \cdot I \quad (12)$$

$$U = I \cdot R \quad (13)$$

$$P_{\text{потребителя}} = I^2 \cdot R \quad (14)$$

$$E \cdot I = I^2 \cdot R \quad (15)$$

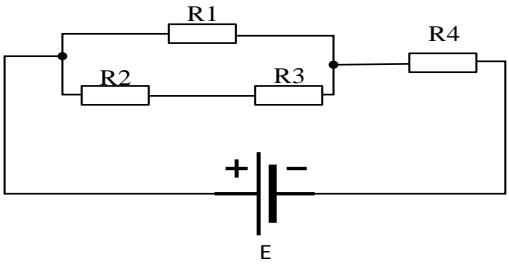
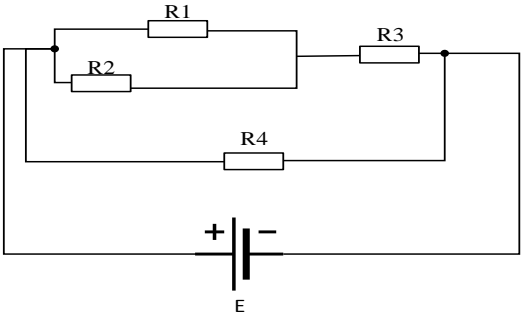
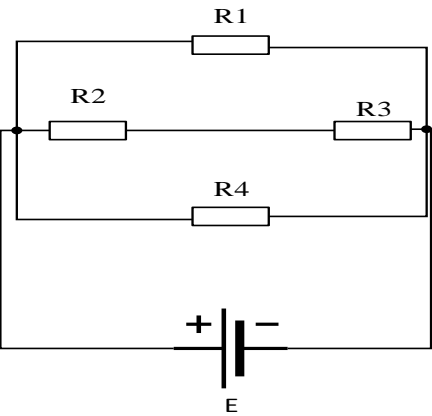
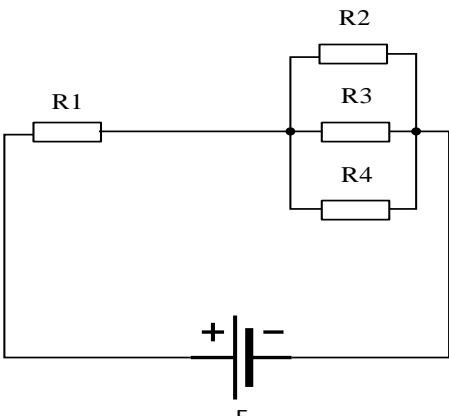
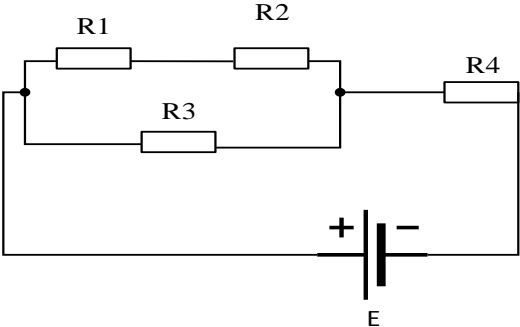
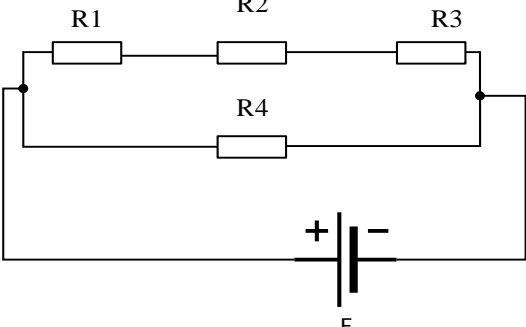
Источники E_1 и E_2 вырабатывают электрическую энергию, т.к. направление ЭДС и тока в ветвях с источниками совпадают (если ЭДС и ток в ветвях направлены в противоположную сторону, то источник ЭДС потребляет энергию и его записывают со знаком минус).

2 Порядок выполнения работы

2.1 Изучить краткие теоретические сведения п.1.

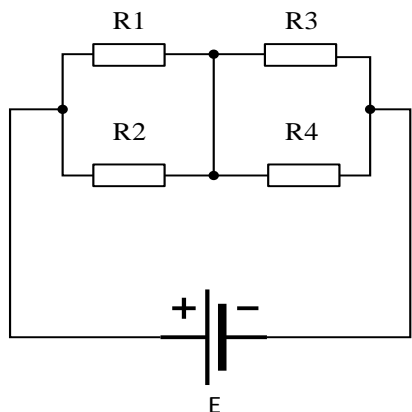
2.2 В соответствии с заданием для четырех резисторов, входящих в схему цепи для вашего варианта (Таблица 1), определить эквивалентное сопротивление цепи, ток I и мощность P , потребляемые цепью, а также токи, напряжение и мощности на каждом из резисторов. Произвести проверку по балансу мощностей. Используя формулы (1), (3), (4), (6), (7), (8), (11), (12), (13), (14), (15).

Таблица 1 - Электрических схем с четырьмя резисторами.

<p style="text-align: center;"><i>Вариант 1</i></p> 	<p style="text-align: center;"><i>Вариант 2</i></p> 
<p>Исходные данные: $R_1=3 \text{ Ом}$; $R_2=4 \text{ Ом}$; $R_3=2 \text{ Ом}$; $R_4=3 \text{ Ом}$; $I_3=2 \text{ А}$.</p>	<p>Исходные данные: $R_1=15 \text{ Ом}$; $R_2=10 \text{ Ом}$; $R_3=4 \text{ Ом}$; $R_4=15 \text{ Ом}$; $P_4=240 \text{ Вт}$.</p>
<p style="text-align: center;"><i>Вариант 3</i></p> 	<p style="text-align: center;"><i>Вариант 4</i></p> 
<p>Исходные данные: $R_1=12 \text{ Ом}$; $R_2=2 \text{ Ом}$; $R_3=4 \text{ Ом}$; $R_4=4 \text{ Ом}$; $U_4=12 \text{ В}$.</p>	<p>Исходные данные: $R_1=6 \text{ Ом}$; $R_2=30 \text{ Ом}$; $R_3=6 \text{ Ом}$; $R_4=20 \text{ Ом}$; $I_3=3 \text{ А}$.</p>
<p style="text-align: center;"><i>Вариант 5</i></p> 	<p style="text-align: center;"><i>Вариант 6</i></p> 

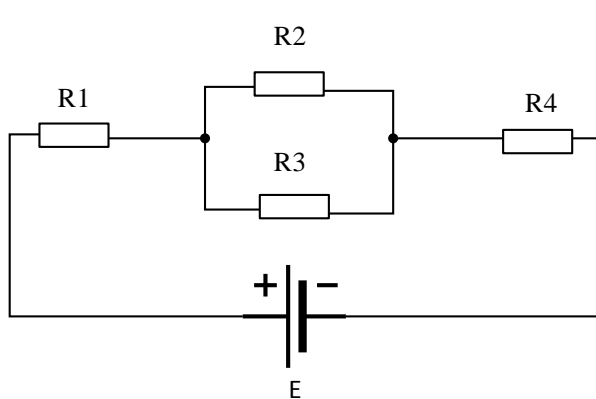
Исходные данные: $R_1=12 \text{ Ом}$; $R_2=2 \text{ Ом}$;
 $R_3=4 \text{ Ом}$; $R_4=4 \text{ Ом}$; $U_4=12 \text{ В}$.

Вариант 7



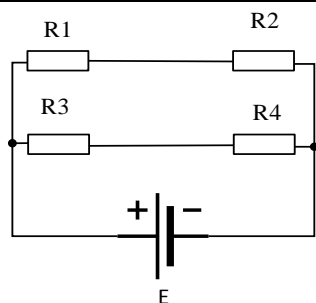
Исходные данные: $R_1=10 \text{ Ом}$; $R_2=15 \text{ Ом}$;
 $R_3=35 \text{ Ом}$; $R_4=15 \text{ Ом}$; $P_4=375 \text{ Вт}$.

Вариант 8



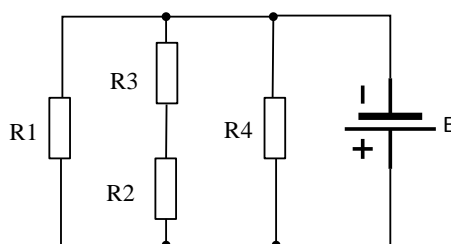
Исходные данные: $R_1=22 \text{ Ом}$; $R_2=13 \text{ Ом}$;
 $R_3=14 \text{ Ом}$; $R_4=10 \text{ Ом}$; $U=18 \text{ В}$.

Вариант 9



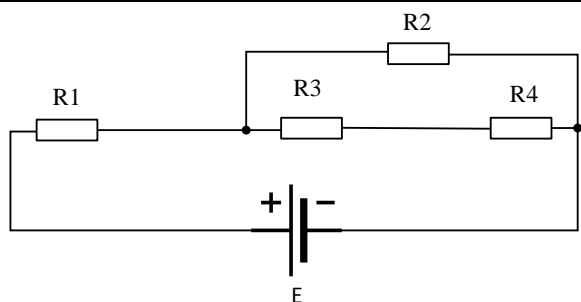
Исходные данные: $R_1=10 \text{ Ом}$; $R_2=23 \text{ Ом}$;
 $R_3=9 \text{ Ом}$; $R_4=15 \text{ Ом}$; $I=2 \text{ А}$.

Вариант 10



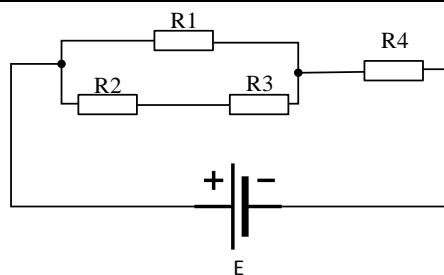
Исходные данные: $R_1=3 \text{ Ом}$; $R_2=4 \text{ Ом}$;
 $R_3=10 \text{ Ом}$; $R_4=9 \text{ Ом}$; $I=1,3 \text{ А}$.

Вариант 11



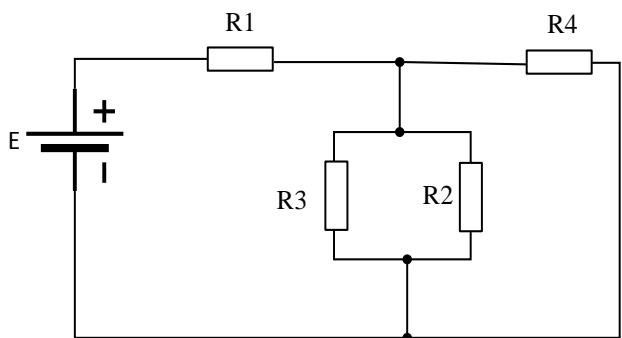
Исходные данные: $R_1=16 \text{ Ом}$; $R_2=3 \text{ Ом}$;
 $R_3=14 \text{ Ом}$; $R_4=17 \text{ Ом}$; $U=5 \text{ В}$.

Вариант 12



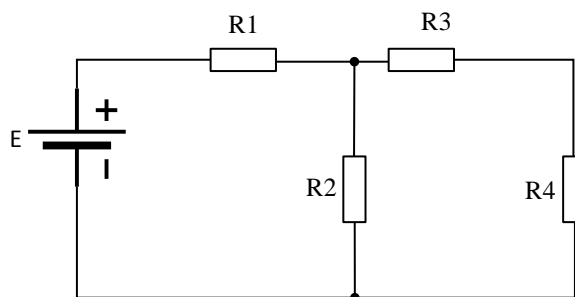
Исходные данные: $R_1=2 \text{ Ом}$; $R_2=5 \text{ Ом}$;
 $R_3=3 \text{ Ом}$; $R_4=2 \text{ Ом}$; $I_2=0,13 \text{ А}$.

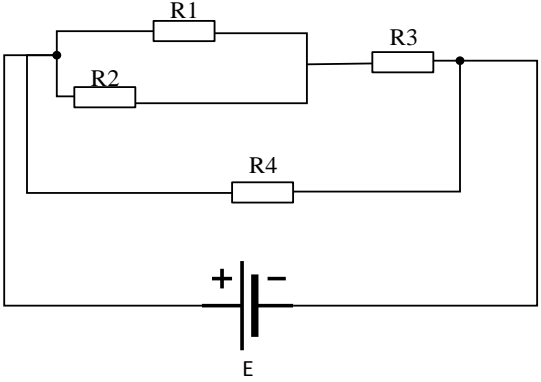
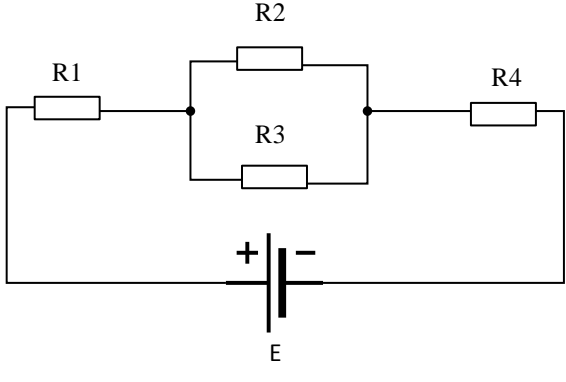
Вариант 13



Исходные данные: $R_1=19 \text{ Ом}$; $R_2=18 \text{ Ом}$;
 $R_3=22 \text{ Ом}$; $R_4=25 \text{ Ом}$; $U=11 \text{ В}$.

Вариант 14



Исходные данные: $R_1=2 \text{ Ом}$; $R_2=5 \text{ Ом}$; $R_3=3 \text{ Ом}$; $R_4=2 \text{ Ом}$; $I_2=0,13 \text{ А}$.	Исходные данные: $R_1=12 \text{ Ом}$; $R_2=9 \text{ Ом}$; $R_3=13 \text{ Ом}$; $R_4=14 \text{ Ом}$; $P_2=11 \text{ Вт}$.
<i>Вариант 15</i>	<i>Вариант 16</i>
	
Исходные данные: $R_1=9 \text{ Ом}$; $R_2=51 \text{ Ом}$; $R_3=35 \text{ Ом}$; $R_4=40 \text{ Ом}$; $P_3=120 \text{ Вт}$.	Исходные данные: $R_1=12 \text{ Ом}$; $R_2=30 \text{ Ом}$; $R_3=18 \text{ Ом}$; $R_4=8 \text{ Ом}$; $P=37,5 \text{ Вт}$.

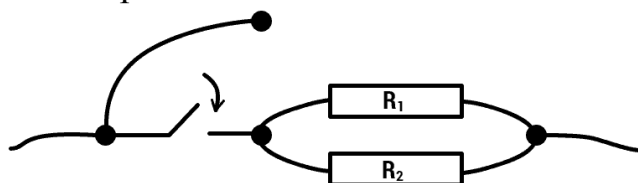
- 2.3 Ответить на контрольные вопросы письменно.
2.4 Сделать вывод по работе.

3 Содержание отчёта

- 3.1 Название.
3.2 Цель работы.
3.3 Номер варианта.
3.4 Схема цепи: в зависимости от варианта 1-16 из таблицы 1.
3.5 Данные для расчета.
3.6 Формулы с расчётами(1), (3), (4), (6), (7), (8), (11), (12), (13), (14), (15).
3.7 Ответы на контрольные вопросы.
3.8 Вывод по работе.

4 Контрольные вопросы и задания

- 4.1 Сформулируйте определение последовательного, параллельного и смешанного соединения?
4.2 Определите, чему равно эквивалентное сопротивление трех резисторов, включенных параллельно, если $R_1 = R_2 = R_3 = 15 \text{ Ом}$?
4.3 Сформулируйте законы Кирхгофа и напишите их в общем виде.
4.4 Объясните, как переносом только одного провода с клеммы на клемму превратить параллельное соединение резисторов в последовательное. Какую роль в такой измененной цепи играет ключ?



Практическая работа №2

Изучение правил сборки электрических цепей, мер безопасности при работе с электрооборудованием

Цель работы: развить умение собирать цепи и анализировать схемы соединения резисторов.

Оснащение рабочего места:

- методические указания.

1. Краткие теоретические сведения

Электрическая цепь представляет собой совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока. В состав цепи могут входить источники электрической энергии, потребители, соединительные провода, аппараты управления, защиты, сигнализации, электроизмерительные приборы и т. д.

Электрические цепи могут быть разветвленными и неразветвленными. Разветвленные цепи состоят из двух или нескольких ветвей. Ветвью называется участок электрической цепи, вдоль которого протекает один и тот же ток. Узел - место соединения ветвей.

Для определения цены деления прибора C , можно воспользоваться формулой:

$$C = \frac{A_n - A_{n-1}}{N} \quad (1)$$

где $A_n - A_{n-1}$ - разность двух ближайших оцифрованных значений измеряемой величины;

N - число делений между оцифрованными значениями.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Изучить краткие теоретические сведения п.1.

2.2. Определите цену деления в зависимости от своего варианта задание находится в таблице 1:

цену деления шкалы амперметра $C_A =$

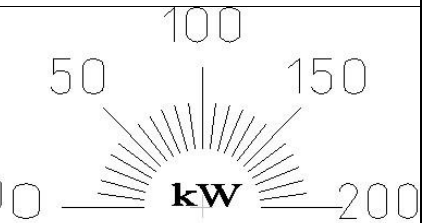
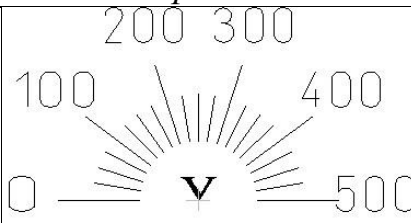
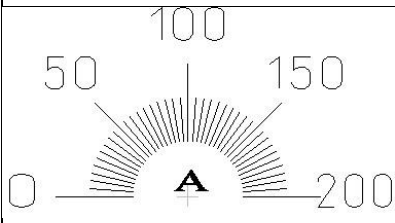
цену деления шкалы вольтметра $C_V =$

цену деления шкалы ваттметра $C_W =$

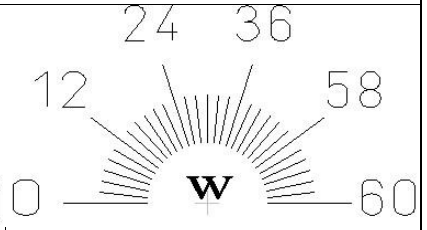
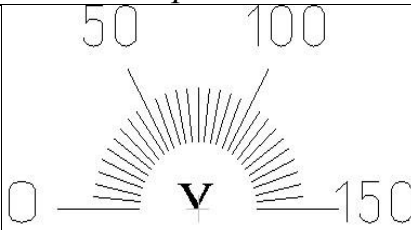
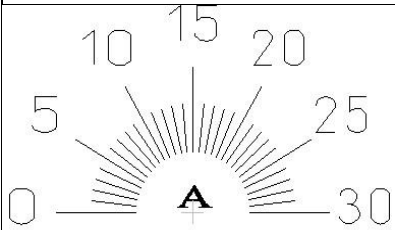
Таблица 1 – шкалы измерительных приборов

<i>Вариант 1</i>		
<i>Вариант 2</i>		
<i>Вариант 3</i>		
<i>Вариант 4</i>		
<i>Вариант 5</i>		
<i>Вариант 6</i>		
<i>Вариант 7</i>		

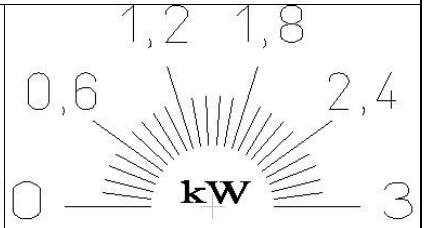
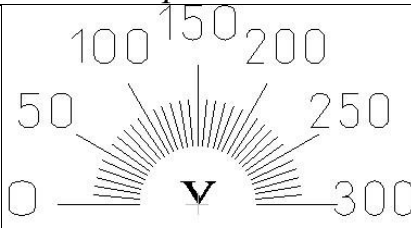
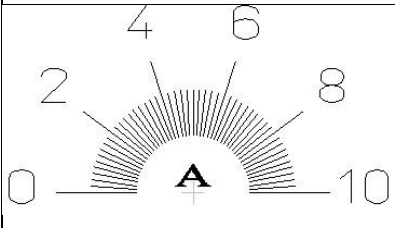
Вариант 8



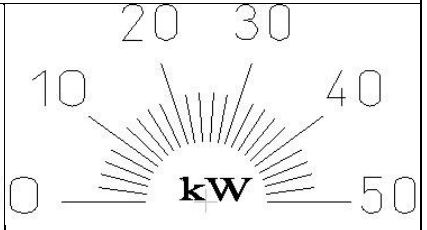
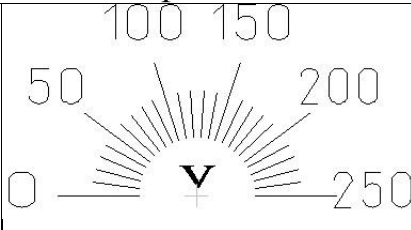
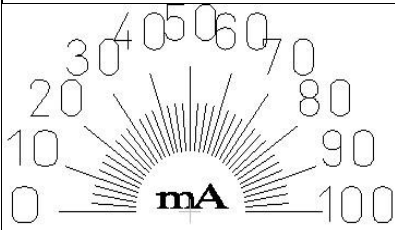
Вариант 9



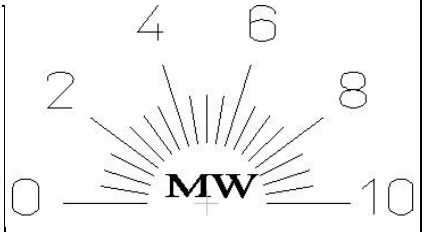
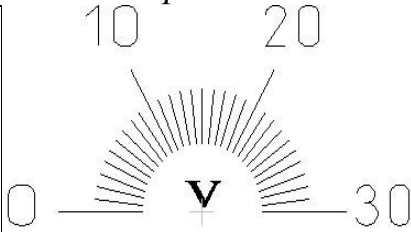
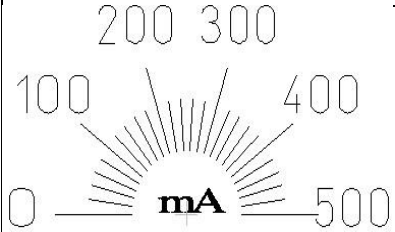
Вариант 10



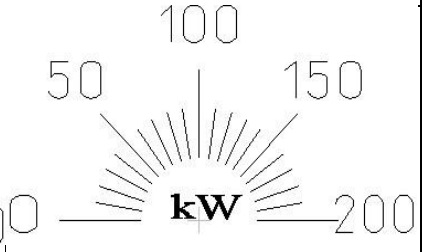
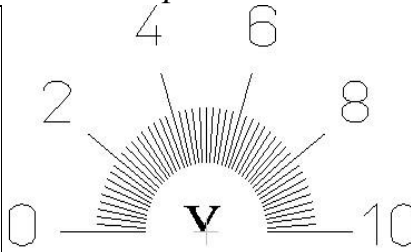
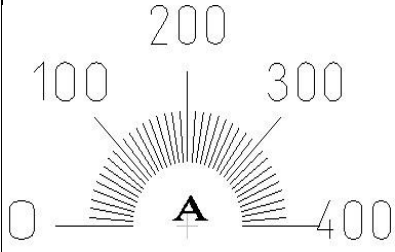
Вариант 11



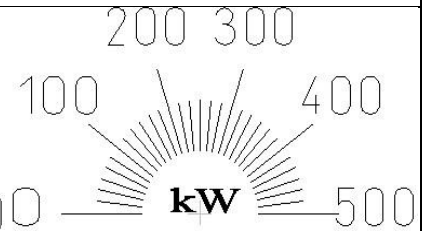
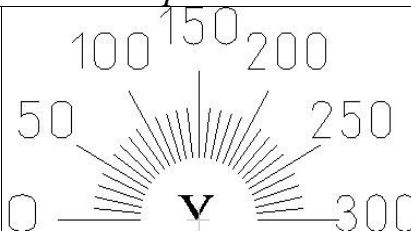
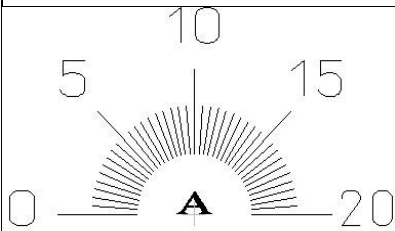
Вариант 12



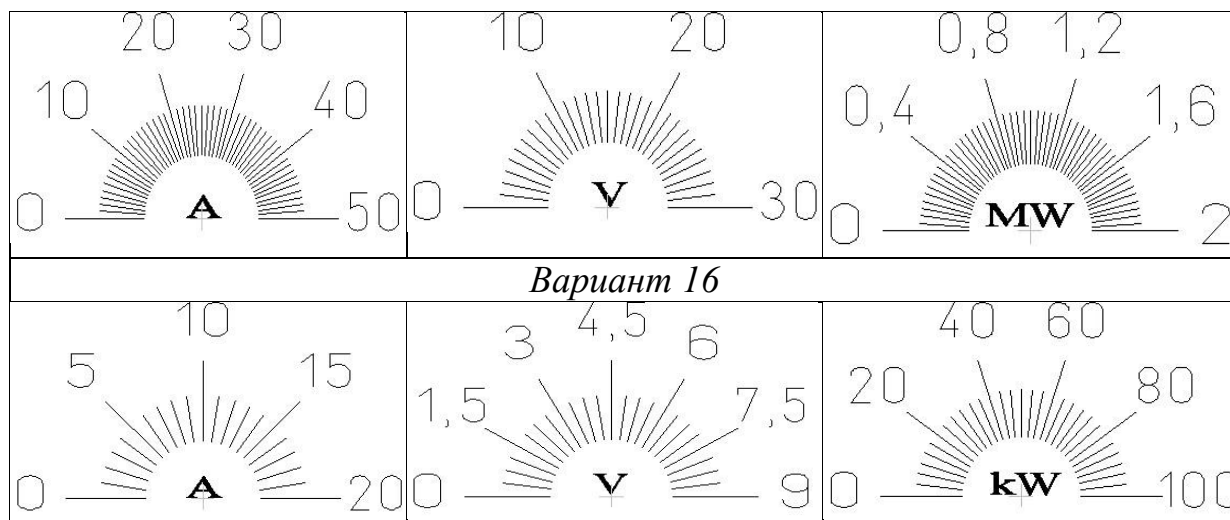
Вариант 13



Вариант 14



Вариант 15



2.3. Заполните таблицу.

Таблица 2 – Характеристики величин.

Величина	Обозначение величины	Единица измерения	Прибор для измерения	Способ подключения прибора	Графическое обозначение прибора
Сила тока					
Напряжение					
Сопротивление					
Мощность					

2.5 Ответить на контрольные вопросы письменно.

2.6 Сделать вывод по работе.

3 Содержание отчета

3.1 Название.

3.2 Цель работы.

3.3 Номер варианта.

3.4 Выполнение задания таблицы 1 в зависимости от указанного варианта 1-16.

3.5 Формулы с расчётами для определения значения цены деления амперметра, вольтметра и ваттметра используя формулу (1).

3.6 Заполнить таблицу 2.

3.7 Ответы на контрольные вопросы.

3.8 Вывод по работе.

4 Контрольные вопросы и задания

- 4.1 Сформулируйте понятие электрическая цепь.
- 4.2 Объясните, почему амперметр должен иметь малое внутреннее сопротивление, а вольтметр большое?
- 4.3 Укажите количество независимых контуров, узлов и ветвей в электрической цепи (рисунок 1).

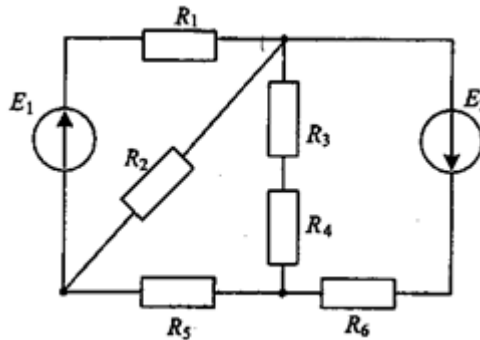


Рисунок 1 - Схема электрической цепи

- 4.4 Начертите схему, содержащую параллельно соединенные катушку и реостат, а также приборы для измерения токов во всех ветвях.

Практическая работа № 3

Изучение электромеханических измерительных приборов

Цель работы: научить анализировать электромеханические измерительные приборы.

Оснащение рабочего места:

- электроизмерительные приборы различных систем.
- методические указания.

1 Краткие теоретические сведения

Электромеханические приборы применяют для измерения напряжения, тока, мощности и других электрических величин в цепях постоянного и переменного тока низкой частоты. Название электроизмерительного прибора определяется его назначением. Различают вольтметры, амперметры, ваттметры, омметры, фазометры и комбинированные приборы – ампервольтметры, вольтомметры и другие.

По принципу действия электромеханические приборы делятся на приборы магнитоэлектрической, электродинамической, ферродинамической, электромагнитной, электростатической, индукционной и некоторых других систем, используемых реже. Принадлежность прибора к той или иной системе обозначается условным значком на его шкале.

Метрологические свойства прибора характеризуют его класс точности. Он обозначается числом на шкале прибора и указывает предел приведенной погрешности прибора, выраженный в процентах.

Основой электромеханического прибора является измерительный механизм (ИМ), имеющий отсчетное устройство, неподвижную и подвижную части и демпфер для успокоения собственных колебаний последней. Кроме ИМ прибор может содержать шунты и добавочные резисторы, расширяющие пределы измерения и размещенные в том же корпусе. На подвижную часть ИМ действует вращающий момент, возникающий под действием токов и напряжений, функционально связанных с измеряемой величиной. Для его уравнивания используются спиральные пружинки или растяжки, создающие противодействующий момент, пропорциональный углу поворота подвижной части.

Одним из важнейших вопросов измерения является оценка абсолютной погрешности измерений, выполненных с помощью электроизмерительных приборов. Характеристикой, позволяющей осуществить такую оценку, является обобщенная характеристика точности прибора – класс точности. Классом точности γ называется безразмерная величина, численно равная наибольшей допустимой приведенной (относительной) основной погрешности измерительного прибора, выраженной в процентах, т.е.

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_H} \cdot 100\% \quad (1)$$

где Δx – максимальная абсолютная основная погрешность электроизмерительного прибора, допускаемая на используемом пределе измерений, при обеспечении требуемых условий измерения;

x_H – нормирующее значение величины.

Для приборов с равномерной шкалой, у которых нулевая отметка находится на краю шкалы, нормирующее значение принимается равным предельному, т.е. $x_H = x_{\text{пр}}$.

На электромеханические амперметры и вольтметры ГОСТ устанавливает следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4; 5. Класс точности обычно указывается на шкале прибора или в его паспорте.

$$\Delta x = \frac{\gamma \cdot x_{\text{пр}}}{100} \quad (2)$$

Для характеристики приборов используется еще целый ряд величин – вариация, входное сопротивление, выходное сопротивление, потребляемая мощность, стабильность, надежность, быстродействие и т.д.

Формула для нахождения цены деления:

$$C = \frac{A_n - A_{n-1}}{N} \quad (3)$$

где $A_n - A_{n-1}$ - разность двух ближайших оцифрованных значений измеряемой величины;

N - число делений между оцифрованными значениями.

























2 Порядок выполнения.




2.1 Изучить краткие теоретические сведения п.1.

2.2 соответствии с таблицей 1 и вариантом, указанным преподавателем,

выполнить расшифровку условных обозначений, наносимых на шкалы приборов.

Таблица 1 – Расшифровка условных обозначений измерительных приборов.

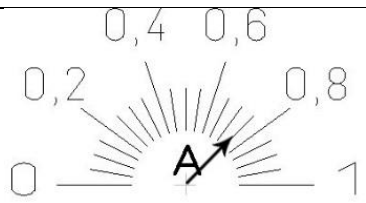
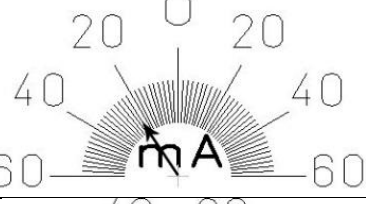
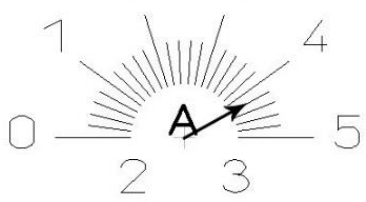
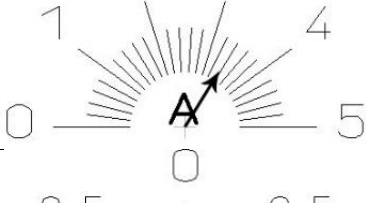

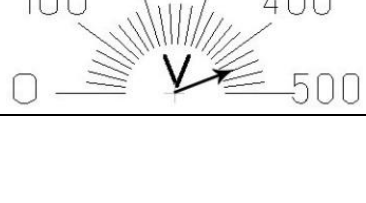
Номер варианта	Условное обозначение	Расшифровка
1	V M362 —   $\perp 1,5$	
2	A Э378 ~   $0,5$	
3	kW Д341/2 ~   $\perp 0,1$	
4	V Э377 ~   $0,2$	
5	A Э378 50 Hz ~  $\perp 4,0$	
6	mV Э378 ~   $0,02$	
7	mA M362 —   $\perp 2,5$	
8	A Э377 ~   $1,0$	
9	V M362 —   $\perp 0,05$	
10	mA M367 —   $\perp 0,5$	
11	V Э368 ~   $0,1$	
12	A Э330 50 Hz —  $\perp 1,5$	
13	V M362 —   $\perp 0,2$	

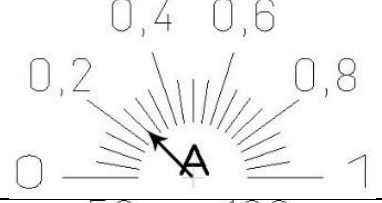


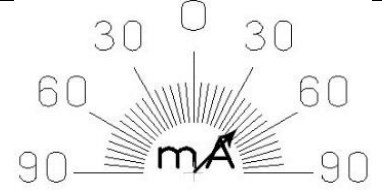
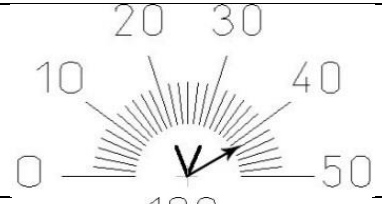

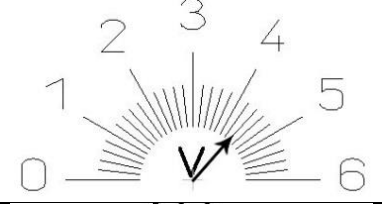
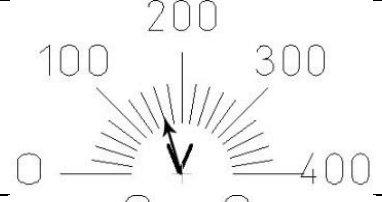
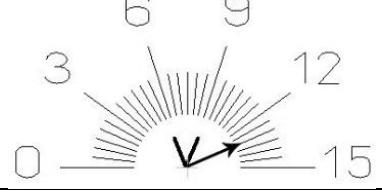
14	A M362 ~  \square 4,0	
15	mV M367 —  $\star \perp$ 1,5	
16	mA M330 —  $\star \perp$ 0,05	

2.3 В соответствии с таблицей 2 и вариантом, указанным преподавателем, заполнить таблицу.

2.4 Рассчитать цену деления используя формулу (3).

Таблица 2 – Расшифровка показаний электромеханического прибора.

№ варианта	Показания электромеханического прибора	Диапазон измерений	Количество делений шкалы	Цена делений шкалы	Показание прибора
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					

2.5 Изучить измерительные приборы на лабораторном стенде.

2.6 Зарисовать шкалу измерительного прибора указанного преподавателем.

2.7 Расшифровать условные обозначения, нанесённые на лицевую панель прибора. Данные занести в таблицу 3.

Таблица 3 – Расшифровка измерительные приборы на лабораторном стенде.

Условное обозначение	Расшифровка

2.8 Ответить на контрольные вопросы письменно.

2.9 Сделать вывод по работе.

3 Содержание отчета

3.1 Название.

3.2 Цель работы.

3.3 Оснащение рабочего места.

3.4 Номер варианта.

3.5 Заполнить таблицу 1.

3.6 Заполнить таблицу 2.

3.7 Формулы с расчётами для определения цены деления значения исходного прибора в зависимости от варианта используя формулу (3).

3.8 Рисунок лицевой панели прибора

3.9 Заполнить таблицу 3.

3.10 Ответы на контрольные вопросы.

3.11 Сделать вывод.

4 Контрольные вопросы и задания.

4.1 Укажите, какие элементы содержат электромеханические измерительные приборы?

4.2 Поясните, почему приборы магнитоэлектрической системы обладают высокой чувствительностью и точностью?

4.3 Объясните принцип действия прибора электромагнитной измерительной системы. Область применения этих приборов?

4.4 Опишите устройство электромеханического прибора магнитоэлектрической системы.

4.5 Объясните влияние шунта и добавочного резистора на пределы измерения токов и напряжений электромеханическими приборами.

Практическая работа №4

Расчет неразветвленных однофазных цепей переменного тока. Построение векторных диаграмм.

Цель работы: изучить неразветвленную цепь переменного тока, содержащую активное, индуктивное и емкостное сопротивления, построить векторную диаграмму.

Оснащение рабочего места:

- методические указания.

1 Краткие теоретические сведения

При исследовании неразветвленных цепей переменного тока необходимо знать, что напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с током, на индуктивности – опережает ток на 90° , на емкости – отстает от тока на 90° . Поэтому напряжения на отдельных участках неразветвленной цепи переменного тока складываются геометрически при помощи векторной диаграммы. При наличии реальных катушек и конденсаторов напряжения на них раскладываются на активные и реактивные составляющие, и активные составляющие складываются арифметически, реактивные составляющие – алгебраически, и только потом определяется результирующее напряжение (U , V) как их геометрическая сумма.

Результирующее напряжение U , V , рассчитывается по формуле

$$U = \sqrt{\sum U_a^2 + \sum U_p^2}, \quad (1)$$

где $\sum U_a$ – активные составляющие напряжений, V ;

$\sum U_p$ – реактивные составляющие напряжений, V .

Таким же образом складываются и сопротивления, и мощности.

Закон Ома будет выглядеть следующим образом

$$I = U/Z, \quad (2)$$

где Z – полное сопротивление цепи, Ом;

I – ток в цепи, А;

U – напряжение в цепи, В.

Формулы для реактивно индуктивно X_L , Ом и реактивно емкостного X_C , Ом сопротивления

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (3)$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (4)$$

где X_L - реактивно индуктивное сопротивление, Ом;
 X_C - реактивно емкостное сопротивление, Ом;
 C – емкость, Ф;
 L – индуктивность, Гн;
 f – частота сети, Гц.
Полное сопротивление Z , Ом, рассчитывается по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (5)$$

где R – активное сопротивление, Ом;
 X_L – реактивное индуктивное сопротивление, Ом.
Активная мощность P , Вт, рассчитывается по формуле

$$P = I^2 R, \quad (6)$$

где P – активная мощность, Вт;
 I – ток в цепи, А;
 R – активное сопротивление, Ом.
Реактивная мощность Q , Вар, рассчитывается по формуле

$$Q = I^2 X, \quad (7)$$

где Q – реактивная мощность, Вар;
 I – ток в цепи, А;
 X – реактивное сопротивление, Ом.
Полная мощность S , В·А, рассчитывается по формуле

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = U \cdot I, \quad (8)$$

где S – полная мощность, В·А;
 Q - реактивная мощность, Вар;
 P – активная мощность, Вт.
Коэффициент мощности $\cos \varphi$, рассчитывается по формуле

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{P}{S}, \quad (9)$$

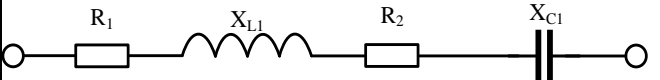
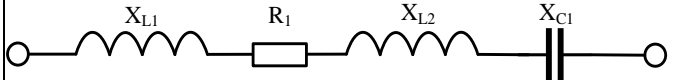
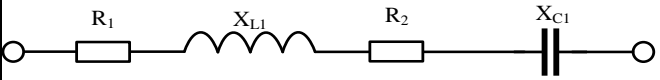

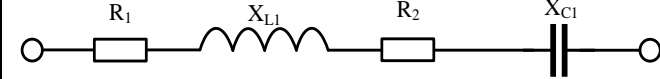
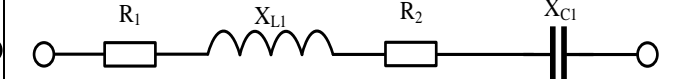
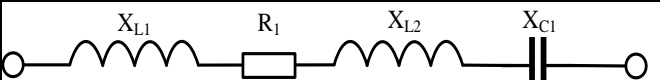
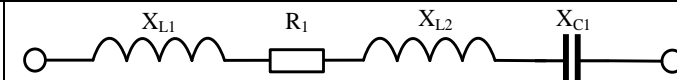
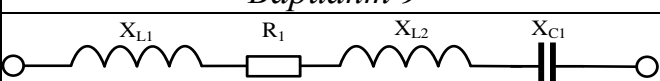
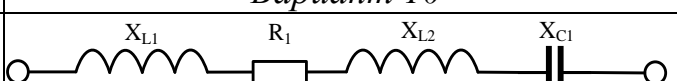
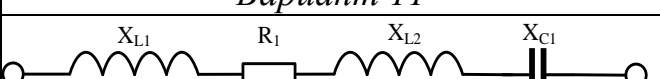

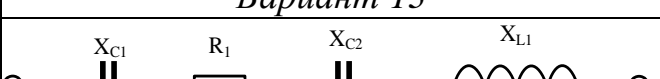
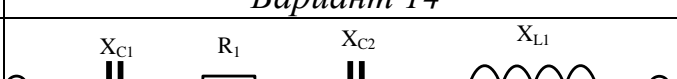
2 Порядок выполнения работы

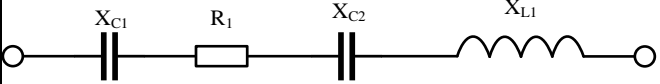
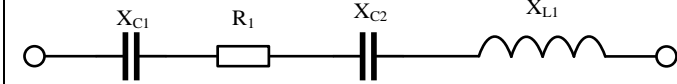
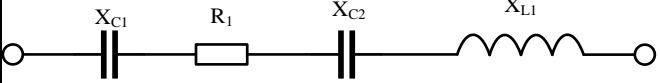
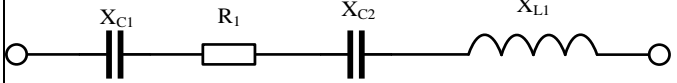
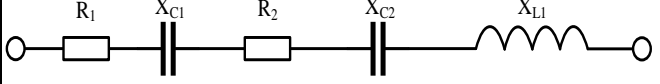
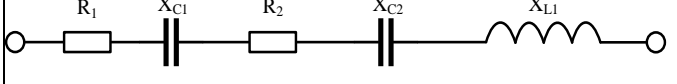
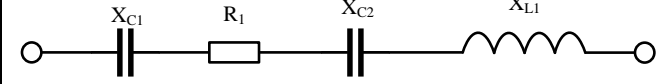
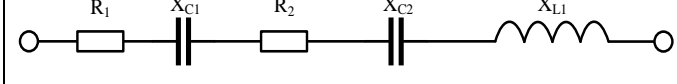
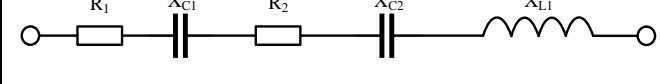
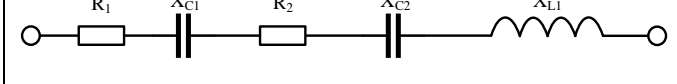
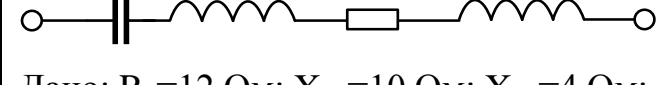
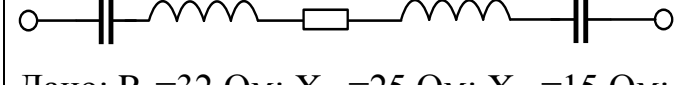
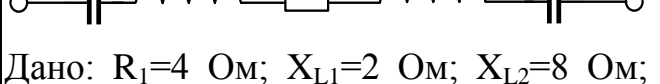
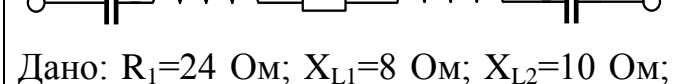
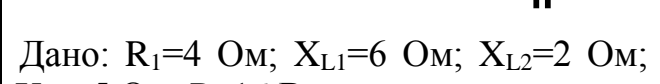
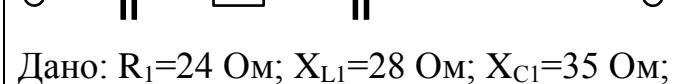
2.1 Изучить краткие теоретические сведения п.1.

2.2 В соответствии с таблицей 1 и вариантом, указанным преподавателем, определить ток в цепи, поля напряжения цепи, активную, реактивную и полную

мощность цепи, коэффициент мощности и построить векторную диаграмму цепи. Используя формулы (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9).

Таблица 1- Электрических схем с четырьмя резисторами.

<p style="text-align: center;"><i>Вариант 1</i></p>  <p>Дано: $R_1=10 \text{ Ом}$; $R_2=20 \text{ Ом}$; $X_{L1}=50 \text{ Ом}$; $X_{C1}=10 \text{ Ом}$; $P=120 \text{ Вт}$</p>	<p style="text-align: center;"><i>Вариант 2</i></p>  <p>Дано: $R_1=3 \text{ Ом}$; $R_2=1 \text{ Ом}$; $X_{L1}=5 \text{ Ом}$; $X_{C1}=2 \text{ Ом}$; $P_2=100 \text{ Вт}$</p>
<p style="text-align: center;"><i>Вариант 3</i></p>  <p>Дано: $R_1=12 \text{ Ом}$; $X_{L1}=20 \text{ Ом}$; $X_{L2}=30 \text{ Ом}$; $X_{C1}=6 \text{ Ом}$; $U_1=72 \text{ В}$</p>	<p style="text-align: center;"><i>Вариант 4</i></p>  <p>Дано: $R_1=2 \text{ Ом}$; $X_{L1}=1 \text{ Ом}$; $X_{L2}=4 \text{ Ом}$; $X_{C1}=8 \text{ Ом}$; $Q=-96 \text{ Вар}$</p>
<p style="text-align: center;"><i>Вариант 5</i></p>  <p>Дано: $R_1=1 \text{ Ом}$; $R_2=2 \text{ Ом}$; $X_{L1}=8 \text{ Ом}$; $X_{C1}=4 \text{ Ом}$; $S=80 \text{ В} \cdot \text{А}$</p>	<p style="text-align: center;"><i>Вариант 6</i></p>  <p>Дано: $R_1=8 \text{ Ом}$; $R_2=4 \text{ Ом}$; $X_{L1}=6 \text{ Ом}$; $X_{C1}=22 \text{ Ом}$; $P_1=32 \text{ Вт}$</p>
<p style="text-align: center;"><i>Вариант 7</i></p>  <p>Дано: $R_1=16 \text{ Ом}$; $X_{L1}=15 \text{ Ом}$; $X_{L2}=5 \text{ Ом}$; $X_{C1}=8 \text{ Ом}$; $Q_{L1}=32 \text{ Вар}$</p>	<p style="text-align: center;"><i>Вариант 8</i></p>  <p>Дано: $R_1=4 \text{ Ом}$; $X_{L1}=6 \text{ Ом}$; $X_{L2}=2 \text{ Ом}$; $X_{C1}=5 \text{ Ом}$; $P=16 \text{ Вт}$</p>
<p style="text-align: center;"><i>Вариант 9</i></p>  <p>Дано: $R_1=8 \text{ Ом}$; $X_{L1}=2 \text{ Ом}$; $X_{L2}=2 \text{ Ом}$; $X_{C1}=10 \text{ Ом}$; $Q=-24 \text{ Вар}$</p>	<p style="text-align: center;"><i>Вариант 10</i></p>  <p>Дано: $R_1=3 \text{ Ом}$; $X_{L1}=10 \text{ Ом}$; $X_{L2}=12 \text{ Ом}$; $X_{C1}=26 \text{ Ом}$; $P_1=48 \text{ Вт}$</p>
<p style="text-align: center;"><i>Вариант 11</i></p>  <p>Дано: $R_1=40 \text{ Ом}$; $X_{L1}=8 \text{ Ом}$; $X_{L2}=6 \text{ Ом}$; $X_{C1}=16 \text{ Ом}$; $U_{L1}=12 \text{ В}$</p>	<p style="text-align: center;"><i>Вариант 12</i></p>  <p>Дано: $R_1=4 \text{ Ом}$; $X_{L1}=3 \text{ Ом}$; $X_{L2}=6 \text{ Ом}$; $X_{C1}=12 \text{ Ом}$; $S=500 \text{ В} \cdot \text{А}$</p>
<p style="text-align: center;"><i>Вариант 13</i></p>  <p>Дано: $R_1=8 \text{ Ом}$; $X_{L1}=6 \text{ Ом}$; $X_{C1}=8 \text{ Ом}$; $X_{C2}=4 \text{ Ом}$; $U_{C2}=40 \text{ В}$</p>	<p style="text-align: center;"><i>Вариант 14</i></p>  <p>Дано: $R_1=60 \text{ Ом}$; $X_{L1}=20 \text{ Ом}$; $X_{C1}=40 \text{ Ом}$; $X_{C2}=60 \text{ Ом}$; $Q_{C2}=240 \text{ Вар}$</p>

<p style="text-align: center;"><i>Вариант 15</i></p>  <p>Дано: $R_1=48 \text{ Ом}$; $X_{L1}=36 \text{ Ом}$; $X_{C1}=60 \text{ Ом}$; $X_{C2}=40 \text{ Ом}$; $P_1=432 \text{ Вт}$</p>	<p style="text-align: center;"><i>Вариант 16</i></p>  <p>Дано: $R_1=40 \text{ Ом}$; $X_{L1}=50 \text{ Ом}$; $X_{C1}=12 \text{ Ом}$; $X_{C2}=8 \text{ Ом}$; $Q_{L1}=200 \text{ Вар}$</p>
<p style="text-align: center;"><i>Вариант 17</i></p>  <p>Дано: $R_1=12 \text{ Ом}$; $X_{L1}=16 \text{ Ом}$; $X_{C1}=10 \text{ Ом}$; $X_{C2}=60 \text{ Ом}$; $U_{L1}=160 \text{ В}$</p>	<p style="text-align: center;"><i>Вариант 18</i></p>  <p>Дано: $R_1=24 \text{ Ом}$; $X_{L1}=28 \text{ Ом}$; $X_{C1}=35 \text{ Ом}$; $X_{C2}=25 \text{ Ом}$; $S=1000 \text{ В} \cdot \text{А}$</p>
<p style="text-align: center;"><i>Вариант 19</i></p>  <p>Дано: $R_1=10 \text{ Ом}$; $X_{C1}=20 \text{ Ом}$; $R_2=14 \text{ Ом}$; $X_{C2}=30 \text{ Ом}$; $X_{L1}=18 \text{ Ом}$; $U_{R2}=28 \text{ В}$</p>	<p style="text-align: center;"><i>Вариант 20</i></p>  <p>Дано: $R_1=6 \text{ Ом}$; $R_2=2 \text{ Ом}$; $X_{L1}=10 \text{ Ом}$; $X_{C1}=10 \text{ Ом}$; $X_{C2}=3 \text{ Ом}$; $P=200 \text{ Вт}$</p>
<p style="text-align: center;"><i>Вариант 21</i></p>  <p>Дано: $R_1=40 \text{ Ом}$; $R_2=20 \text{ Ом}$; $X_{L1}=20 \text{ Ом}$; $X_{C1}=80 \text{ Ом}$; $X_{C2}=20 \text{ Ом}$; $Q_{C1}=320 \text{ Вар}$</p>	<p style="text-align: center;"><i>Вариант 22</i></p>  <p>Дано: $R_1=30 \text{ Ом}$; $R_2=34 \text{ Ом}$; $X_{L1}=32 \text{ Ом}$; $X_{C1}=50 \text{ Ом}$; $X_{C2}=30 \text{ Ом}$; $U_{C1}=500 \text{ В}$</p>
<p style="text-align: center;"><i>Вариант 23</i></p>  <p>Дано: $R_1=24 \text{ Ом}$; $R_2=40 \text{ Ом}$; $X_{L1}=52 \text{ Ом}$; $X_{C1}=40 \text{ Ом}$; $X_{C2}=60 \text{ Ом}$; $Q_{L1}=468 \text{ Вар}$</p>	<p style="text-align: center;"><i>Вариант 24</i></p>  <p>Дано: $R_1=50 \text{ Ом}$; $R_2=30 \text{ Ом}$; $X_{L1}=100 \text{ Ом}$; $X_{C1}=20 \text{ Ом}$; $X_{C2}=20 \text{ Ом}$; $P_2=480 \text{ Вт}$</p>
<p style="text-align: center;"><i>Вариант 25</i></p>  <p>Дано: $R_1=12 \text{ Ом}$; $X_{L1}=10 \text{ Ом}$; $X_{L2}=4 \text{ Ом}$; $X_{C1}=20 \text{ Ом}$; $Q=-64 \text{ Вар}$</p>	<p style="text-align: center;"><i>Вариант 26</i></p>  <p>Дано: $R_1=32 \text{ Ом}$; $X_{L1}=25 \text{ Ом}$; $X_{L2}=15 \text{ Ом}$; $X_{C1}=8 \text{ Ом}$; $X_{C2}=8 \text{ Ом}$; $U_{L1}=125 \text{ В}$</p>
<p style="text-align: center;"><i>Вариант 27</i></p>  <p>Дано: $R_1=4 \text{ Ом}$; $X_{L1}=2 \text{ Ом}$; $X_{L2}=8 \text{ Ом}$; $X_{C1}=4 \text{ Ом}$; $X_{C2}=3 \text{ Ом}$; $U_{C2}=15 \text{ В}$</p>	<p style="text-align: center;"><i>Вариант 28</i></p>  <p>Дано: $R_1=24 \text{ Ом}$; $X_{L1}=8 \text{ Ом}$; $X_{L2}=10 \text{ Ом}$; $X_{C1}=20 \text{ Ом}$; $X_{C2}=30 \text{ Ом}$; $P=96 \text{ Вт}$</p>
<p style="text-align: center;"><i>Вариант 29</i></p>  <p>Дано: $R_1=4 \text{ Ом}$; $X_{L1}=6 \text{ Ом}$; $X_{L2}=2 \text{ Ом}$; $X_{C1}=5 \text{ Ом}$; $P=16 \text{ Вт}$</p>	<p style="text-align: center;"><i>Вариант 30</i></p>  <p>Дано: $R_1=24 \text{ Ом}$; $X_{L1}=28 \text{ Ом}$; $X_{C1}=35 \text{ Ом}$; $X_{C2}=25 \text{ Ом}$; $Q=-187 \text{ Вар}$</p>

2.3 Ответить на контрольные вопросы письменно.

2.4 Сделать вывод по работе.

3 Содержание отчёта

- 3.1 Название.
- 3.2 Цель работы.
- 3.3 Номер варианта.
- 3.4 Схема цепи: в зависимости от варианта 1- 30 из таблицы 1.
- 3.5 Данные для расчета.
- 3.6 Формулы (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9) с расчётами.
- 3.7 Ответы на контрольные вопросы.
- 3.8 Вывод по работе.

4 Контрольные вопросы и задания

- 4.1 Укажите зависимость изменяется угла при изменении реактивного сопротивления?
- 4.2 Определите, как будет изменяться сила тока при изменении реактивного сопротивления?
- 4.3 Определите, как будут изменяться X_L и X_C с увеличением частоты?
(Ответ подтвердить формулами).

Практическая работа №5

Расчет разветвленных цепей переменного тока. Построение векторных диаграмм.

Цель работы: изучить разветвленную цепь переменного тока, содержащую реальную катушку индуктивности и идеальный конденсатор, построить векторные диаграммы.

Оснащение рабочего места:

- Методические указания.

1 Краткие теоретические сведения

Проведем анализ работы электрической цепи с параллельным соединением элементов R , L , C . Рассмотрим следующую схему.

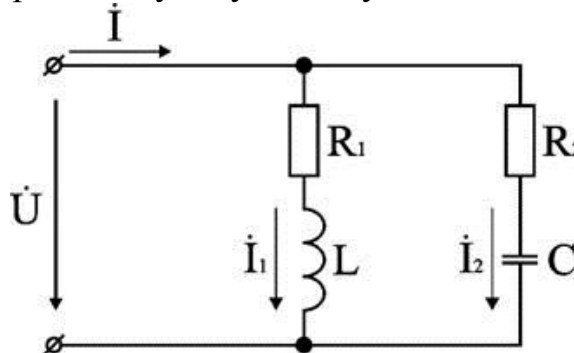


Рисунок 1 - Схема электрическая принципиальная

Положим, что заданы величины R_1 , R_2 , L , C , частота f и входное напряжение U . Требуется определить токи в ветвях и ток всей цепи.

В данной схеме две ветви. Согласно свойству параллельного соединения, напряжение на всех ветвях параллельной цепи одинаковое, если пренебречь сопротивлением подводящих проводов.

Задача разбивается на ряд этапов

1.1 Определение сопротивлений ветвей.

Реактивные сопротивления X_L , X_C , элементов L и C определяем по формулам

$$X_L = \omega L, X_C = \frac{1}{\omega C}, \omega = 2\pi f. \quad (1)$$

где ω – угловая частота, рад/с;

L – индуктивность катушки, Гн;

C – емкость конденсатора, Ф;

f – частота сети, Гц.

Полное сопротивление ветвей Z_1 , Z_2 , равны

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_L^2}, Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_C^2}. \quad (2)$$

Соответствующие им углы сдвига фаз φ_1 , φ_2 , град, рассчитываются по формуле

$$\varphi_1 = \arctg \frac{X_L}{R_1}, \varphi_2 = \arctg \frac{X_C}{R_2}. \quad (3)$$

1.2 Нахождение токов в ветвях.

Токи I_1 , I_2 в ветвях находятся по закону Ома

$$I_1 = \frac{U}{Z_1}, I_2 = \frac{U}{Z_2}. \quad (4)$$

1.3 Нахождение тока всей цепи.

Ток всей цепи может быть найден несколькими методами: графическим, методом мощностей, методом проекций и методом проводимостей.

Чаще всего используют метод проекций и метод проводимостей. В методе проекций ток I_1 и I_2 раскладываются по две ортогональные составляющие активную и реактивную. Ось активной составляющей совпадает с вектором напряжения U . Ось реактивной составляющей перпендикулярна вектору U (рисунок 2).

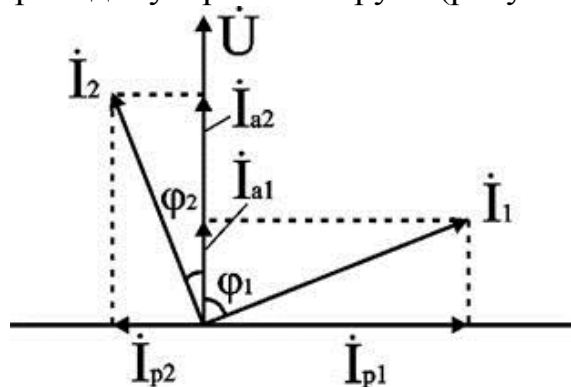


Рисунок 2 – Векторная диаграмма токов

Активные составляющие токов равны

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1, I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2, \\ I_a = I_{1a} + I_{2a}. \quad (5)$$

Реактивные составляющие токов равны

$$I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1, I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2, \\ I_p = I_{1p} - I_{2p}. \quad (6)$$

В последнем уравнении взят знак минус, поскольку составляющие I_{1p} (индуктивная) и I_{2p} (емкостная) направлены в разные стороны от оси U .

Полный ток находится из уравнений

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}, \\ \varphi = \arctg \frac{I_p}{I_a} \quad (7)$$

В методе проводимостей также используется разложение на активные и реактивные составляющие. Используя уравнение ($R = Z \cos \varphi$) активные составляющие токов записываются в виде

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \cdot \frac{R_1}{Z_1} = U \frac{R_1}{Z_1^2} = U g_1, \quad (8)$$

где через $g_1 = \frac{R_1}{Z_1^2}$ обозначена величина названная активной проводимостью первой ветви. Аналогичным образом получим

$$I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2 = \frac{U}{Z_2} \cdot \frac{R_2}{Z_2} = U \frac{R_2}{Z_2^2} = U g_2, \quad (9)$$

где $g_2 = \frac{R_2}{Z_2^2}$; а величину $g = g_1 + g_2$ называют активной проводимостью всей цепи.

Используя уравнение ($X = Z \sin \varphi$) запишем реактивные составляющие токов

$$I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \cdot \frac{X_L}{Z_1} = U \frac{X_L}{Z_1^2} = U b_1,$$

$$I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2 = \frac{U}{Z_2} \cdot \frac{X_C}{Z_2} = U \frac{X_C}{Z_2^2} = U b_2,$$

где b_1 и b_2 – реактивные проводимости ветвей $b_2 = \frac{X_C}{Z_2^2}$, $b_1 = \frac{X_L}{Z_1^2}$. Для реактивной проводимости всей цепи имеем

$$b = b_1 - b_2, \quad (10)$$

Величина тока I и угол φ находятся из соотношений (14.3) и (14.4).

1.4 Анализ расчетных данных.

В зависимости от соотношения реактивных проводимостей b_1 и b_2 возможны три варианта: $b_1 > b_2$; $b_1 < b_2$; $b_1 = b_2$.

Для варианта $b_1 > b_2$ имеем $I_{1p} > I_{2p}$, $\varphi > 0$. Цепь имеет активно-индуктивный характер. Векторная диаграмма изображена на рисунке 3.

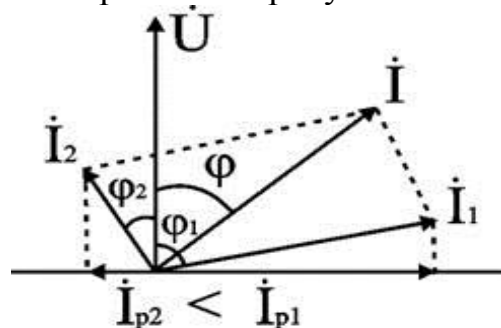


Рисунок 3 – Векторная диаграмма токов $I_{1p} > I_{2p}$.

При $b_1 < b_2$ токи $I_{1p} < I_{2p}$, $\varphi < 0$. Цепь имеет активно-емкостный характер. Векторная диаграмма изображена на рисунок 4.

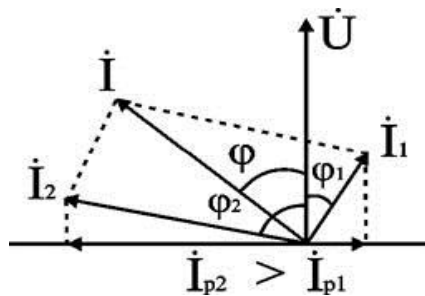


Рисунок 4 – Векторная диаграмма токов $I_{1P} < I_{2P}$.

Если $b_1 = b_2$, то $I_{1P} = I_{2P}$, $\varphi = 0$. Цепь имеет чисто активное сопротивление. Ток потребляемый цепью от источника наименьший. Этот режим называется резонанс токов. Векторная диаграмма изображена на рисунок 5.

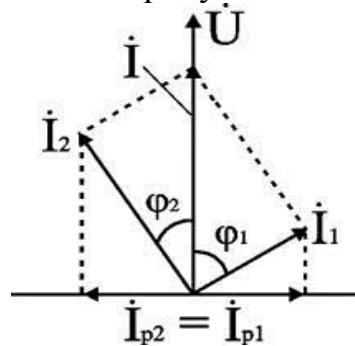


Рисунок 5 – Векторная диаграмма токов $I_{1P} = I_{2P}$.

2 Порядок выполнения работы

2.1 Изучить краткие теоретические сведения п.1.

2.2 В соответствии с таблицей 1, 2 и вариантом, указанным преподавателем, определить токи на ветвях и ток в неразветвленной части цепи. Построить векторную диаграмму. Используя формулы (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9).

Таблица 1 – Электрические схемы переменного тока.

<p>Рисунок 1</p>	<p>Рисунок 2</p>	<p>Рисунок 3</p>
<p>Рисунок 4</p>	<p>Рисунок 5</p>	<p>Рисунок 6</p>

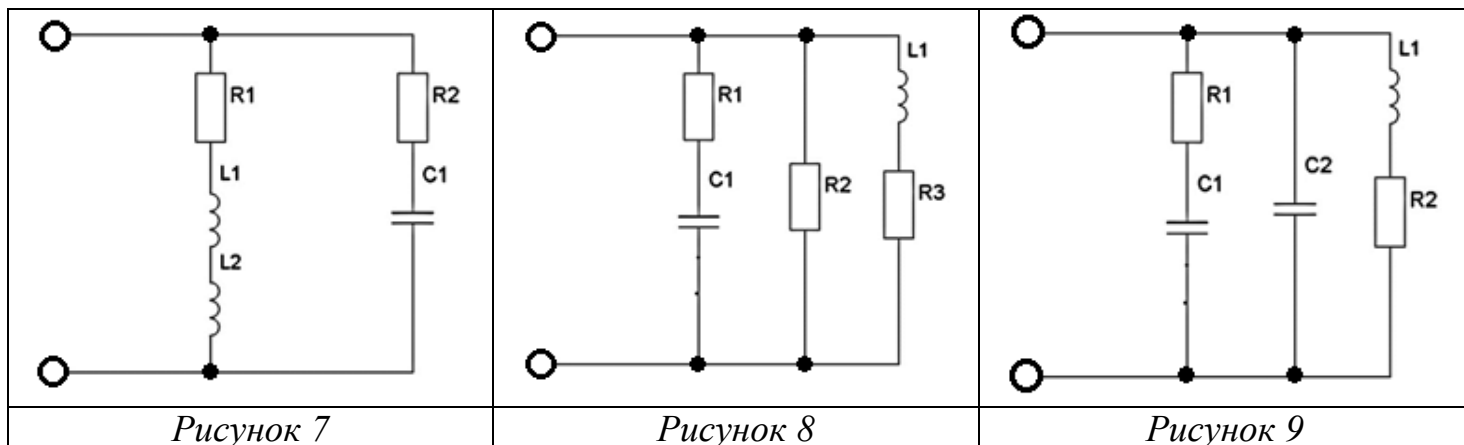


Таблица 2 – Исходные значения

Рисунок 1						
№	U	R ₁	R ₂	R ₃	X _L	X _C
1	100	12	20	15	5	11
2	127	21	5	7	7	3
3	220	35	21	5	47	100
4	260	44	15	12	150	43
Рисунок 2						
№	U	R ₁	X _{L1}	X _{L2}	X _{L3}	X _C
1	100	12	20	15	5	11
2	127	21	5	7	7	3
3	220	35	21	5	47	100
4	260	44	15	12	150	43
Рисунок 3						
№	U	R ₁	X _{L1}	X _{L2}	X _{C3}	X _{C2}
1	100	12	20	15	5	11
2	127	21	5	7	7	3
3	220	35	21	5	47	10
4	260	44	15	12	17	43
Рисунок 4						
№	U	R ₁	R ₂	X _{L1}	X _{L2}	X _{C1}
1	100	12	20	15	5	11
2	127	21	5	9	7	3
3	220	35	21	22	47	10
4	260	44	15	19	17	43
Рисунок 5						
№	U	R ₁	R ₂	X _{L1}	X _{C1}	X _{C2}
1	100	12	20	21	5	11
2	127	21	5	25	7	14
3	220	35	21	44	47	12
4	260	44	15	79	17	43
Рисунок 6						
№	U	R ₁	R ₂	X _{L1}	X _{C1}	X _{C2}
1	100	12	20	21	5	11
2	127	21	5	25	7	14

3	220	35	21	44	47	12
4	260	44	15	79	17	43
Рисунок 7						
№	U	R ₁	R ₂	X _{L1}	X _{L2}	X _{C1}
1	100	12	20	21	5	11
2	127	21	5	25	7	14
3	220	35	21	44	47	12
4	260	44	15	79	17	43
Рисунок 8						
№	U	R ₁	R ₂	R ₃	X _{L1}	X _{C1}
1	100	12	20	21	5	11
2	127	21	5	25	7	14
3	220	35	21	44	47	12
4	260	44	15	79	17	43
Рисунок 9						
№	U	R ₁	R ₂	X _{L1}	X _{C1}	X _{C2}
1	100	12	20	21	5	11
2	127	21	5	25	7	14
3	220	35	21	44	47	12
4	260	44	15	79	17	43

2.3 Ответить на контрольные вопросы письменно.

2.4 Сделать вывод по работе.

3 Содержание отчёта

3.1 Название.

3.2 Цель работы.

3.3 Номер варианта.

3.4 Схема цепи: в зависимости от варианта 1- 9 из таблицы 1.

3.5 Данные для расчета: в зависимости от варианта из таблицы 1.

3.6 Формулы (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9) с расчётами.

3.7 Ответы на контрольные вопросы.

3.8 Вывод по работе.

4 Контрольные вопросы и задания

4.1 Определите, как изменяется угол φ при размыкании цепи?

4.2 Опишите характер изменения реактивной составляющей тока при тех же условиях.

4.3 Укажите связь между полной активной и реактивной проводимостью.

Практическая работа №6

Расчет параметров диодов, выбор диодов для различных схем выпрямления.

Цель работы: научиться пользоваться справочной литературой при расчетах параметров и выборе диодов для схем выпрямления.

1 Краткие теоретические сведения

Выпрямителями называют устройство, предназначенное для преобразования переменного тока в постоянный (выпрямление переменного тока), которые служат для питания электронных схем автоматики, регулируемого электропривода и автоматических систем управления технологическими процессами.

Классификация выпрямителей

- неуправляемые – выпрямленное на них напряжение неизменно по значению, применяются для питания большинства электронных устройств, выполненных как на дискретных, так и на ИМС.

- управляемые – выпрямленное на них напряжение изменяется по значению (регулируется);

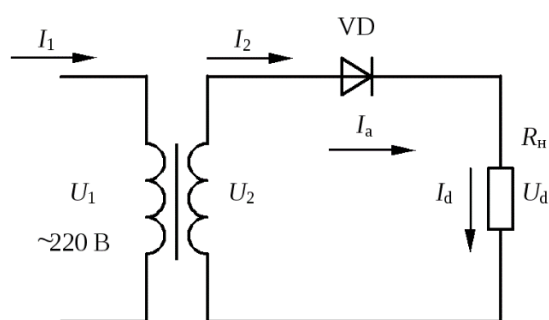
- однофазные (однополупериодный и двухполупериодный – мостовой и с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора);

- многофазный (обычно трехфазные). Различают два типа трехфазных выпрямителей: с нейтральным выводом и мостовой.

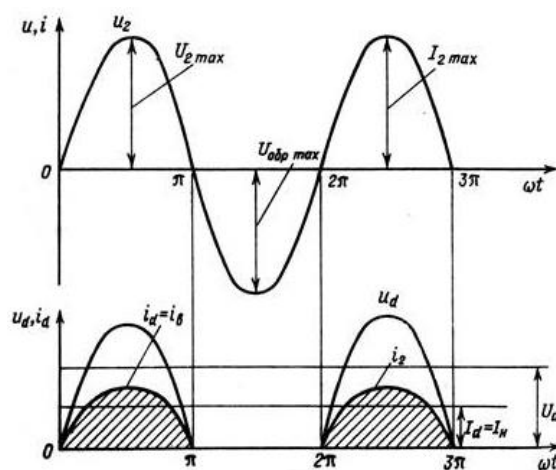
По мощности их подразделяют на выпрямители малой (как правило, однофазные), средней и большой (трехфазной).

Схема выпрямления:

1) Однополупериодный



а



б

Рисунок 1 – Однополупериодная схема выпрямления

В данной схеме (рисунок 1) диод VD включен последовательно со вторичной обмоткой трансформатора Тр и сопротивлением нагрузки R_N . Работу однополупериодного выпрямителя можно проанализировать с помощью временных диаграмм (рисунок 1, б). Недостатки однополупериодного выпрямителя: высокий уровень пульсации переменного тока ($q=1,57$), подмагничивание сердечника трансформатора постоянным током. Эти недостатки отсутствуют в схемах двухполупериодных выпрямителей.

2) Двухполупериодный с выводом средней точки обмотки трансформатора

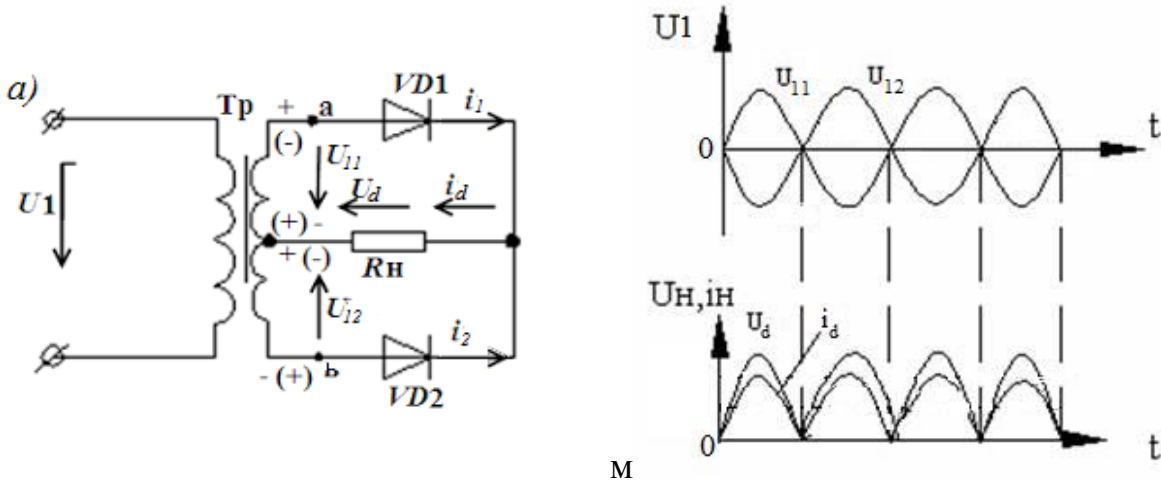


Рисунок 2 – Двухполупериодная схема выпрямления с выводом средней точки обмотки трансформатора

Данная схема представляет собой сочетание двух однополупериодных выпрямителей, включенных на нагрузочное сопротивление R_H (рисунок 2).

Напряжение U_{11} и U_{12} должны быть равны по амплитуде и находится в противофазе.

Однофазная двухполупериодная схема (рисунок 2) применяется в мощных выпрямителях для выпрямления низких напряжений, когда по обратному напряжению допускается установка одного диода.

3) Однофазная мостовая

Наиболее распространённой является мостовая схема выпрямления (рисунок 3). В этой схеме к одной диагонали моста подведено переменное напряжение, а к другой подключено нагрузка. В этой схеме используется только одна вторичная обмотка трансформатора, напряжение которой в два раза меньше суммарного напряжения двух обмоток, соединенных последовательно (как показано на рисунке 2), следовательно, обратное напряжение на каждой группе диодов ($VD1, VD3$ и $VD2, VD4$) в два раза ниже, чем в схеме рисунка 2.

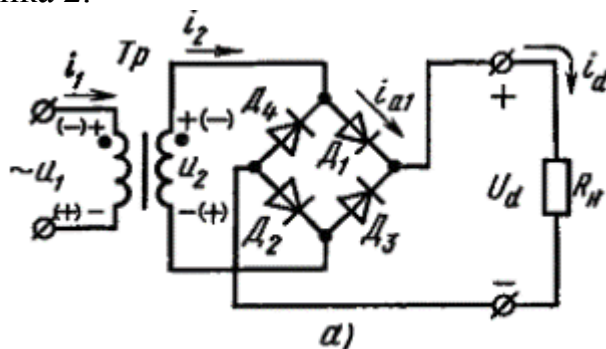
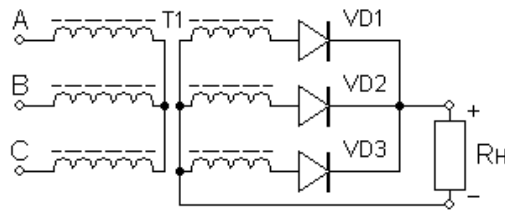


Рисунок 3 – Однофазная мостовая схема выпрямления

Недостатком мостовых схем выпрямления является то, что использование большего количества диодов удваивает потери при прохождении прямого тока. Наиболее целесообразно применение этой схемы при больших токах и малых напряжениях на диодах.

4) Трёхфазная с нейтральным выводом

а)



б)

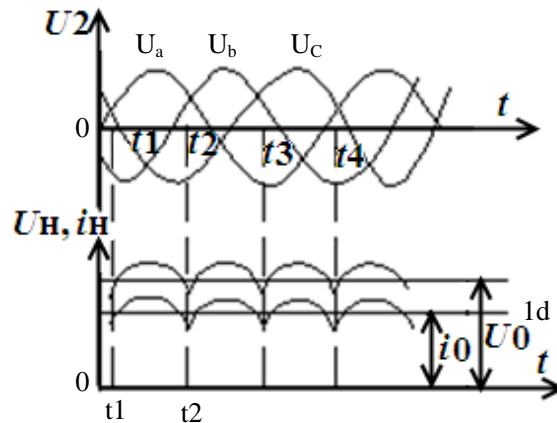


Рисунок 4 – Трехфазный выпрямитель с нейтральным выводом

Состоит из трехфазного трансформатора, вторичная обмотка которого соединена звездой трех диодов, включенных в каждую из фаз звезды (VD1, VD2, VD3) и нагрузочного резистора R_H (рисунок 4).

Три диода выпрямителя работают поочередно, каждый в течение $1/3$ периода, когда потенциал анода работающего диода более положителен по отношению к потенциала анода двух других диодов. Выпрямленный ток через резистор R_H , создаваемый токами каждого диода, имеет одно и то же направление и поэтому равен сумме токов всех фаз:

$$i_d = i_a + i_b + i_c.$$

Недостатками этой схемы являются следующее: не полностью используется мощность трансформатора (работает практически в однофазном режиме); обратное напряжение на диоде U_{OBR} в 2 раза превышает напряжение на нагрузке U_H ; подмагничивание сердечника трансформатора постоянным током (снижает КПД выпрямителя).

5) Трехфазная мостовая схема (схема А.Н. Ларионова)

В этой схеме (рисунок 5) две группы диодов: катодная – объединены катоды (VD1, VD3, VD5), и анодная – объединены аноды (VD2, VD4, VD6).

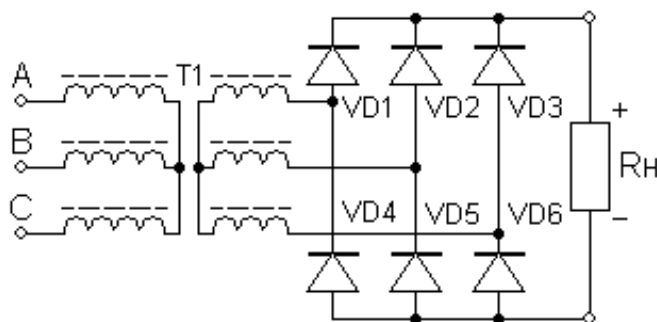


Рисунок 5 - Трехфазная мостовая схема выпрямителя

Все виды диодов схемы работают попарно-поперечно: ток проходит через ту пару диодов, разность потенциалов между которыми в данный момент времени максимальна. Смена пар диодов происходит через каждые $2\pi/6$, т.е. через каждые 60° . В рассматриваемой схеме выпрямленные ток и напряжение в два раза больше, чем в трехфазном выпрямителе с нейтральным выводом (рисунок 5), а пульсации напряжения значительно меньше, поэтому выпрямитель во многих случаях может работать без сглаживающего фильтра.

Порядок расчета схем выпрямления

При составлении реальной схемы выпрямления задаются значением мощности потребителя. P_d , Вт, получающего питание от данного выпрямителя, и выпрямленным напряжением, U_d , В, при котором работает потребитель постоянного тока.

Отсюда ток I_d , А, потребителя рассчитывается по формуле

$$I_d = P_d / U_d, \quad (1)$$

Напряжение, действующее на диод в непроводящий период U_B , зависит от схемы выпрямления.

Сравнивая ток потребителя I_d с допустимым током диода $I_{доп}$ и напряжение, действующее на диод в непроводящий период U_B , с амплитудным значением обратного значения $U_{обр}$ диода выбирают соответствующие диоды, при этом должны соблюдаться следующие требования:

$$\begin{aligned} I_{доп} &\geq I_d, \\ U_{обр} &\geq U_B. \end{aligned} \quad (2)$$

Таблица 1 – Параметры типовых выпрямительных схем

Параметр	Выпрямительная схема				
	Однофазная			Трехфазная	
	Однополу периодная	Двухполу периодная	Мостовая	Нулевая	Мостовая
Фазное напряжение	2,22 U_d	1,11 U_d	1,11 U_d	0,85 U_d	0,43 U_d
Обратное напряжение	3,14 U_d	3,14 U_d	1,57 U_d	2,1 U_d	1,05 U_d
Выпрямленное напряжение	0,45 U_ϕ	0,9 U_ϕ	0,9 U_ϕ	1,17 U_ϕ	2,34 U_ϕ
Коэффициент пульсации	1,57	0,67	0,67	0,25	0,06
Среднее значение тока через диод	I_d	0,5 I_d	0,5 I_d	0,33 I_d	0,33 I_d
Средняя мощность трансформатора	-	1,34 P_d	1,11 P_d	1,35 P_d	1,05 P_d

Примеры расчета схем выпрямления

Пример 1. К однополупериодному выпрямителю подключен потребитель $P_d=100\text{Вт}$ при напряжении $U_d=40\text{ В}$. Выбрать один из трех типов полупроводниковых диодов (таблица 2) и пояснить, а основании чего сделан выбор. Определить необходимое напряжение вторичной обмотки трансформатора.

Таблица 2 – Параметры диодов

Тип диода	Параметры	
	$I_{\text{доп}}, \text{ А}$	$U_{\text{обр}}, \text{ В}$
Д221	0,4	400
Д242	5	100
Д303	3	200

Решение:

1) Определяем ток потребителя:

$$I_d = P_d / U_d = 100 / 40 = 2,5 \text{ А}$$

2) Определяем напряжение, действующие на диод в непроводящий период. Для однополупериодного выпрямителя (таблица 1)

$$U_B = 3,14 U_d$$
$$U_B = 3,14 \cdot 40 = 126 \text{ В}$$

3) Выбираем диод из условия:

$$I_{\text{доп}} \geq I_d \geq 2,5 \text{ А},$$
$$U_{\text{обр}} \geq U_B \geq 126 \text{ В}$$

Этим условиям удовлетворяет диод Д303 (таблица 2), для которого

$$I_{\text{доп}} = 3 > 2,5 \text{ А},$$
$$U_{\text{обр}} = 200 > 126 \text{ В}.$$

Диод Д221 удовлетворяет предъявленным требованиям по напряжению, т.к. $400 \text{ В} > 126 \text{ В}$, но не удовлетворяет им по току: $0,4 \text{ А} < 2,5 \text{ А}$.

Диод Д242 наоборот, удовлетворяет требованиям по току $5 \text{ А} > 2,5 \text{ А}$, но не удовлетворяет им по напряжению: $100 \text{ В} < 126 \text{ В}$.

4) Определяем необходимое напряжение вторичной обмотки трансформатора:

$$U_2 = U_d / 0,45 = 40 / 0,45 = 90 \text{ В}$$

При выпрямлении тока, значение которого превышает максимально допустимое $I_{\text{доп}}$, для одного диода, прибегают к параллельному включению однотипных диодов. При помощи этом токи диодов определяются их сопротивлениями в прямом

направлении. Для выравнивания этих токов последовательно с диодами включают добавочные резисторы R_d (рисунок 6.1) с одинаковыми сопротивлениями, превышающими в 5-10 раз сопротивление диода в прямом направлении.

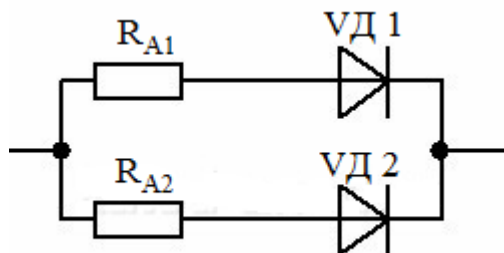


Рисунок 6.1 – Однополупериодный выпрямитель

При выпрямлении напряжения, превышающего допустимое значение U_{OBR} для одного диода, рекомендуется последовательное включение однотипных диодов (рисунок 6.2). С учетом того, что обратные сопротивления даже у однотипных диодов имеют некоторый разброс в значениях, для выравнивания обратных напряжений на диодах параллельного им включают шунтирующие резисторы $R_{ш}$.

Обычно $R_{ш}=(0,1 \div 0,2)R_{OBR}$.

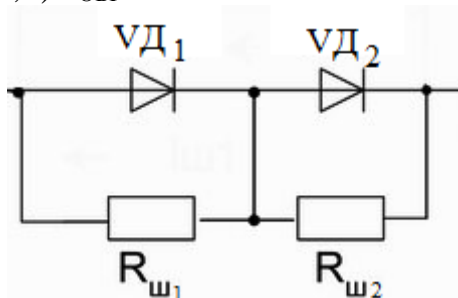


Рисунок 6.2 – Однополупериодный выпрямитель

Пример 2. Для питания постоянным током потребителя мощность $P_d=250$ Вт при напряжении $U_d=100$ В необходимо собрать схему двухполупериодного однофазного выпрямителя с выводом средней точки трансформатора, используя стандартные диоды Д243Б с параметрами $I_{доп}=2$ А, $U_{OBR}=200$ В.

Решение:

1) Определяем ток потребителя

$$I_d = P_d / U_d = 250 / 100 = 2,5 \text{ А}$$

2) Определяем напряжение, действующее на диод в непроводящий период. Для двухполупериодного выпрямителя $U_B = 3,14 U_d$. Следовательно,

$$U_B = 3,14 \cdot 100 = 314 \text{ В}$$

3) Проверяем диод по параметрам $I_{доп}$ и U_{OBR} . Для рассматриваемой схемы диод должен удовлетворять условиям:

$$U_{OBR} \geq U_B,$$

$$I_{доп} \geq I_d.$$

Первое условие не соблюдается, т.к. $200 < 314$, т.е. $U_{OBR} < U_B$, второе условие выполняется, т.к. $0,5I_d = 0,5 \cdot 2,5 = 1,25$ и $1,25 < 2$ А.

4) Составим схему выпрямителя (рисунок 7). Чтобы выполнить условие $U_{OBR} > U_B$, необходимо два диода соединить последовательно. Тогда:

$$U_{OBR} = 200 \cdot 2 = 400 > 314 \text{ В.}$$

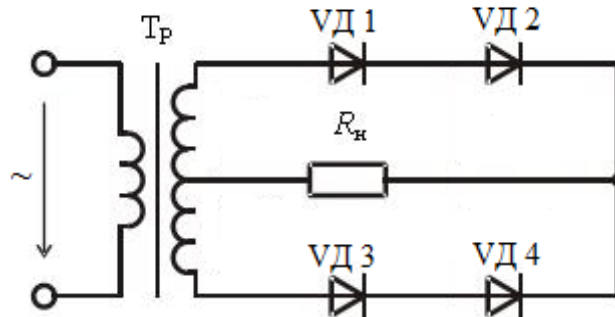


Рисунок 7 – Двухполупериодный однофазный выпрямитель

Пример 3. Составить схему трехфазного выпрямителя с нейтральным выводом, используя стандартные диоды Д215 с параметрами $I_{доп} = 5$ А, $U_{OBR} = 200$ В. Мощность потребителя $P_d = 1200$ Вт при напряжении питания $U_d = 60$ В.

Решение:

1) Определяем ток потребителя

$$I_d = P_d / U_d = 1200 / 60 = 20 \text{ А}$$

2) Определяем напряжение, действующее на диод в непроводящий период. Для двухполупериодного выпрямителя $U_B = 2,1 U_d$. Следовательно,

$$U_B = 2,1 \cdot 60 = 126 \text{ В}$$

3) Проверяем диод по параметрам $I_{доп}$ и U_{OBR} . Для данной схемы диод должен удовлетворять условиям:

$$U_{OBR} > U_B,$$

$$I_{доп} > 0,33 I_d.$$

т.е. $I_{доп} < 0,33 I_d$.

4) Составим схему выпрямителя (рисунок 8). Чтобы выполнить условие $I_{доп} > 0,33 I_d$, необходимо два диода соединить параллельно. Тогда:

$$2 \cdot 5 = 10 > 6,7 \text{ А.}$$

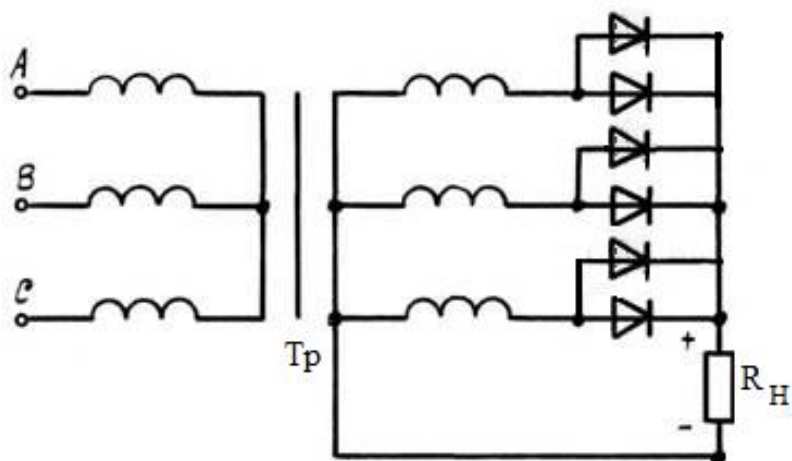


Рисунок 8 - Трехфазный выпрямитель с нейтральным выводом

2 Порядок выполнения работы

2.1 Изучить краткие теоретические сведения п.1.

2.2 В соответствии с таблицами 3, 4, 5, 6, 7 и вариантом, указанным преподавателем, определить ток потребителя и напряжение, действующее на диод в непроводящий период. Пользуясь формулами (1), (2).

Варианты заданий

Вариант 1-6

Составить схему трехфазного выпрямителя на трех диодах (таблица 3). Пояснить порядок составления схемы. Начертить схему выпрямителя.

Таблица 3 – Данные для расчета, вариант 1-6

Номер варианта	Тип диода	Параметры диода		Данные варианты	
		$I_{доп}, A$	$U_{обр}, B$	$P_d, Вт$	U_d, B
1	Д303	3	150	300	100
2	Д242	5	100	800	80
3	Д205	0,4	400	300	300
4	Д222	0,4	600	400	200
5	Д218	0,1	1000	200	400
6	Д243Б	2	200	600	150

Вариант 7-11

Составить схему мостового выпрямителя определить допустимую мощность потребителя по заданному значению U_d , использовать стандартные диоды (таблица 4).

Таблица 4 – Данные для расчета, вариант 7-11

Номер варианта	Тип диода	Параметры диода		Данные варианта
		$I_{доп}, A$	$U_{обр}, B$	
7	Д214А	10	100	80
8	Д215Б	2	200	180
9	Д224	5	50	40
10	Д232	10	400	300
11	Д211	0,1	600	300

Вариант 12-16

Составить схему двух и двухполупериодного выпрямителя (таблица 5). Пояснить порядок составления схемы для диоды с приведенными параметрам. Начертить схему выпрямителя.

Таблица 5 – Данные для расчета, вариант 12-16

Номер варианта	Тип диода	Параметры диода		Данные варианта	
		$I_{\text{ДОП}}, \text{A}$	$U_{\text{ОБР}}, \text{B}$	$P_d, \text{Bт}$	U_d, B
12	Д207	0,1	200	60	20
13	Д214А	10	100	50	800
14	Д209	0,1	400	100	30
15	Д232	10	400	200	1000
16	КД202А	3	50	15	120

Вариант 17-21

Двухполупериодный выпрямитель должен питать потребитель постоянным током. По данным таблицы 6, выбрать один из тех типов полупроводниковых диодов для схемы выпрямителя пояснить свой выбор. Начертить схему выпрямителя.

Таблица 6 – Данные для расчета, вариант 17-21

Номер варианта	Тип диода	Параметры диода		Данные варианта	
		$I_{\text{ДОП}}, \text{A}$	$U_{\text{ОБР}}, \text{B}$	$P_d, \text{Bт}$	U_d, B
17	Д244Б	2	50	150	20
	Д214	5	100		
	Д243Б	2	200		
18	Д243А	10	200	400	80
	Д226	0,3	400		
	Д231	10	300		
19	Д242А	10	100	150	50
	Д222	0,4	600		
	Д215Б	2	200		
20	Д7Г	0,3	200	20	150
	Д217	0,1	800		
	Д242Б	2	100		
21	Д215А	10	200	800	120
	Д231	10	300		
	Д234Б	5	600		

Вариант 22-31

Составить схему мостового выпрямителя (по данным таблицы 7). Пояснить порядок составления схемы. Начертить схемы выпрямителя.

Таблица 7 – Данные для расчета, вариант 22-31

Номер Варианта	Тип диода	Параметры диода		Данные варианта	
		$I_{доп}, A$	$U_{обр}, B$	$P_d, Вт$	U_d, B
22	Д7Г	0,3	200	80	100
23	Д224	5	50	200	50
24	Д217	0,1	800	150	500
25	Д305	6	50	300	20
26	Д214	5	100	600	80
27	Д207	0,1	200	30	100
28	Д302	1	200	250	150
29	Д243Б	2	200	300	200
30	Д221	0,4	400	250	200
31	Д233Б	5	500	500	400

2.3 Ответить на контрольные вопросы письменно.

2.4 Сделать вывод по работе.

3 Содержание отчёта

3.1 Название.

3.2 Цель работы.

3.3 Номер варианта.

3.4 Данные для расчета: в зависимости от варианта из таблиц 3-7.

3.5 Формулы с расчётами.

3.6 Схема электрической цепи.

3.7 Ответы на контрольные вопросы.

3.8 Вывод по работе

4 Контрольные вопросы и задания

4.1 Укажите, зачем при последовательном соединении диодов их нужно шунтировать резисторами?

4.2 Укажите, зачем при параллельном соединении диодов последовательно ними включают резисторы?

4.3 Определите, какова полярность включения светодиода?

4.4 Перечислите параметры стабилитрона.

4.5 Перечислите примеры применения стабилитронов.

Раздел контроля знаний

Перечень тем к входному контролю

Математика

Алгебра и геометрия

- Числа и вычисления
- Выражения и их преобразования
- Уравнения и неравенства
- Координаты и функции
- Геометрические фигуры и их свойства
- Геометрические величины

Физика

Электродинамика

- Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда.
- Взаимодействие точечных зарядов. Закон Кулона.
- Электрическое поле. Напряженность электрического поля. Поле точечного заряда. Однородное электрическое поле. Линии напряженности электростатического поля.
- Работа сил электрического поля. Потенциал электрического поля точечного заряда. Разность потенциалов. Напряжение. Связь между напряжением и напряженностью однородного электростатического поля.
- Принцип суперпозиции электростатических полей.
- Емкость плоского конденсатора.
- Энергия электростатического поля конденсатора.
- Постоянный электрический ток. Источники электрического тока. Сила и направление электрического тока.
- Закон Ома для однородного участка электрической цепи. Электрическое сопротивление. Удельное сопротивление. Последовательное и параллельное соединение проводников.
- Электродвижущая сила источника тока. Закон Ома для полной электрической цепи.
- Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля-Ленца. Коэффициент полезного действия источника тока.
- Постоянные магниты. Взаимодействие магнитов. Магнитное поле.
- Действие магнитного поля на проводник с током. Закон Ампера. Индукция магнитного поля. Графическое изображение магнитных полей. Принцип суперпозиции магнитных полей.
- Движение заряженных частиц в магнитном поле. Сила Лоренца.
- Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индуктивной индукции. Правило Ленца.
- Явление самоиндукции. Индуктивность.
- Энергия магнитного поля катушки с током.
- Колебательный контур. Свободные электромагнитные колебания в контуре. Формула Томсона. Превращения энергии в колебательном контуре.
- Электромагнитные волны и их свойства. Скорость распространения электромагнитных волн.

Перечень вопросов к тематическому контролю №1

1. Перечислите из каких элементов состоит молекула вещества?
2. Дайте определение электрическая цепь?
3. Сформулируйте принцип супер позиции.
4. Дайте определение диэлектрическая проницаемость?
5. Дайте краткую характеристику проводникам
6. Запишите чему равны работа и мощность электрического тока и в каких единицах они выражаются?
7. Сформулируйте закон Ома для замкнутой электрической цепи и для ее участка.
8. Сформулируйте закон Джоуля-Ленца.
9. Сформулируйте первый закон Кирхгофа.
10. Назовите формулу вычисления емкости плоского конденсатора?
11. Запишите как вычислить общую емкость конденсаторов при параллельном соединении, при последовательном соединении?
12. Поясните состояние электрической цепи в режимах холостого хода и короткого замыкания.
13. Сформулируйте и поясните закон Кулона.
14. Запишите чему равна напряженность электрического поля внутри проводника?
15. Поясните порядок расчета сложной электрической цепи с применением законов Кирхгофа.
16. Сформулируйте закон сохранения заряда.
17. Укажите как надо соединить конденсаторы, чтобы их общая емкость увеличилась? Уменьшилась?
18. Запишите какое соединение резисторов называется последовательным? Параллельным? Смешанным?
19. Сформулируйте понятия разности потенциалов, а так же единицу измерения?
20. Укажите в каких единицах выражают ЭДС, напряжение и ток?
21. Запишите общее сопротивление цепи со смешанным соединением резисторов?
22. Дайте определение ветви, узла и контура электрической цепи?
23. Перечислите параметры от чего зависит сопротивление металлического проводника?
24. Объясните как устроен конденсатор?
25. Изобразите как графически изображается электрическое поле?
26. Поясните назначение плавких предохранителей. В чем особенность автоматических предохранителей?
27. Сформулируйте второй закон Кирхгофа.
28. Приведите примеры проводников и диэлектриков?
29. Поясните работу электрической цепи в нагрузочном режиме. Что такое номинальный режим? Какой режим работы электрической цепи называется согласованным?

Перечень вопросов к тематическому контролю №2

1. Дайте определение понятиям «периода», «частота», «угловая частота».
2. Запишите формулу КПД трансформатора?
3. Опишите порядок расчета цепей переменного тока. В чем преимущества использования комплексных чисел для расчета цепей переменного тока?
4. Запишите какое соотношение между фазными и линейными напряжениями при соединении «треугольником»?
5. Перечислите недостатки однофазного асинхронного электродвигателя.
6. Опишите как осуществляется реверсирование трехфазного асинхронного электродвигателя?
7. Поясните назначение трансформатора.
8. Поясните устройство ротора трехфазного асинхронного электродвигателя с фазным ротором.
9. Поясните особенности цепи с активным сопротивлением.
10. Поясните устройство статора синхронной электрической машины.
11. Укажите каково назначение электрических машин переменного тока?
12. Расскажите о назначении и принципе работы сварочного трансформатора.
13. Сформулируйте понятие скольжение?
14. Поясните особенности цепи с активно-индуктивным сопротивлением.
15. Поясните принцип действия трехфазных асинхронных электродвигателей.
16. Понятие процесс получения переменного тока.
17. Объясните суть нейтрального провода?
18. Перечислите особенности асинхронных и синхронных электрических машин переменного тока.
19. Объясните какими способами можно регулировать частоту вращения ротора трехфазного асинхронного электродвигателя?
20. Поясните устройство статора трехфазных асинхронных электродвигателей.
21. Объясните как зависит КПД от номинальной мощности на валу трехфазного асинхронного электродвигателя?
22. Укажите каково соотношение между фазными и линейными токами при соединении «звездой»?
23. Поясните особенности цепи с емкостным сопротивлением.
24. Поясните особенности цепи с активно-емкостным сопротивлением.
25. Дайте определения понятиям «максимальное», «мгновенное» и «действующее» значения переменного тока.
26. Поясните особенности цепи с индуктивным сопротивлением.

Перечень вопросов
к обязательной контрольной работе №1
для специальности «Технология машиностроения»
по учебной дисциплине «Электротехника с основами электроники»

Раздел: «Электротехника»

1. Перечислите из каких элементов состоит молекула вещества?
2. Дайте определение электрическая цепь?
3. Сформулируйте принцип супер позиции.
4. Дайте определение диэлектрическая проницаемость?
5. Дайте краткую характеристику проводникам
6. Запишите чему равны работа и мощность электрического тока и в каких единицах они выражаются?
7. Сформулируйте закон Ома для замкнутой электрической цепи и для ее участка.
8. Сформулируйте первый закон Кирхгофа.
9. Назовите формулу вычисления емкости плоского конденсатора?
10. Запишите как вычислить общую емкость конденсаторов при параллельном соединении, при последовательном соединении?
11. Запишите чему равна напряженность электрического поля внутри проводника?
12. Поясните порядок расчета сложной электрической цепи с применением законов Кирхгофа.
13. Запишите какое соединение резисторов называется последовательным? Параллельным? Смешанным?
14. Сформулируйте понятия разности потенциалов, а так же единицу измерения?
15. Укажите в каких единицах выражают ЭДС, напряжение и ток?
16. Запишите общее сопротивление цепи со смешанным соединением резисторов?
17. Дайте определение ветви, узла и контура электрической цепи?
18. Перечислите параметры от чего зависит сопротивление металлического проводника?
19. Объясните как устроен конденсатор?
20. Изобразите как графически изображается электрическое поле?
21. Поясните назначение плавких предохранителей. В чем особенность автоматических предохранителей?
22. Сформулируйте второй закон Кирхгофа.
23. Приведите примеры проводников и диэлектриков?
24. Поясните работу электрической цепи в нагрузочном режиме. Что такое номинальный режим? Какой режим работы электрической цепи называется согласованным?

Преподаватель

Д.В. Цепелев

Перечень вопросов
к обязательной контрольной работе №2
для специальности «Технология машиностроения»
по учебной дисциплине «Электротехника с основами электроники»

Раздел: «Основы электроники»

1. Запишите формулу КПД трансформатора?
2. Опишите порядок расчета цепей переменного тока. В чем преимущества использования комплексных чисел для расчета цепей переменного тока?
3. Запишите какое соотношение между фазными и линейными напряжениями при соединении «треугольником»?
4. Перечислите недостатки однофазного асинхронного электродвигателя.
5. Опишите как осуществляется реверсирование трехфазного асинхронного электродвигателя?
6. Поясните назначение трансформатора.
7. Поясните устройство ротора трехфазного асинхронного электродвигателя с фазным ротором.
8. Поясните особенности цепи с активным сопротивлением.
9. Поясните устройство статора синхронной электрической машины.
10. Поясните скоростные характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя.
11. Объясните для чего применяются автотрансформаторы? Поясните преимущества автотрансформатора по сравнению с обычным трансформатором такой же мощности.
12. Укажите каково назначение электрических машин переменного тока?
13. Расскажите о назначении и принципе работы сварочного трансформатора.
14. Сформулируйте понятие скольжение?
15. Поясните особенности цепи с активно-индуктивным сопротивлением.
16. Поясните принцип действия трехфазных асинхронных электродвигателей.
17. Понятие процесс получения переменного тока.
18. Объясните суть нейтрального провода?
19. Опишите как осуществляется пуск при пониженном напряжении трехфазных асинхронных электродвигателей?
20. Перечислите особенности асинхронных и синхронных электрических машин переменного тока.
21. Объясните как осуществляется возбуждение синхронного генератора?
22. Объясните какими способами можно регулировать частоту вращения ротора трехфазного асинхронного электродвигателя?
23. Поясните устройство статора трехфазных асинхронных электродвигателей.
24. Укажите каково соотношение между фазными и линейными токами при соединении «звездой»?
25. Дайте определения понятиям «максимальное», «мгновенное» и «действующее» значения переменного тока.