МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:
Проректор по учебной работе
_____ Е.И. Луковникова
«_____» _____ 201__ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОНИКА И ЭЛЕКТРОПРИВОД

Б1.Б.19.09

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ

23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства

СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ

Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование

Квалификация выпускника: инженер

СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ **Стр.**

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ …..…… 3

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ …….…….. 4

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения……...…… 4

3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости …….…… 5

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ …….…… 5

4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий …… 5

4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам ...…… 10

4.3 Лабораторные работы…… 84

4.4 Семинары / практические занятия…. …….…… 84

4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат…….…… 84

5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ …… 86

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ 86

7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ…… 86

8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ …… 87

9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ…… 88

9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ/ семинаров / практических работ …….…… 88

9.2. Методические указания по выполнению курсового проекта (курсовой работы), контрольной работы, РГР, реферата ……... 105

10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ ……...…… 108

11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ ……...…… 108

Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине…… 109

Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины ……. 129

Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе …..…… 130

Приложение 4. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости по дисциплине……

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к производственно-технологическому виду профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

Цель дисциплины

Формирование знаний законов электротехники, электротехнической терминологии и символики; знание свойств и физических процессов, происходящих в электрических машинах; элементной базы электроники, применяемой в преобразовательных устройствах для питания электроприводов подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования.

Задачи дисциплины

Обеспечить теоретическую и практическую подготовку обучающихся в области электротехники и электроники для их совместного участия в составе коллектива исполнителей по техническому обеспечению разработки и эксплуатации электрических частей и механизмов в подъемно-транспортных, строительных, дорожных машинах и оборудовании.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
1	2	3
ОК-1	Способность к абстрактному мышлению, анализу, синтезу	**знать:** – основные методы анализа и расчета линейных и нелинейных электрических и магнитных цепей; **уметь:** – составлять математические модели для определения параметров электрических цепей; **владеть:** – навыками экспериментального определения характеристик и параметров электрических машин и электронных приборов и их компьютерного исследования по математическим моделям
ПК-10	Способность разрабатывать технологическую документацию для производства, модернизации, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта наземных транспортно-технологических средств и их технологического и оборудования	**знать:** – устройство и принцип действия электрических машин; **уметь:** – по заданным параметрам выбирать электрические и электронные аппараты для технического обслуживания и ремонта наземных ТТС и оборудования **владеть:** – методами расчета для выбора типа электродвигателей, аппаратов управления и защиты электрооборудования

ПСК-2,7	Способность разрабатывать технологическую документацию для производства, модернизации, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта средств механизации и автоматизации подъемно-транспортных, строительных и дорожных работ	**знать:** – параметры, характеристики основных типов электрических машин; **уметь:** – по заданным параметрам и характеристикам рассчитывать электрические цепи; **владеть:** – навыками сборки электрических схем

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.Б.19.09 Электротехника, электроника и электропривод относится к базовым дисциплинам.

Дисциплина Электротехника, электроника и электропривод базируется на знаниях, полученных при изучении таких учебных дисциплин, как: математика, физика, химия, материаловедение.

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, Электротехника, электроника и электропривод представляет основу для изучения дисциплин: Электрооборудование подъемно-транспортных, строительных, дорожных средств и оборудования, Испытания подъемно-транспортных, строительных, дорожных средств и оборудования.

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации специалист

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

Форма обучения	*Курс*	*Семестр*	*Трудоемкость дисциплины в часах*						*Курсовая работа (проект), контрольная работа, реферат, РГР*	*Вид промежуточной аттестации (экзамен, зачет)*
			Всего часов (с экз.)	*Аудиторных часов*	*Лекции*	*Лабораторные работы*	*Семинары Практические занятия*	*Самостоятельная работа*		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Очная	3	5	144	68	34	34	-	40	2кр	экзамен
Заочная	3	-	144	10	4	6	-	125	2кр	экзамен
Заочная (ускоренное обучение)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Очно-заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости

Вид учебных занятий	*Трудо-емкость (час.)*	*в т.ч. в интерактивной, активной, иннова-ционной формах, (час.)*	*Распределение по семестрам, час*
			4
1	2	3	4
I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)	68	-	68
Лекции (Лк)	34	-	34
Лабораторные работы (ЛР)	34	-	34
Контрольная работа	+	-	+
Групповые (индивидуальные) консультации	+	-	+
II.Самостоятельная работа обучающихся (СР)	40	-	40
Подготовка к лабораторным работам	15	-	15
Подготовка к экзамену в течение семестра	10	-	10
Выполнение контрольной работы	15	-	15
III. Промежуточная аттестация экзамен	36	-	36
Общая трудоемкость дисциплины, час.	144	-	144
зач. ед.	4	-	4

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий - для очной формы обучения:

№ раз-дела и темы	*Наименование раздела и тема дисциплины*	*Трудоем-кость, (час.)*	*Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)*		
			учебные занятия		*самостоя тельная работа обучаю-щихся*
			лекции	*лабораторные работы*	
1	2	3	4	5	6
1.	**Электрические и магнитные цепи**	**35**	**8**	**15**	**12**
1.1.	Электрические цепи постоянного тока	10	2	5	3
1.2.	Электрические цепи переменного тока	10	2	5	3
1.3.	Трехфазные электрические цепи	10	2	5	3
1.4.	Магнитные цепи	5	2	-	3
2.	**Трансформаторы**	**10**	**2**	**4**	**4**
2.1.	Трансформаторы	10	2	4	4
3.	**Машины постоянного тока**	**14**	**4**	**4**	**6**
3.1.	Устройство и принцип	9	2	4	3

	действия машин постоянного тока. Принцип действия генератора. Принцип действия двигателя.				
3.2.	Электродвижущая сила якоря и электромагнитный момент. Магнитная цепь машины постоянного тока. Реакция якоря. Коммутация в машинах постоянного тока. Схемы включения машин постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения.	5	2	-	3
4.	**Асинхронные машины**	**15**	**6**	**4**	**5**
4.1.	Устройство трехфазной асинхронной машины. Получение вращающегося магнитного поля. Режимы работы трехфазной асинхронной машины. Режим двигателя. Режим генератора. Режим электромагнитного тормоза	8	2	4	2
4.2.	Электромагнитный момент асинхронной машины. Зависимость электромагнитного момента от скольжения. Механическая характеристика асинхронного двигателя. Пуск в ход асинхронного двигателя. Использование двигателей с улучшенными пусковыми свойствами	3	2	-	1
4.3.	Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Тормозные режимы работы асинхронных машин. Коэффициент мощности асинхронного двигателя и его зависимость от нагрузки на валу двигателя.	4	2	-	2
5.	**Синхронные машины**	**7**	**4**	**-**	**3**
5.1.	Устройство и принцип действия синхронных машин. Принцип работы и ЭДС синхронного генератора. Принцип работы синхронного двигателя. Краткая классификация	3	2	-	1

	синхронных машин. Схема замещения синхронного генератора. Угловые характеристики синхронного генератора. Основные характеристики синхронного генератора. Параллельная работа синхронных генераторов.				
5.2.	Схема замещения и уравнение электрического равновесия цепи статора синхронного двигателя. Угловая и механическая характеристика синхронного двигателя. Рабочие характеристики синхронного двигателя. Способы пуска в ход синхронного двигателя. Пуск в ход с помощью разгонного двигателя. Асинхронный способ пуска. Частотный пуск. Механическая характеристика. Частотное торможение.	4	2	-	2
6.	**Основы электропривода**	**7**	**3**	**-**	**4**
6.1.	Общие сведения об электроприводе. Условия, определяющие выбор типа электродвигателя. Управление электроприводами	7	3	-	4
7.	**Основы электроники**	**20**	**7**	**7**	**6**
7.1.	Классификация полупроводниковых приборов. Полупроводниковые резисторы. Полупроводниковые диоды. Биполярные транзисторы. Полевые транзисторы. Тиристоры	6	2	3	1
7.2.	Неуправляемые и управляемые выпрямители	8	2	4	2
7.3.	Усилители электрических сигналов. Усилители на биполярных транзисторах	4	2	-	2
7.4.	Импульсная и цифровая техника	2	1	-	1
	ИТОГО	**108**	**34**	**34**	**40**

- для заочной формы обучения:

№ раз-дела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоем-кость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)		
			учебные занятия		самостоятельная работа обучаю-щихся*
			лекции	лабораторные работы	
1	2	3	4	5	6
1.	**Электрические и магнитные цепи**	**29**	**1**	**-**	**28**
1.1.	Электрические цепи постоянного тока	7,25	0,25	-	7
1.2.	Электрические цепи переменного тока	7,25	0,25	-	7
1.3.	Трехфазные электрические цепи	7,25	0,25	-	7
1.4.	Магнитные цепи	7,25	0,25	-	7
2.	**Трансформаторы**	**10,25**	**0,25**	**3**	**7**
2.1.	Трансформаторы	10,25	0,25	3	7
3.	**Машины постоянного тока**	**14,5**	**0,5**	**-**	**14**
3.1.	Устройство и принцип действия машин постоянного тока. Принцип действия генератора. Принцип действия двигателя.	7,25	0,25	-	7
3.2.	Электродвижущая сила якоря и электромагнитный момент. Магнитная цепь машины постоянного тока. Реакция якоря. Коммутация в машинах постоянного тока. Схемы включения машин постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения.	7,25	0,25	-	7
4.	**Асинхронные машины**	**21,75**	**0,75**	**-**	**21**
4.1.	Устройство трехфазной асинхронной машины. Получение вращающегося магнитного поля. Режимы работы трехфазной асинхронной машины. Режим двигателя. Режим генератора. Режим электромагнитного тормоза	7,25	0,25	-	7
4.2.	Электромагнитный момент асинхронной машины. Зависимость электромагнитного момента от скольжения. Механическая	7,25	0,25	-	7

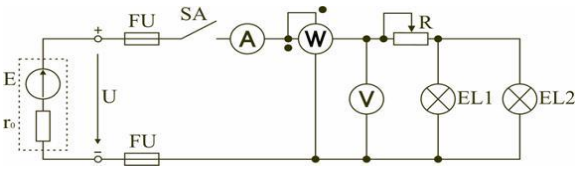
	характеристика асинхронного двигателя. Пуск в ход асинхронного двигателя. Использование двигателей с улучшенными пусковыми свойствами				
4.3.	Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Тормозные режимы работы асинхронных машин. Коэффициент мощности асинхронного двигателя и его зависимость от нагрузки на валу двигателя.	7,25	0,25	-	7
5.	**Синхронные машины**	**14,5**	**0,5**	**-**	**14**
5.1.	Устройство и принцип действия синхронных машин. Принцип работы и ЭДС синхронного генератора. Принцип работы синхронного двигателя. Краткая классификация синхронных машин. Схема замещения синхронного генератора. Угловые характеристики синхронного генератора. Основные характеристики синхронного генератора. Параллельная работа синхронных генераторов.	7,25	0,25	-	7
5.2.	Схема замещения и уравнение электрического равновесия цепи статора синхронного двигателя. Угловая и механическая характеристика синхронного двигателя. Рабочие характеристики синхронного двигателя. Способы пуска в ход синхронного двигателя. Пуск в ход с помощью разгонного двигателя. Асинхронный способ пуска. Частотный пуск. Механическая характеристика. Частотное торможение.	7,25	0,25	-	7
6.	**Основы электропривода**	**19,6**	**0,6**	**-**	**19**
6.1.	Общие сведения об электроприводе. Условия,	19,6	0,6	-	19

	определяющие выбор типа электродвигателя. Управление электроприводами				
7.	**Основы электроники**	**25,4**	**0,4**	**3**	**22**
7.1.	Классификация полупроводниковых приборов. Полупроводниковые резисторы. Полупроводниковые диоды. Биполярные транзисторы. Полевые транзисторы. Тиристоры	6,1	0,1	-	6
7.2.	Неуправляемые и управляемые выпрямители	9,1	0,1	3	6
7.3.	Усилители электрических сигналов. Усилители на биполярных транзисторах	5,1	0,1	-	5
7.4.	Импульсная и цифровая техника	5,1	0,1	-	5
	ИТОГО	**135**	**4**	**6**	**125**

4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

Раздел 1. Электрические и магнитные цепи
Тема 1.1. Электрические цепи постоянного тока

1.1. Электрическая цепь и ее элементы
В электротехнике рассматривается устройство и принцип действия основных электротехнических устройств, используемых в быту и промышленности. Чтобы электротехническое устройство работало, должна быть создана электрическая цепь, задача которой передать электрическую энергию этому устройству и обеспечить ему требуемый режим работы.
Электрической цепью называется совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об электрическом токе, ЭДС (электродвижущая сила) и электрическом напряжении.
Для анализа и расчета электрическая цепь графически представляется в виде электрической схемы, содержащей условные обозначения ее элементов и способы их соединения. Электрическая схема простейшей электрической цепи, обеспечивающей работу осветительной аппаратуры, представлена на рис. 1.1.
Все устройства и объекты, входящие в состав электрической цепи, могут быть разделены на три группы:
1) Источники электрической энергии (питания).
Общим свойством всех источников питания является преобразование какого-либо вида энергии в электрическую. Источники, в которых происходит преобразование неэлектрической энергии в электрическую, называются первичными источниками. Вторичные источники – это такие источники, у которых и на входе, и на выходе – электрическая энергия (например, выпрямительные устройства).
2) Потребители электрической энергии.
Общим свойством всех потребителей является преобразование электроэнергии в другие виды энергии (например, нагревательный прибор). Иногда потребители называют нагрузкой.
3) Вспомогательные элементы цепи: соединительные провода, коммутационная аппаратура, аппаратура защиты, измерительные приборы и т.д., без которых реальная цепь не работает.

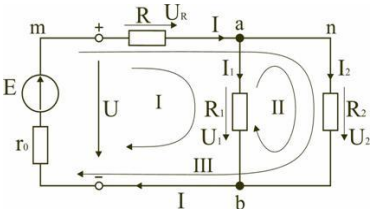


Все элементы цепи охвачены одним электромагнитным процессом. В электрической схеме на рис. 1.1 электрическая энергия от источника ЭДС E, обладающего внутренним сопротивлением r_0, с помощью вспомогательных элементов цепи передаются через регулировочный реостат R к потребителям (нагрузке): электрическим лампочкам EL_1 и EL_2.

1.2. Основные понятия и определения для электрической цепи

Для расчета и анализа реальная электрическая цепь представляется графически в виде расчетной электрической схемы (схемы замещения). В этой схеме реальные элементы цепи изображаются условными обозначениями, причем вспомогательные элементы цепи обычно не изображаются, а если сопротивление соединительных проводов намного меньше сопротивления других элементов цепи, его не учитывают. Источник питания показывается как источник ЭДС E с внутренним сопротивлением r0, реальные потребители электрической энергии постоянного тока заменяются их электрическими параметрами: активными сопротивлениями R1, R2,…,Rn. С помощью сопротивления R учитывают способность реального элемента цепи необратимо преобразовывать электроэнергию в другие виды, например, тепловую или лучистую.

При этих условиях схема на рис. 1.1 может быть представлена в виде расчетной электрической схемы (рис. 1.2), в которой есть источник питания с ЭДС E и внутренним сопротивлением r0, а потребители электрической энергии: регулировочный реостат R, электрические лампочки EL1 и EL2 заменены активными сопротивлениями R,R1 и R2.



Источник ЭДС на электрической схеме (рис. 1.2) может быть заменен источником напряжения U, причем условное положительное направление напряжения U источника задается противоположным направлению ЭДС.

При расчете в схеме электрической цепи выделяют несколько основных элементов.

Ветвь электрической цепи (схемы) – участок цепи с одним и тем же током. Ветвь может состоять из одного или нескольких последовательно соединенных элементов. Схема на рис. 1.2 имеет три ветви: ветвь bma, в которую включены элементы r_0, E, R и в которой возникает ток I; ветвь ab с элементом R_1 и током I_1; ветвь anb с элементом R_2 и током I_2.

Узел электрической цепи (схемы) – место соединения трех и более ветвей. В схеме на рис. 1.2 – два узла a и b. Ветви, присоединенные к одной паре узлов, называют параллельными. Сопротивления R_1 и R_2 (рис. 1.2) находятся в параллельных ветвях.

Контур – любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям. В схеме на рис. 1.2 можно выделить три контура: I – bmab; II – anba; III – manbm, на схеме стрелкой показывают направление обхода контура.

Условные положительные направления ЭДС источников питания, токов во всех ветвях, напряжений между узлами и на зажимах элементов цепи необходимо задать для правильной записи уравнений, описывающих процессы в электрической цепи или ее элементах. На схеме (рис. 1.2) стрелками укажем положительные направления ЭДС, напряжений и токов:

а) для ЭДС источников – произвольно, но при этом следует учитывать, что полюс (зажим источника), к которому направлена стрелка, имеет более высокий потенциал по отношению к другому полюсу;

б) для токов в ветвях, содержащих источники ЭДС – совпадающими с направлением ЭДС; во всех других ветвях произвольно;

в) для напряжений – совпадающими с направлением тока в ветви или элемента цепи.

Все электрические цепи делятся на линейные и нелинейные.

Элемент электрической цепи, параметры которого (сопротивление и др.) не зависят от тока в нем, называют линейным, например электропечь.

Нелинейный элемент, например лампа накаливания, имеет сопротивление, величина которого увеличивается при повышении напряжения, а следовательно и тока, подводимого к лампочке.
Следовательно, в линейной электрической цепи все элементы – линейные, а нелинейной называют электрическую цепь, содержащую хотя бы один нелинейный элемент.

1.3. Основные законы цепей постоянного тока

Расчет и анализ электрических цепей производится с использованием закона Ома, первого и второго законов Кирхгофа. На основе этих законов устанавливается взаимосвязь между значениями токов, напряжений, ЭДС всей электрической цепи и отдельных ее участков и параметрами элементов, входящих в состав этой цепи.

Закон Ома для участка цепи

Соотношение между током I, напряжением U_R и сопротивлением R участка ab электрической цепи (рис. 1.3) выражается законом Ома

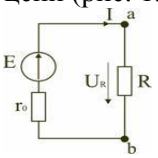


Рис. 1.3

$I = \frac{U_R}{R}$ или $U_R = R\,I$.

В этом случае UR=RI – называют напряжением или падением напряжения на резисторе R, а $I = \frac{U_R}{R}$ – током в резисторе R.

При расчете электрических цепей иногда удобнее пользоваться не сопротивлением R, а величиной обратной сопротивлению, т.е. электрической проводимостью:

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

В этом случае закон Ома для участка цепи запишется в виде:

$I = U\,g$.

Закон Ома для всей цепи

Этот закон определяет зависимость между ЭДС E источника питания с внутренним сопротивлением r0 (рис. 1.3), током I электрической цепи и общим эквивалентным сопротивлением RЭ=r0+R всей цеп и $I = \frac{E}{R_Э} = \frac{E}{r_0 + R}$

Сложная электрическая цепь содержит, как правило, несколько ветвей, в которые могут быть включены свои источники питания и режим ее работы не может быть описан только законом Ома. Но это можно выполнить на основании первого и второго законов Кирхгофа, являющихся следствием закона сохранения энергии.

Первый закон Кирхгофа

В любом узле электрической цепи алгебраическая сумма токов равна нулю

$$\sum_{K=1}^{m} I_K = 0,$$

где m – число ветвей подключенных к узлу.

При записи уравнений по первому закону Кирхгофа токи, направленные к узлу, берут со знаком «плюс», а токи, направленные от узла – со знаком «минус». Например, для узла a (см. рис. 1.2)I−I1−I2=0.

Второй закон Кирхгофа

В любом замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений на всех его участках

$$\sum_{K=1}^{n} E_K = \sum_{K=1}^{m} R_K I_K = \sum_{K=1}^{m} U_K,$$

где n – число источников ЭДС в контуре;
m – число элементов с сопротивлением Rk в контуре;
Uk=RkIk – напряжение или падение напряжения на k-м элементе контура.

Для схемы (рис. 1.2) запишем уравнение по второму закону Кирхгофа: E=UR+U1.

Если в электрической цепи включены источники напряжений, то второй закон Кирхгофа формулируется в следующем виде: алгебраическая сумма напряжений на всех элементах контру, включая источники ЭДС равна нулю

$$\sum_{K=1}^{m} U_K = 0$$

.

При записи уравнений по второму закону Кирхгофа необходимо:

1) задать условные положительные направления ЭДС, токов и напряжений;

2) выбрать направление обхода контура, для которого записывается уравнение;

3) записать уравнение, пользуясь одной из формулировок второго закона Кирхгофа, причем слагаемые, входящие в уравнение, берут со знаком «плюс», если их условные положительные направления совпадают с обходом контура, и со знаком «минус», если они противоположны.

Запишем уравнения по II закону Кирхгофа для контуров электрической схемы (рис. 1.2):

контур I: E=RI+R1I1+r0I,

контур II: R1I1+R2I2=0,

контур III: E=RI+R2I2+r0I.

В действующей цепи электрическая энергия источника питания преобразуется в другие виды энергии. На участке цепи с сопротивлением R в течение времени t при токе I расходуется электрическая энергия

W=I2Rt.

Скорость преобразования электрической энергии в другие виды представляет электрическую мощность

$P = \frac{W}{t} = I^2R = UI$ Из закона сохранения энергии следует, что мощность источников питания в любой момент времени равна сумме мощностей, расходуемой на всех участках цепи.

$\sum EI = \sum I^2R$.

Это соотношение называют уравнением баланса мощностей. При составлении уравнения баланса мощностей следует учесть, что если действительные направления ЭДС и тока источника совпадают, то источник ЭДС работает в режиме источника питания, и произведение EI подставляют в (1.8) со знаком плюс. Если не совпадают, то источник ЭДС работает в режиме потребителя электрической энергии, и произведение EI подставляют в (1.8) со знаком минус. Для цепи, показанной на рис. 1.2 уравнение баланса мощностей запишется в виде:

EI=I2(r0+R)+I12R1+I22R2.

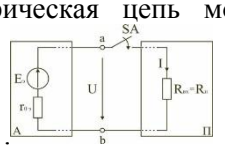
При расчете электрических цепей используются определенные единицы измерения. Электрический ток измеряется в амперах (А), напряжение – в вольтах (В), сопротивление – в омах (Ом), мощность – в ваттах (Вт), электрическая энергия – ватт-час (Вт-час) и проводимость – в сименсах (См)

Кроме основных единиц используют более мелкие и более крупные единицы измерения: миллиампер (1 мА = 10–3 А), килоампер (1 кА = 103 А), милливольт (1 мВ = 10–3 В), киловольт (1 кВ = 103 В), килоом (1 кОм = 103 Ом), мегаом (1 МОм = 106 Ом), киловатт (1 кВт = 103 Вт), киловатт-час (1 кВт-час = 103 ватт-час).

1.6. Режимы работы электрической цепи

При подключении к источнику питания различного количества потребителей или изменения их параметров будут изменяться величины напряжений, токов и мощностей в электрической цепи, от значений которых зависит режим работы цепи и ее элементов.

Реальная электрическая цепь может быть представлена в виде активного и пассивного двухполюсников .



Двухполюсником называют цепь, которая соединяется с внешней относительно нее частью цепи через два вывода a и b – полюса. Активный двухполюсник содержит источники электрической энергии, а пассивный двухполюсник их не содержит. Для расчета цепей с двухполюсниками реальные активные и пассивные элементы цепи представляются схемами замещения. Схема замещения пассивного двухполюсника П представляется в виде его входного сопротивления

$R_{вх} = \frac{U}{I}$.Схема замещения активного двухполюсника А представляется эквивалентным источником с ЭДС $E_э$ и внутренним сопротивлением $r_{0э}$, нагрузкой для которого является входное

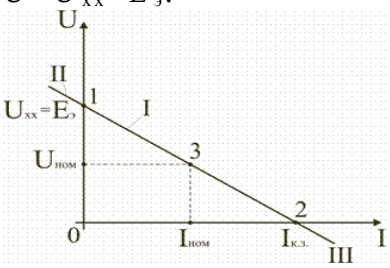
сопротивление пассивного двухполюсника $R_{вх} = R_н$. Режим работы электрической цепи (рис. 1.23) определяется изменениями параметров пассивного двухполюсника, в общем случае величиной сопротивления нагрузки $R_н$. При анализе электрической цепи рассматривают следующие режимы работы: холостого хода, номинальный, короткого замыкания и согласованный. Работа активного двухполюсника под нагрузкой $R_н$ определяется его вольт-амперной (внешней) характеристикой, уравнение которой (1.10) для данной цепи запишется в вид $U = E_э - I r_{0э}$.

Эта вольт-амперная характеристика строится по двум точкам 1 и 2 (рис. 1.24), соответствующим режимам холостого хода и короткого замыкания.

1. Режим холостого хода

В этом режиме с помощью ключа SA нагрузка $R_н$ отключается от источника питания (рис. 1.23). В этом случае ток в нагрузке становится равным нулю, и как следует из соотношения (1.12) напряжение на зажимах ab становится равным ЭДС $E_э$ и называется напряжением холостого хода $U_{хх}$

$U = U_{хх} = E_э$.



2. Режим короткого замыкания

В этом режиме ключ SA в схеме электрической цепи (рис. 1.23) замкнут, а сопротивление Rн=0. В этом случае напряжение U на зажимах ab становится равным нулю, т.к. U=IRн, а уравнение (1.12) вольт-амперной характеристики можно записать в виде

(1.13)

$$I = I_{к.з} = \frac{E_э}{r_{0э}}.$$

Значение тока короткого замыкания Iк.з соответствует т.2 на вольт-амперной характеристике

Анализ этих двух режимов показывает, что при расчете электрических цепей параметры активного двухполюсника Eэ и r0э могут быть определены по результатам режимов холостого хода и короткого замыкания:

Eэ=Uxx; $r_{0э} = \frac{U_{хх}}{I_{к.з}}$.

При изменении тока в пределах $0 \le I \le I_к$ активной двухполюсник (эквивалентный источник) отдает энергию во внешнюю цепь (участок I вольт-амперной характеристики на рис. 1.24). При токеI<0 (участок II) источник получает энергию из внешней цепи, т.е. работает в режиме потребителя электрической энергии. Это произойдет, если к зажимам ab двухполюсника присоединена внешняя цепь с источниками питания. При напряжении U<0 (участок III) резисторы активного двухполюсника потребляют энергию источников из внешней цепи и самого активного двухполюсника.

3. Номинальный режим

Номинальный режим электрической цепи обеспечивает технические параметры как отдельных элементов, так и всей цепи, указанные в технической документации, в справочной литературе или на самом элементе. Для разных электротехнических устройств указывают свои номинальные параметры. Однако три основных параметра указываются практически всегда: номинальное напряжениеUном, номинальная мощность Pном и номинальный ток Iном.

Работа активного двухполюсника под нагрузкой в номинальном режиме определяется уравнением (1.12), записанном для номинальных параметров

(1.15)

Uном=Eэ−Iномr0э.

На вольт-амперной характеристике это уравнение определяется точкой 3 с параметрами Uном и Iном.

4. Согласованный режим

Согласованный режим электрической цепи обеспечивает максимальную передачу активной мощности от источника питания к потребителю. Определим параметры электрической цепи

(рис. 1.23), обеспечивающие получение согласованного режима. При подключении нагрузки Rн к активному двухполюснику (рис. 1.23) в ней возникает ток

$$I = \frac{E_э}{r_{оэ} + R_н}.$$

При этом на нагрузке выделится активная мощность

$$P = I^2 R_н = \frac{E_э^2}{(r_{оэ} + R_н)^2} R_н.$$

Определим соотношение между сопротивлением нагрузки Rн и внутренним сопротивлением r0э эквивалентного источника ЭДС, при котором в сопротивлении нагрузки Rн выделяется максимальная мощность при неизменных значениях Eэ и r0э. С этой целью определим первую производную P по Rн и приравняем ее к нулю:

$$\frac{dP}{dR_н} = \frac{(r_{оэ} + R_н)^2 E^2 - 2(r_{оэ} + R_н) R_н E^2}{(r_{оэ} + R_н)^2} = \frac{E^2}{(r_{оэ} + R_н)^2}\left(r_{оэ}^2 - R_н^2\right) = 0.$$

Так как выражение в знаменателе – конечное, то, отбрасывая не имеющее физического смысла решение Rн=−r0э, получим, что значение сопротивления нагрузки, согласованное с сопротивлением источника Можно найти вторую производную и убедиться в том, что она отрицательна $\left(\frac{d^2P}{dR_н^2} < 0\right)$, поэтому соотношение соответствует максимуму функции P=F(Rн).

Подставив (1.17) в (1.16), получим значение максимальной мощности, которая может выделена в нагрузке Rн $P_{max} = \frac{E_э^2}{4r_{оэ}}$.

Полезная мощность, выделяющаяся в нагрузке, определяется уравнением (1.16). Полная активная мощность, выделяемая активным двухполюсником,

$$P_{полн} = E_э I = \frac{E_э^2}{r_{оэ} + R_н}.$$

Коэффициент полезного действия

(1.19)

$$\eta = \frac{P}{P_{полн}} = \frac{R_н}{r_{оэ} + R_н}.$$

если Rн=r0э, то $\eta = 0{,}5$.

Для мощных электротехнических устройств такое низкое значение КПД недопустимо. Но в электронных устройствах и схемах, где величина P измеряется в милливаттах, с низким КПД можно не считаться, поскольку в этом режиме обеспечивается максимальная передача мощности на нагрузку.

Тема 1.2. Электрические цепи переменного тока

Введение

Большинство потребителей электрической энергии работает на переменном токе. В настоящее время почти вся электрическая энергия вырабатывается в виде энергии переменного тока. Это объясняется преимуществом производства и распределения этой энергии. Переменный ток получают на электростанциях, преобразуя с помощью генераторов механическую энергию в электрическую. Основное преимущество переменного тока по сравнению с постоянным заключается в возможности с помощью трансформаторов повышать или понижать напряжение, с минимальными потерями передавать электрическую энергию на большие расстояния, в трехфазных источниках питания получать сразу два напряжения: линейное и фазное. Кроме того, генераторы и двигатели переменного тока более просты по устройству, надежней в работе и проще в эксплуатации по сравнению с машинами постоянного тока.

В электрических цепях переменного тока наиболее часто используют синусоидальную форму, характеризующуюся тем, что все токи и напряжения являются синусоидальными функциями времени. В генераторах переменного тока получают ЭДС, изменяющуюся во времени по закону синуса, и тем самым обеспечивают наиболее выгодный эксплуатационный режим работы электрических установок. Кроме того, синусоидальная форма тока и напряжения позволяет производить точный расчет электрических цепей с использованием метода комплексных чисел и

приближенный расчет на основе метода векторных диаграмм. При этом для расчета используются законы Ома и Кирхгофа, но записанные в векторной или комплексной форме.

1. Способы представления синусоидальных токов, напряжений, ЭДС

В современной технике широко используют разнообразные по форме переменные токи и напряжения: синусоидальные, прямоугольные, треугольные и др. Значение тока, напряжения, ЭДС в любой момент времени t называется мгновенным значением и обозначается малыми строчными буквами, соответственно

$i = i(t)$; $u = u(t)$; $e = e(t)$.

Токи, напряжения и ЭДС, мгновенные значения которых повторяются через равные промежутки времени, называют периодическими, а наименьший промежуток времени, через который эти повторения происходят, называют периодом T.

Если кривая изменения периодического тока описывается синусоидой, то ток называют синусоидальным. Если кривая отличается от синусоиды, то ток несинусоидальный.

В промышленных масштабах электрическая энергия производится, передается и расходуется потребителями в виде синусоидальных токов, напряжений и ЭДС,

При расчете и анализе электрических цепей применяют несколько способов представления синусоидальных электрических величин.

1.1. Аналитический способ

Для тока $i(t) = Im \sin(\omega t + \psi i)$,

для напряжения $u(t) = Um \sin(\omega t + \psi u)$,

для ЭДС $e(t) = Em \sin(\omega t + \psi e)$,

В уравнениях (2.1 – 2.3) обозначено:

Im, Um, Em – амплитуды тока, напряжения, ЭДС;

значение в скобках – фаза (полная фаза);

ψi, ψu, ψe – начальная фаза тока, напряжения, ЭДС;

ω – циклическая частота, $\omega = 2\pi f$;

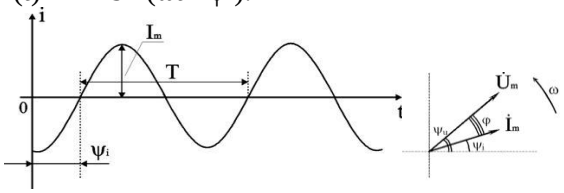
f – частота, $f = 1 / T$; T – период.

Величины i, Im – измеряются в амперах, величины U, Um, e, Em – в вольтах; величина T (период) измеряется в секундах (с); частота f – в герцах (Гц), циклическая частота ω имеет размерность рад/с. Значения начальных фаз ψi, ψu, ψe могут измеряться в радианах или градусах. Величина ψi, ψu, ψe зависит от начала отсчета времени $t = 0$. Положительное значение откладывается влево, отрицательное – вправо.

1.2. Временная диаграмма

Временная диаграмма представляет графическое изображение синусоидальной величины в заданном масштабе в зависимости от времени (рис. 2.1).

$i(t) = Im \sin(\omega t - \psi i)$.



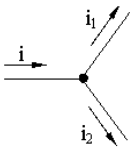
Графически синусоидальные величины изображаются в виде вращающегося вектора Предполагается вращение против часовой стрелки с частотой вращения ω. Величина вектора в заданном масштабе представляет амплитудное значение. Проекция на вертикальную ось есть мгновенное значение величины.

Совокупность векторов, изображающих синусоидальные величины (ток, напряжение, ЭДС) одной и той же частоты называют векторной диаграммой.

Векторные величины отмечаются точкой над соответствующими переменными.

Использование векторных диаграмм позволяет существенно упросить анализ цепей переменного тока, сделать его простым и наглядным.

В основе графоаналитического способа анализа цепей переменного тока лежит построение векторных диаграмм.



i1(t) = Im1 sin(ωt); i2(t) = Im2 sin(ωt + ψ2). i(t) =

Первый закон Кирхгофа выполняется для мгновенных значений токов:

i(t) = i1(t) + i2(t) = Im1 sin(ωt) + Im2 sin(ωt - ψ2) = Im sin(ωt + ψ).

Приравниваем проекции на вертикальную и горизонтальные оси (рис. 2.4):

(2.4) Im sin ψ = Im2 sin ψ2;

(2.5) Im cos ψ = Im2 cos ψ2 + Im1;

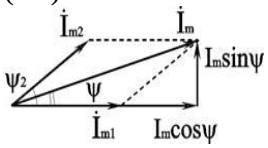


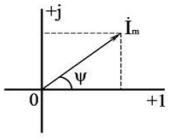
Рис. 2.4

Из равенств (2.4 – 2.5) получаем

$$tg\psi = \frac{I_{m2}\sin\psi_2}{I_{m2}\cos\psi_2 + I_{m1}};$$

$$I_m = \sqrt{I_{m2}^2\sin\psi_2 + (I_{m2}\cos\psi_2 + I_{m1})^2}.$$

1.4. Аналитический метод с использованием комплексных чисел



Синусоидальный ток $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi)$ можно представить комплексным числом $\acute{I}_m$ на комплексной плоскости (рис. 2.5)

$\acute{I}_m = I_m e^{j\psi}$,

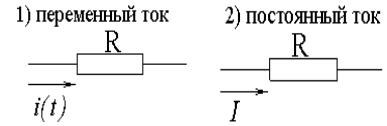
где амплитуда тока I_m – модуль, а угол ψ, являющийся начальной фазой, – аргумент комплексного тока.

Использование комплексной формы представления позволяет заменить геометрические операции над векторами алгебраическими операциями над комплексными числами. В результате этого к анализу цепей переменного тока могут быть применены все методы анализа цепей постоянного тока. Подробнее этот метод будет рассмотрен ниже.

2. Действующее значение переменного тока и напряжения

Для сравнения действий постоянного и переменного токов вводят понятие действующее значение переменного тока. Действующее значение переменного тока численно равно такому постоянному току, при котором за время равное одному периоду в проводнике с сопротивлением R выделяется такое же количество тепловой энергии, как и при переменном токе.

Определим количество энергии, выделяемой за период в проводнике с сопротивлением R для каждого из токов и приравняем их.



$$\left.\begin{aligned} Q_{\sim} &= \int_0^T i(t)R\,dt \\ Q_{=} &= I^2RT \end{aligned}\right\} Q_{\sim} = Q_{=}$$

Из (2.6) следует:

$$\int_0^T i^2(t)r\,dt = I^2RT;\ \Rightarrow I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)\,dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Для любой из синусоидальных величин получаем

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}};\quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

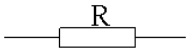
Условились, что все измерительные приборы показывают действующие значения. Например, 220 В – действующее значение, тогда $u(t) = 220\sqrt{2}\sin\omega t$.

3. Элементы электрической цепи синусоидального тока

Сопротивления в цепи переменного тока

В цепях переменного тока выделяют следующие виды сопротивлений.

Активное. Активным называют сопротивление резистора. Условное обозначение



Единицей измерения сопротивления является Ом. Сопротивление резистора не зависит от частоты.

Реактивное. В разделе реактивные выделяют три вида сопротивлений: индуктивное xL и емкостное xc и собственно реактивное. Для индуктивного сопротивления выше была получена формула $X_L = \omega L$. Единицей измерения индуктивного сопротивления также является Ом. Величина xL линейно зависит от частоты.

Для емкостного сопротивления выше была получена формула $X_C = 1 / \omega C$. Единицей измерения емкостного сопротивления является Ом. Величина xc зависит от частоты по обратно-пропорциональному закону. Просто реактивным сопротивлением цепи называют величину $X = X_L - X_C$.

Полное сопротивление. Полным сопротивлением цепи называют величину

(2.28) $$z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_c)^2}.$$

Из этого соотношения следует, что сопротивления Z, R и X образуют треугольник: Z – гипотенуза, R и X – катеты. Для удобства в этом треугольнике рассматривают угол φ, который определяют уравнением

(2.29) $$\varphi = \mathrm{arctg}((X_L - X_C) / R),$$

и называют углом сдвига фаз. С учетом него можно дать дополнительные связи

(2.30) $$R = Z \cos\varphi,$$

(2.31) $$X = Z \sin\varphi.$$

Индуктивность

Вокруг всякого проводника с током образуется магнитное поле, которое характеризуется вектором магнитной индукции B и магнитным потоком Ф:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \times d\vec{S}.$$

Если поле образуют несколько (w) проводников с одинаковым током, то используют понятие потокосцепления ψ

$$\psi = w\,\Phi.$$

Отношение потокосцепления к току, который его создает называют индуктивностью катушки

$$L = \psi / i.$$

При изменении во времени потокосцепления согласно закону Фарадея возникает ЭДС самоиндукции

$e_L = - d\psi / dt$.

С учетом соотношения (2.8) для eL получаем

$$e_L = - L \cdot di / dt.$$

Эта ЭДС всегда препятствует изменению тока (закон Ленца). Поэтому, чтобы через проводники все время тек ток, необходимо к проводникам прикладывать компенсирующее напряжение

$$u_L = -e_L.$$

Сопоставляя уравнения (2.9) и (2.10) получаем

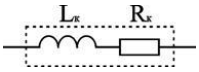
$$u_L = L \cdot di / dt$$

Это соотношение является аналогом закона Ома для индуктивности. Конструктивно индуктивность выполняется в виде катушки с проводом.

Условное обозначение индуктивности

Катушка с проводом кроме свойства создавать магнитное поле обладает активным сопротивлением R.

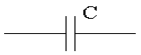
Условное обозначение реальной индуктивности.



Единицей измерения индуктивности является Генри (Гн). Часто используют дробные единицы
1 мкГн = 10^{-6} Гн; 1 мкГн = 10^{-3} Гн.
Емкость
Все проводники с электрическим зарядом создают электрическое поле. Характеристикой этого поля является разность потенциалов (напряжение). Электрическую емкость определяют отношением заряда проводника к напряжению
$C = Q / U_C$.
С учетом соотношения
$i = dQ / dt$
получаем формулу связи тока с напряжением
$i = C \cdot du_C / dt$.
Для удобства ее интегрируют и получают

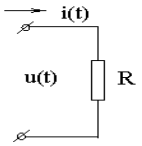
$$u_C = 1 / C \cdot \int i\, dt.$$

Это соотношение является аналогом закона Ома для емкости.
Конструктивно емкость выполняется в виде двух проводников разделенных слоем диэлектрика. Форма проводников может быть плоской, трубчатой, шарообразной и др.
Единицей измерения емкости является фарада:
1Ф = 1Кл / 1В = 1Кулон / 1Вольт.
Оказалось, что фарада является большой единицей, например, емкость земного шара равна ≈ 0,7 Ф. Поэтому чаще всего используют дробные значения
1 пФ = 10^{-12} Ф, (пФ – пикофарада);
1 нФ = 10^{-9} Ф, (нФ – нанофарада);
1 мкФ = 10^{-6} Ф, (мкФ – микрофарада).

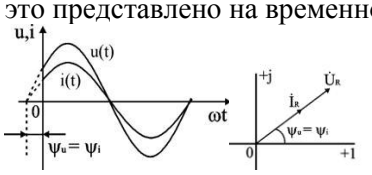
Условным обозначением емкости является символ 

.
4. Основные свойства простейших цепей переменного тока
Простейшие цепи – цепи, содержащие один элемент.

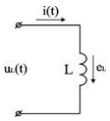
1. Участок цепи, содержащий активное сопротивление



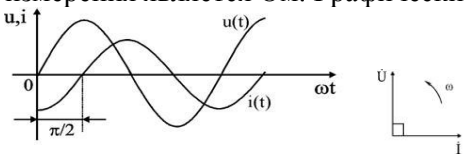
Зададимся изменением тока в резисторе по синусоидальному закону
$i(t) = I_{mR} \sin(\omega t + \psi_i)$.
Воспользуемся законом Ома для мгновенных значений тока и напряжения
$u(t) = R\, i(t)$
и получим
$u(t) = R\, I_{mR} \sin(\omega t + \psi_i)$.
Формальная запись синусоидального напряжения имеет вид
$u(t) = U_{mR} \sin(\omega t + \psi_u)$
Соотношения (2.13) и (2.14) будут равны если будут выполнены условия равенства амплитуд и фаз
$U_{mR} = R\, I_{mR}$,
$\psi_u = \psi_i$.
Соотношение (2.15) может быть записано для действующих значений
$U_R = R\, I_R$.
Соотношение (2.16) показывает, что фазы напряжения и тока в резисторе совпадают. Графически это представлено на временной диаграмме и на комплексной плоскости



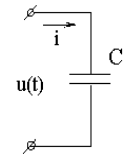
2. Участок цепи, содержащий идеальную индуктивность



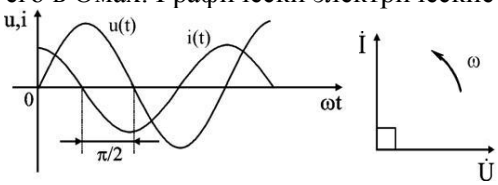
Зададим изменение тока в индуктивности по синусоидальному закону
$i(t) = I_{mL} \sin(\omega t + \psi_i)$.
Используем уравнение связи между током и напряжением в индуктивности
$u_L = L \cdot di / dt$
и получим $u_L(t) = \omega L \cdot I_{mL} \cos(\omega t + \psi_i)$.
Заменим cos на sin и получим
$u_L(t) = \omega L \cdot I_{mL} \sin(\omega t + \psi_i + 90°)$.
Формальная запись синусоидального напряжения имеет вид
$u_L(t) = U_{mL} \sin(\omega t + \psi_u)$.
Соотношения (2.18) и (2.19) будут равны если выполняется условие равенства амплитуд и фаз
$U_{mL} = \omega L \cdot I_{mL}$,
$\psi_u = \psi_i + 90°$.
Уравнение можно переписать для действующих значений
$U_L = \omega L \cdot I_L$.
Уравнение (2.21) показывает, что фаза тока в индуктивности отстает от фазы напряжения на 90°. Величину $X_L = \omega L$ в уравнении (2.20) называют индуктивным сопротивлением. Единицей его измерения является Ом. Графически электрические процессы в индуктивности представлены на



3. Участок цепи, содержащий ёмкость



Зададим изменение тока в емкости по синусоидальному закону
$i(t) = I_{mC} \sin(\omega t + \psi_i)$.
Используем уравнением связи между током и напряжением в емкости
$u_C = 1 / C \cdot \int i\, dt$,
и получим $u_C = 1 / (\omega C) \cdot I_{mC} (-\cos(\omega t + \psi_i))$.
Заменим –cos на sin
$u_C = 1 / (\omega C) \cdot I_{mC} \sin(\omega t + \psi_i - 90°)$.
Формальная запись синусоидального напряжения имеет вид
$u_C = U_{mC} \sin(\omega t + \psi_u)$.
Соотношения (2.23) и (2.24) будут равны если выполняется условие равенства амплитуд и фаз
$U_{mC} = 1 / (\omega C) \cdot I_{mC}$,
$\psi_u = \psi_i - 90°$.
Уравнение (2.25) можно переписать для действующих значений
$U_C = 1 / (\omega C) \cdot I_C$.
Уравнение (2.26) показывает, что фаза напряжения в емкости отстает от фазы тока на 90°. Величину $X_C = 1 / (\omega C)$ в уравнении (2.25) называют емкостным сопротивлением цепи и измеряют его в Омах. Графически электрические процессы в емкости представлены на рис. 2.13, 2.14.

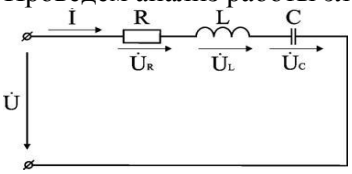


Из этого соотношения следует, что сопротивления Z, R и X образуют треугольник: Z – гипотенуза, R и X – катеты. Для удобства в этом треугольнике рассматривают угол φ, который определяют уравнением
$\varphi = \mathrm{arctg}((X_L - X_C) / R)$,

и называют углом сдвига фаз. С учетом него можно дать дополнительные связи
$R = Z \cos \varphi$,
$X = Z \sin \varphi$.

7. Цепь с последовательным соединением элементов

Проведем анализ работы электрической цепи с последовательным соединением элементов R, L, C.



Положим, что в этой задаче заданы величины R, L, C, частота f, напряжение U. Требуется определить ток в цепи и напряжение на элементах цепи. Из свойства последовательного соединения следует, что ток во всех элементах цепи одинаковый. Задача разбивается на ряд этапов.

1. Определение сопротивлений.

Реактивные сопротивления элементов L и C находим по формулам
$X_L = \omega L$, $X_C = 1 / \omega C$, $\omega = 2\pi f$.

Полное сопротивление цепи равно

$$z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_c)^2},$$

угол сдвига фаз равен
$\varphi = \mathrm{arctg}((X_L - X_C) / R)$,

2. Нахождение тока. Ток в цепи находится по закону Ома
$I = U / Z$, $\psi_i = \psi_u + \varphi$.

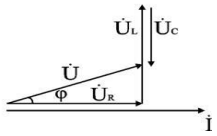
Фазы тока и напряжения отличаются на угол φ.

3. Расчет напряжений на элементах. Напряжения на элементах определяются по формулам
$U_R = I R$, $\psi_{uR} = \psi_i$;
$U_L = I X_L$, $\psi_{uL} = \psi_i + 90°$;
$U_C = I X_C$, $\psi_{uC} = \psi_i - 90°$.

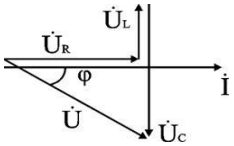
Для напряжений выполняется второй закон Кирхгофа в векторной форме.
$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C$.

4. Анализ расчетных данных. В зависимости от величин L и C в формуле (2.42) возможны следующие варианты: $X_L > X_C$; $X_L < X_C$; $X_L = X_C$.

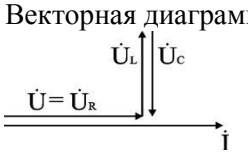
Для варианта $X_L > X_C$ угол $\varphi > 0$, $U_L > U_C$. Ток отстает от напряжения на угол φ. Цепь имеет активно-индуктивный характер. Векторная диаграмма напряжений имеет вид (рис. 2.16).



Для варианта $X_L < X_C$ угол $\varphi < 0$, $U_L < U_C$. Ток опережает напряжение на угол φ. Цепь имеет активно-емкостный характер. Векторная диаграмма напряжений имеет вид (рис. 2.17).



Для варианта $X_L = X_C$ угол $\varphi = 0$, $U_L = U_C$. Ток совпадает с напряжением. Цепь имеет активный характер. Полное сопротивление z=R наименьшее из всех возможных значений X_L и X_C. Векторная диаграмма напряжений имеет вид (рис. 2.18).



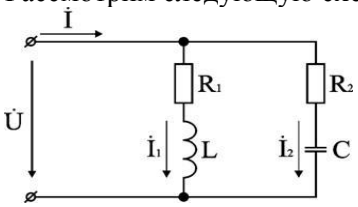
Этот режим называется резонанс напряжений ($U_L = U_C$). Напряжения на элементах U_L и U_C могут значительно превышать входное напряжение.

Пример.
U = 220 В, f = 50 Гц, R = 22 Ом, L = 350 мГн, C = 28,9 мкФ.
$X_L = \omega L = 2\pi f L = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}35 = 110$ Ом;
$X_C = 1 / \omega C = 1 / (2\pi f C) = 110$ Ом;

$Z = R = 22$ Ом, $\varphi=0$, $I = U / R = 220 / 22 = 10$ А, $\psi_u = \psi_i$;
$U_L = U_C = I X_L = 10 \cdot 110 = 1100$ В.
В приведенном примере U_L и U_C превышают входное напряжение в 5 раз.

8. Цепь с параллельным соединением элементов

Проведем анализ работы электрической цепи с параллельным соединением элементов R, L, C. Рассмотрим следующую схему.



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. Определение сопротивлений ветвей.

Реактивные сопротивления элементов L и C определяем по формулам
$X_L = \omega L$, $X_C = 1 / \omega C$, $\omega = 2\pi f$.
Полное сопротивление ветвей равны
$z_1 = \sqrt{R_1^2 + x_L^2}$, $z_2 = \sqrt{R_2^2 + x_c^2}$,
соответствующие им углы сдвига фаз
$\varphi_1 = \mathrm{arctg}(X_L / R_1)$, $\varphi_2 = \mathrm{arctg}(X_C / R_2)$.

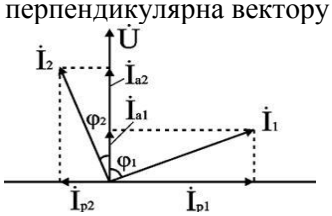
2. Нахождение токов в ветвях.

Токи в ветвях находятся по закону Ома
$I_1 = U / Z_1$, $\psi_{i1} = \psi_u + \varphi_1$, $I_2 = U / Z_2$, $\psi_{i2} = \psi_u + \varphi_2$.

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 (рис. 2.20).



Активные составляющие токов равны
$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1$, $I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2$,
$I_a = I_{1a} + I_{2a}$.
Реактивные составляющие токов равны $I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1$, $I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2$,
$I_p = I_{1p} - I_{2p}$.
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
$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$,
$\varphi = \mathrm{arctg}(I_p / I_a)$.
В методе проводимостей также используется разложение на активные и реактивные составляющие. Используя уравнение (2.30) активные составляющие токов записываются в виде
$I_{1a} = I_1 \cos\varphi_1 = \frac{U_1}{z_1} \times \frac{R_1}{z_1} = U \frac{R_1}{z_1^2} = Ug_1$,
где через $g_1 = R_1 / Z_1^2$ обозначена величина названная активной проводимостью первой ветви. Аналогичным образом получим

$$I_{2a} = I_2 \cos\varphi_2 = \frac{U_2}{z_2} \times \frac{R_2}{z_2} = U\frac{R_2}{z_2^2} = Ug_2$$

где $g_2 = R_2 / Z_2^2$; а величину $g = g_1 + g_2$ называют активной проводимостью всей цепи.

Используя уравнение (2.31) запишем реактивные составляющие токов

$$I_{1p} = I_1 \cos\varphi_1 = \frac{U}{z_1} \times \frac{x_L}{z_1} = U\frac{x_L}{z_1^2} = Ub_1,$$

$$I_{2p} = I_2 \cos\varphi_2 = \frac{U}{z_2} \times \frac{x_c}{z_2} = U\frac{x_c}{z_2^2} = Ub_2,$$

где b_1 и b_2 – реактивные проводимости ветвей $b_1 = X_L / Z_1^2$, $b_2 = X_C / Z_2^2$. Для реактивной проводимости всей цепи имеем

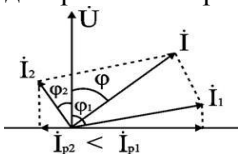
$b = b_1 - b_2$.

В этом уравнении взят знак минус, из тех же соображений, как и в уравнении Величина тока I и угол φ находятся из соотношений (2.45) и (2.46).

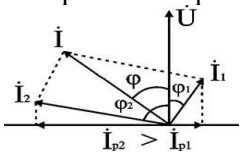
4. Анализ расчетных данных.

В зависимости от соотношения реактивных проводимостей b_1 и b_2 возможны три варианта: $b_1 > b_2$; $b_1 < b_2$; $b_1 = b_2$.

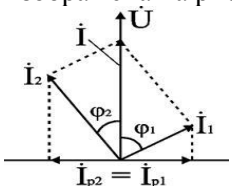
Для варианта $b_1 > b_2$ имеем $I_{1p} > I_{2p}$, $\varphi > 0$. Цепь имеет активно-индуктивный характер. Векторная диаграмма изображена на рис



При $b_1 < b_2$ токи $I_{1p} < I_{2p}$, $\varphi < 0$. Цепь имеет активно-емкостный характер. Векторная диаграмма изображена на рис.



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 рис. 2.23.



Тема 1.3. Трехфазные электрические цепи

Основные понятия и определения

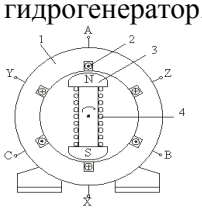
Трехфазная цепь является частным случаем многофазных систем электрических цепей, представляющих собой совокупность электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, отличающиеся по фазе одна от другой и создаваемые общим источником энергии.

Каждую из частей многофазной системы, характеризующуюся одинаковым током, принято называть фазой. Таким образом, понятие "фаза" имеет в электротехнике два значения: первое – аргумент синусоидально изменяющейся величины, второе – часть многофазной системы электрических цепей. Цепи в зависимости от количества фаз называют двухфазными, трехфазными, шестифазными и т.п.

Трехфазные цепи – наиболее распространенные в современной электроэнергетике. Это объясняется рядом их преимуществ по сравнению как с однофазными, так и с другими многофазными цепями:

экономичность производства и передачи энергии по сравнению с однофазными цепями;

возможность сравнительно простого получения кругового вращающегося магнитного поля, необходимого для трехфазного асинхронного двигателя;
возможность получения в одной установке двух эксплуатационных напряжений – фазного и линейного.
Трехфазная цепь состоит из трех основных элементов: трехфазного генератора, в котором механическая энергия преобразуется в электрическую с трехфазной системой ЭДС; линии передачи со всем необходимым оборудованием; приемников (потребителей), которые могут быть как трехфазными (например, трехфазные асинхронные двигатели), так и однофазными (например, лампы накаливания).
Трехфазный генератор представляет собой синхронную машину двух типов: турбогенератор и гидрогенератор. Модель трехфазного генератора схематически изображена на рис. 3.1.



На статоре 1 генератора размещается обмотка 2, состоящая из трех частей или, как их принято называть, фаз. Обмотки фаз располагаются на статоре таким образом, чтобы их магнитные оси были сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол $2\pi/3$, т.е. на 120°. На рис. 3.1 каждая фаза обмотки статора условно показана состоящей из одного витка. Начала фаз обозначены буквами A, B и C, а концы – X, Y, Z. Ротор 3 представляет собой электромагнит, возбуждаемый постоянным током обмотки возбуждения 4, расположенной на роторе.
При вращении ротора турбиной с равномерной скоростью в обмотках фаз статора индуктируются периодически изменяющиеся синусоидальные ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, но отличающиеся друг от друга по фазе на 120° вследствие их пространственного смещения.
На схеме обмотку (или фазу) источника питания изображают как показано на рис. 3.2.
За условное положительное направление ЭДС в каждой фазе принимают направление от конца к началу. Обычно индуктированные в обмотках статора ЭДС имеют одинаковые амплитуды и сдвинуты по фазе относительно друг друга на один и тот же угол 120°. Такая система ЭДС называется симметричной.

Трехфазная симметричная система ЭДС может изображаться графиками, тригонометрическими функциями, векторами и функциями комплексного переменного.
Графики мгновенных значений трехфазной симметричной системы ЭДС показаны на рис. 3.3.
Если ЭДС одной фазы (например, фазы A) принять за исходную и считать её начальную фазу равной нулю, то выражения мгновенных значений ЭДС можно записать в виде

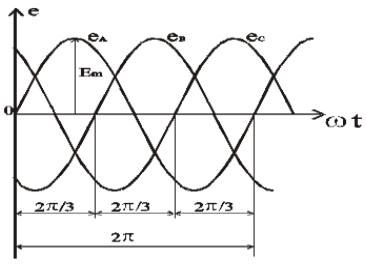
$$e_A = E_m \sin\omega t,$$
$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120°),$$
$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240°) = E_m \sin(\omega t + 120°).$$

Из графика мгновенных значений (рис 3.3) следует

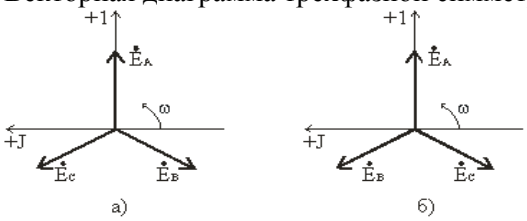
$$e_A + e_B + e_C = 0$$

Комплексные действующие ЭДС будут иметь выражения:

$$\dot{E}_A = E_m e^{j0°} = E_m(1 + j0),$$
$$\dot{E}_B = E_m e^{-j120°} = E_m(-1/2 - j\sqrt{3}/2),$$
$$\dot{E}_C = E_m e^{+j120°} = E_m(-1/2 + j\sqrt{3}/2).$$



Векторная диаграмма трехфазной симметричной системы ЭДС показана на рис 3.4а.



На диаграмме рис. 3.4а вектор $\dot{E}_A$ направлен вертикально, так как при расчете трехфазных цепей принято направлять вертикально вверх ось действительных величин. Из векторных диаграмм рис 3.4 следует, что для симметричной трехфазной системы геометрическая сумма векторов ЭДС всех фаз равна нулю:

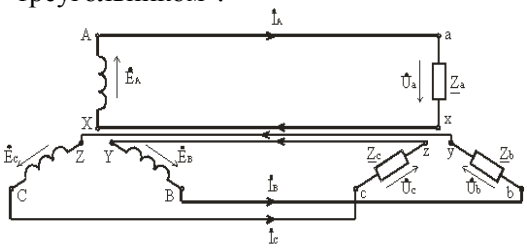
(3.4) $$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

Систему ЭДС, в которой ЭДС фазы B отстает по фазе от ЭДС фазы A, а ЭДС фазы C по фазе – от ЭДС фазы B, называют системой прямой последовательности. Если изменить направление вращения ротора генератора, то последовательность фаз изменится (рис. 3.4б) и будет называться обратной.

Последовательность фаз определяет направление вращения трехфазных двигателей. Для определения последовательности фаз имеются специальные приборы – фазоуказатели.

В период зарождения трехфазных систем имелись попытки использовать несвязанную систему, в которой фазы обмотки генератора не были электрически соединены между собой и каждая фаза соединялась со своим приемником двумя проводами (рис. 3.5). Такие системы не получили применения вследствие их неэкономичности: для соединения генератора с приемником требовалось шесть проводов (рис. 3.5)

Более совершенными и экономичными являются связанные цепи, в которых фазы обмотки электрически соединены между собой. Существуют различные способы соединения фаз трехфазных источников питания и трехфазных потребителей электроэнергии. Наиболее распространенными являются соединения "звезда" и "треугольник". При этом способ соединения фаз источников и фаз потребителей в трехфазных системах могут быть различными. Фазы источника обычно соединены "звездой", фазы потребителей соединяются либо "звездой", либо "треугольником".



Соединение фаз генератора и приемника звездой

При соединение фаз обмотки генератора (или трансформатора) звездой их концы X, Y и Z соединяют в одну общую точку N, называемую нейтральной точкой (или нейтралью) (рис. 3.6). Концы фаз приемников (Z_a, Z_b, Z_c) также соединяют в одну точку n. Такое соединение называется соединение звезда.

Провода $A-a$, $B-b$ и $C-c$, соединяющие начала фаз генератора и приемника, называются линейными, провод $N-n$, соединяющий точку N генератора с точкой n приемника, – нейтральным.

Трехфазная цепь с нейтральным проводом будет четырехпроводной, без нейтрального провода – трехпроводной.

В трехфазных цепях различают фазные и линейные напряжения. Фазное напряжение $U_Ф$ – напряжение между началом и концом фазы или между линейным проводом и нейтралью (U_A, U_B, U_C у источника; U_a, U_b, U_c у приемника). Если сопротивлением проводов можно пренебречь, то фазное напряжение в приемнике считают таким же, как и в источнике. ($U_A = U_a$, $U_B = U_b$, $U_C = U_c$). За условно положительные направления фазных напряжений принимают направления от начала к концу фаз.

Линейное напряжение ($U_Л$) – напряжение между линейными проводами или между одноименными выводами разных фаз (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}). Условно положительные направления линейных напряжений приняты от точек, соответствующих первому индексу, к точкам соответствующим второму индексу (рис. 3.6).

По аналогии с фазными и линейными напряжениями различают также фазные и линейные токи:

Фазные ($I_Ф$) – это токи в фазах генератора и приемников.

Линейные ($I_Л$) – токи в линейных проводах.

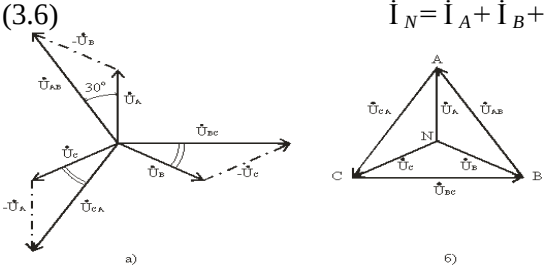
При соединении в звезду фазные и линейные токи равны

(3.5) $$I_Ф = I_Л.$$

Ток, протекающий в нейтральном проводе, обозначают I_N.

По первому закону Кирхгофа для нейтральной точки n (N) имеем в комплексной форме

(3.6) $$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$



В соответствии с выбранными условными положительными направлениями фазных и линейных напряжений можно записать уравнения по второму закону Кирхгофа.

$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$; $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C$; $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A$.

Согласно этим выражениям на рис. 3.7а построена векторная диаграмма, из которой видно, что при симметричной системе фазных напряжений система линейных напряжений тоже симметрична: U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} равны по величине и сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120° (общее обозначение $U_Л$), и опережают, соответственно, векторы фазных напряжений U_A, U_B, U_C, ($U_Ф$) на угол 30°.

Действующие значения линейных напряжений можно определить графи-чески по векторной диаграмме или по формуле (3.8), которая следует из треугольника, образованного векторами двух фазных и одного линейного напряжений:

$U_Л = 2U_Ф \cos 30°$

или $U_Л = \sqrt{3}\, U_Ф$.

Предусмотренные ГОСТом линейные и фазные напряжения для цепей низкого напряжения связаны между собой соотношениями:

$U_Л = 660В$; $U_Ф = 380В$;

$U_Л = 380В$; $U_Ф = 220В$;

$U_Л = 220В$; $U_Ф = 127В$.

Векторную диаграмму удобно выполнить топографической (рис. 3.7б), тогда каждой точке цепи соответствует определенная точка на диаграмме. Вектор, проведенный между двумя точками топографической диаграммы, выражает по величине и фазе напряжения между одноименными точками цепи.

Классификация приемников в трехфазной цепи

Приемники, включаемые в трехфазную цепь, могут быть либо однофазными, либо трехфазными. К однофазным приемникам относятся электрические лампы накаливания и другие осветительные приборы, различные бытовые приборы, однофазные двигатели и т.д. К трехфазным приемникам

относятся трехфазные асинхронные двигатели и индукционные печи. Обычно комплексные сопротивления фаз трехфазных приемников равны между собой:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = Ze^{j\varphi}.$$

Такие приемники называют симметричными. Если это условие не выполняется, то приемники называют несимметричными. При этом, если $Z_a = Z_b = Z_c$, то трехфазный приемник называют равномерным, если $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$, то однородным.

Четырехпроводная электрическая цепь

Для расчета трехфазной цепи применимы все методы, используемые для расчета линейных цепей. Обычно сопротивления проводов и внутреннее сопротивление генератора меньше сопротивлений приемников, поэтому для упрощения расчетов таких цепей (если не требуется большая точность) сопротивления проводов можно не учитывать ($Z_Л = 0$, $Z_N = 0$). Тогда фазные напряжения приемника U_a, U_b и U_c будут равны соответственно фазным напряжениям источника электрической энергии(генератора или вторичной обмотки трансформатора), т.е. $U_a = U_A$; $U_b = U_B$; $U_c = U_C$. Если полные комплексные сопротивления фаз приемника равны $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$, то токи в каждой фазе можно определить по формулам

$\dot{I}_a = \acute{U}_a / \underline{Z}_a$; $\dot{I}_b = \acute{U}_b / \underline{Z}_b$; $\dot{I}_c = \acute{U}_c / \underline{Z}_c$.

В соответствии с первым законом Кирхгофа ток в нейтральном проводе

$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$.

Симметричная нагрузка приемника

При симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке, когда $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$, т.е. когда $R_a = R_b = R_c = R_ф$ и $X_a = X_b = X_c = X_ф$, фазные токи равны по значению и углы сдвига фаз одинаковы

$I_a = I_b = I_c = I_ф = U_ф / Z_ф$,

$\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi = \mathrm{arctg}\,(X_ф/R_ф)$.

Построив векторную диаграмму токов для симметричного приемника (рис. 3.8), легко установить, что геометрическая сумма трех векторов тока равна нулю: $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$. Следовательно, в случае симметричной нагрузки ток в нейтральном проводе $I_N = 0$, поэтому необходимость в нейтральном проводе отпадает.

Несимметричная нагрузка приемника

При симметричной системе напряжений и несимметричной нагрузке, когда $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$ и $\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$ токи в фазах потребителя различны и определяются по закону Ома

$\dot{I}_a = \acute{U}_a / \underline{Z}_a$; $\dot{I}_b = \acute{U}_b / \underline{Z}_b$; $\dot{I}_c = \acute{U}_c / \underline{Z}_c$.

Ток в нейтральном проводе $\dot{I}_N$ равен геометрической сумме фазных токов

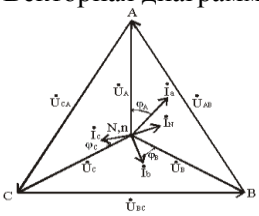
$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$.

Напряжения будут $U_a = U_A$; $U_b = U_B$; $U_c = U_C$, $U_Ф = U_Л / \sqrt{3}$, благодаря нейтральному проводу при $Z_N = 0$.

Следовательно, нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке.

Поэтому в четырехпроводную сеть включают однофазные несимметричные нагрузки, например, электрические лампы накаливания. Режим работы каждой фазы нагрузки, находящейся под неизменным фазным напряжением генератора, не будет зависеть от режима работы других фаз.

Векторная диаграмма при несимметричной нагрузке приведена на рис. 3.9



Трехпроводная электрическая цепь

Схема соединения источника и приемника звездой без нейтрального провода приведена на рис. 3.10.

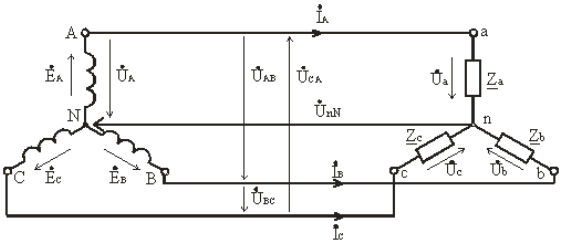


Рис. 3.10

При симметричной нагрузке, когда $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = Z_\varphi$, напряжение между нейтральной точкой источника N и нейтральной точкой приемника n равно нулю, $U_{nN} = 0$.

Соотношение между фазными и линейными напряжениями приемника также равно $\sqrt{3}$, т.е. $U_Ф = U_Л / \sqrt{3}$, а токи в фазах определяются по тем же формулам (3.12, 3.13), что и для четырехпроводной цепи. В случае симметричного приемника достаточно определить ток только в одной из фаз. Сдвиг фаз между током и соответствующим напряжением $\varphi = \mathrm{arctg}\,(X / R)$.

При несимметричной нагрузке $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$ между нейтральными точками приемника и источника электроэнергии возникает напряжение смещения нейтрали U_{nN}.

Для определения напряжения смещения нейтрали можно воспользоваться формулой межузлового напряжения, так как схема рис 3.10 представляет собой схему с двумя узлами,

(3.14)

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\underline{Y}_a \dot{U}_A + \underline{Y}_b \dot{U}_B + \underline{Y}_c \dot{U}_C}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c},$$

где: $\underline{Y}_a = 1 / \underline{Z}_a$; $\underline{Y}_b = 1 / \underline{Z}_b$; $\underline{Y}_c = 1 / \underline{Z}_c$ – комплексы проводимостей фаз нагрузки.

Очевидно, что теперь напряжения на фазах приемника будут отличаться друг от друга. Из второго закона Кирхгофа следует, что

(3.15) $\acute{U}_a = \acute{U}_A - \acute{U}_{nN}$; $\acute{U}_b = \acute{U}_B - \acute{U}_{nN}$; $\acute{U}_c = \acute{U}_C - \acute{U}_{nN}$.

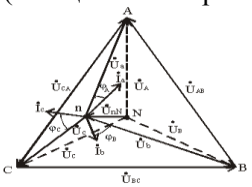
Зная фазные напряжения приемника, можно определить фазные токи:

(3.16) $\dot{I}_a = \acute{U}_a / \underline{Z}_a = \underline{Y}_a \acute{U}_a$; $\dot{I}_b = \acute{U}_b / \underline{Z}_b = \underline{Y}_b \acute{U}_b$; $\dot{I}_c = \acute{U}_c / \underline{Z}_c = \underline{Y}_c \acute{U}_c$.

Векторы фазных напряжений можно определить графически, построив векторную (топографическую) диаграмму фазных напряжений источника питания и U_{nN} (рис. 3.11).

При изменении величины (или характера) фазных сопротивлений напряжение смещений нейтрали U_{nN} может изменяться в широких пределах. При этом нейтральная точка приемника n на диаграмме может занимать разные положения, а фазные напряжения приемника $\acute{U}_a$, $\acute{U}_b$ и $\acute{U}_c$ могут отличаться друг от друга весьма существенно.

Таким образом, при симметричной нагрузке нейтральный провод можно удалить и это не повлияет на фазные напряжения приемника. При несимметричной нагрузке и отсутствии нейтрального провода фазные напряжения нагрузки уже не связаны жестко с фазными напряжениями генератора, так как на нагрузку воздействуют только линейные напряжения генератора. Несимметричная нагрузка в таких условиях вызывает несимметрию ее фазных напряжений $\acute{U}_a$, $\acute{U}_b$, $\acute{U}_c$ и смещение ее нейтральной точки n из центра треугольника напряжений (смещение нейтрали).



Направление смещения нейтрали зависит от последовательности фаз системы и характера нагрузки.

Поэтому нейтральный провод необходим для того, чтобы:

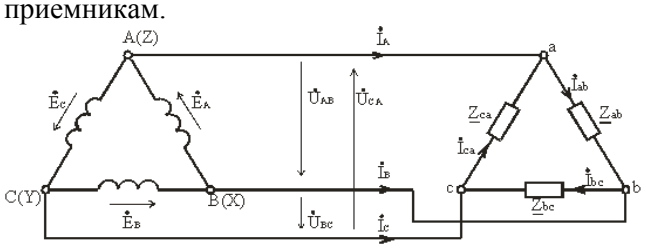
выравнивать фазные напряжения приемника при несимметричной нагрузке;

подключать к трехфазной цепи однофазные приемники с номинальным напряжением в $\sqrt{3}$ раз меньше номинального линейного напряжения сети.

Следует иметь в виду, что в цепь нейтрального провода нельзя ставить предохранитель, так как перегорание предохранителя приведет к разрыву нейтрального провода и появлению значительных перенапряжений на фазах нагрузки.

Соединение фаз генератора и приемника треугольником

При соединении источника питания треугольником (рис. 3.12) конец X одной фазы соединяется с началом B второй фазы, конец Y второй фазы – с началом C третьей фазы, конец третьей фазы Z – с началом первой фазы A. Начала A, B и C фаз подключаются с помощью трех проводов к приемникам.



Соединение фаз источника в замкнутый треугольник возможно при симметричной системе ЭДС, так как

$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$.

Если соединение обмоток треугольником выполнено неправильно, т.е. в одну точку соединены концы или начала двух фаз, то суммарная ЭДС в контуре треугольника отличается от нуля и по обмоткам протекает большой ток. Это аварийный режим для источников питания, и поэтому недопустим.

Напряжение между концом и началом фазы при соединении треугольником – это напряжение между линейными проводами. Поэтому при соединении треугольником линейное напряжение равно фазному напряжению.

$U_Л = U_Ф$.

Пренебрегая сопротивлением линейных проводов, линейные напряжения потребителя можно приравнять линейным напряжениям источника питания: $U_{ab} = U_{AB}$, $U_{bc} = U_{BC}$, $U_{ca} = U_{CA}$. По фазам Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} приемника протекают фазные токи $\dot{I}_{ab}$, $\dot{I}_{bc}$ и $\dot{I}_{ca}$. Условное положительное направление фазных напряжений $\acute{U}_{ab}$, $\acute{U}_{bc}$ и $\acute{U}_{ca}$ совпадает с положительным направлением фазных токов. Условное положительное направление линейных токов $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ принято от источников питания к приемнику.

В отличие от соединения звездой при соединении треугольником фазные токи не равны линейным. Токи в фазах приемника определяются по формулам

$\dot{I}_{ab} = \acute{U}_{ab} / \underline{Z}_{ab}$; $\dot{I}_{bc} = \acute{U}_{bc} / \underline{Z}_{bc}$; $\dot{I}_{ca} = \acute{U}_{ca} / \underline{Z}_{ca}$.

Линейные токи можно определить по фазным, составив уравнения по первому закону Кирхгофа для узлов a, b и c (рис 3.12)

$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}$; $\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}$; $\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$.

Сложив левые и правые части системы уравнений, (3.20), получим

$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$,

т.е. сумма комплексов линейных токов равна нулю как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке.

Симметричная нагрузка приемника

При симметричной нагрузке

(3.22) $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}e^{j\varphi}$,

т.е. $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z$, $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi$.

Так как линейные (они же фазные) напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} симметричны, то и фазные токи образуют симметричную систему

$\dot{I}_{ab} = \acute{U}_{ab} / \underline{Z}_{ab}$; $\dot{I}_{bc} = \acute{U}_{bc} / \underline{Z}_{bc}$; $\dot{I}_{ca} = \acute{U}_{ca} / \underline{Z}_{ca}$.

Абсолютные значения их равны, а сдвиги по фазе относительно друг друга составляют 120°.

Линейные токи

$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}$; $\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}$; $\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$;

образуют также симметричную систему токов (рис.3.13, 3.14).

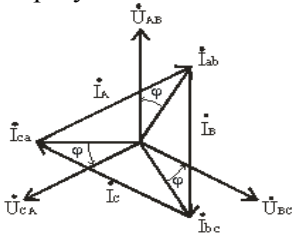


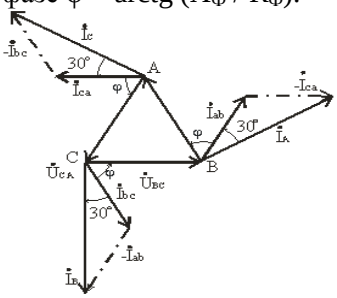
Рис. 3.13

На векторной диаграмме (рис. 3.14) фазные токи отстают от фазных напряжений на угол φ (полагаем, что фазы приемника являются индуктивными, т.е. $\varphi > 0°$). Здесь принято, что напряжение U_{AB} имеет нулевую фазу. Из диаграммы следует, что любой линейный ток больше фазного в $\sqrt{3}$ раз. Линейный ток $\dot{I}_A$ отстает по фазе от фазного тока $\dot{I}_{ab}$ на угол 30°, на этот же угол отстает $\dot{I}_B$ от $\dot{I}_{bc}$, $\dot{I}_C$ от $\dot{I}_{ca}$.

Таким образом, при соединении треугольником действующее значение линейного тока при симметричной нагрузке в $\sqrt{3}$ раз больше действующего значения фазного тока и $U_Л = U_Ф$; $I_Л = \sqrt{3}\, I_Ф$.

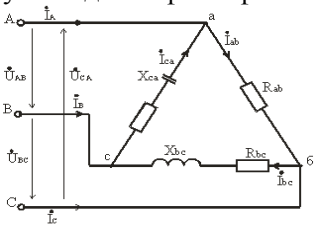
При равномерной нагрузке фаз расчет трехфазной цепи соединенной треугольником, можно свести к расчету одной фазы.

Фазное напряжение $U_Ф = U_Л$. Фазный ток $I_Ф = U_Ф / Z_Ф$, линейный ток $I_Л = \sqrt{3}\, I_Ф$, угол сдвига по фазе $\varphi = \mathrm{arctg}\,(X_Ф / R_Ф)$.

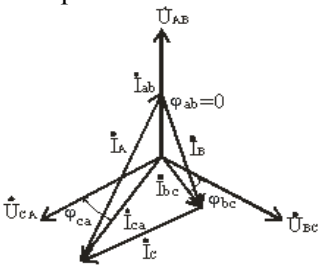


Несимметричная нагрузка приемника

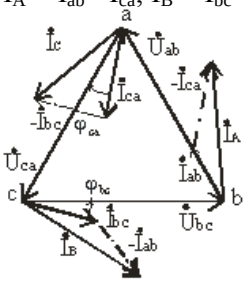
В общем случае при несимметричной нагрузке $Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$. Обычно она возникает при питании от трехфазной сети однофазных приемников. Например, для нагрузки, рис. 3.15, фазные токи, углы сдвига фаз и фазные мощности будут в общем случае различными.



Векторная диаграмма для случая, когда в фазе ab имеется активная нагрузка, в фазе bc – активно-индуктивная, а в фазе ca – активно-емкостная приведена на рис. 3.16, топографическая диаграмма – на рис. 3.17.



Построение векторов линейных токов произведено в соответствии с выражениями
$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}$; $\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}$; $\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$.



Таким образом, при несимметричной нагрузке симметрия фазных токов $\dot{I}_{ab}$, $\dot{I}_{bc}$, $\dot{I}_{ca}$ нарушается, поэтому линейные токи $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$ можно определить только расчетом по вышеприведенным уравнениям (3.20) или найти графическим путем из векторных диаграмм (рис. 3.16, 3.17).

Важной особенностью соединения фаз приемника треугольником является то, что при изменении сопротивления одной из фаз режим работы других фаз остается неизменным, так как линейные напряжения генератора являются постоянными. Будет изменяться только ток данной фазы и линейные токи в проводах линии, соединенных с этой фазой. Поэтому схема соединения треугольником широко используется для включения несимметричной нагрузки.

При расчете для несимметричной нагрузки сначала определяют значения фазных токов $\dot{I}_{ab}$, $\dot{I}_{bc}$, $\dot{I}_{ca}$ и соответствующие им сдвиги фаз φ_{ab}, φ_{bc}, φ_{ca}. Затем определяют линейные токи с помощью уравнений (3.20) в комплексной форме или с помощью векторных диаграмм (рис. 3.16, 3.17).

Мощность трехфазной цепи, ее расчет и измерение

В трехфазных цепях, так же как и в однофазных, пользуются понятиями активной, реактивной и полной мощностей.

Соединение потребителей звездой

В общем случае несимметричной нагрузки активная мощность трехфазного приемника равна сумме активных мощностей отдельных фаз

$$P = P_a + P_b + P_c,$$

Где

(3.24 $P_a = U_a I_a \cos \varphi_a$; $P_b = U_b I_b \cos \varphi_b$; $P_c = U_c I_c \cos \varphi_c$;

U_a, U_b, U_c; I_a, I_b, I_c – фазные напряжения и токи;

φ_a, φ_b, φ_c – углы сдвига фаз между напряжением и током.

Реактивная мощность соответственно равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c,$$

где

$$Q_a = U_a I_a \sin \varphi_a;\ Q_b = U_b I_b \sin \varphi_b;\ Q_c = U_c I_c \sin \varphi_c.$$

Полная мощность отдельных фаз

$$S_a = U_a I_a;\ S_b = U_b I_b;\ S_c = U_c I_c.$$

Полная мощность трехфазного приемника

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

При симметричной системе напряжений ($U_a = U_b = U_c = U_Ф$) и симметричной нагрузке ($I_a = I_b = I_c = I_Ф$; $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi$) фазные мощности равны $P_a = P_b = P_c = P_Ф = U_Ф I_Ф \cos \varphi$; $Q_a = Q_b = Q_c = Q_Ф = U_Ф I_Ф \sin \varphi$.

Активная мощность симметричного трехфазного приемника

$$P = 3 P_Ф = 3 U_Ф I_Ф \cos \varphi.$$

Аналогично выражается и реактивная мощность

$$Q = 3 Q_Ф = 3 U_Ф I_Ф \sin \varphi.$$

Полная мощность

$$S = 3 S_Ф = 3 U_Ф I_Ф.$$

Отсюда следует, что в трехфазной цепи при симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке достаточно измерить мощность одной фазы и утроить результат.

Соединение потребителей треугольником

В общем случае несимметричной нагрузки активная мощность трехфазного приемника равна сумме активных мощностей отдельных фаз

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca},$$

где

$P_{ab} = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_{ab}$; $P_{bc} = U_{bc} I_{bc} \cos \varphi_{bc}$; $P_{ca} = U_{ca} I_{ca} \cos \varphi_{ca}$;

U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}; I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} – фазные напряжения и токи;

φ_{ab}, φ_{bc}, φ_{ca} – углы сдвига фаз между напряжением и током.

Реактивная мощность соответственно равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз

$$Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca},$$

где

$$Q_{ab} = U_{ab} I_{ab} \sin \varphi_{ab};\ Q_{bc} = U_{bc} I_{bc} \sin \varphi_{bc};\ Q_{ca} = U_{ca} I_{ca} \sin \varphi_{ca}.$$

Полная мощность отдельных фаз

$$S_{ab} = U_{ab} I_{ab};\ S_{bc} = U_{bc} I_{bc};\ S_{ca} = U_{ca} I_{ca}.$$

Полная мощность трехфазного приемника

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

При симметричной системе напряжений ($U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_Ф$) и симметричной нагрузке ($I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_Ф$; $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi$) фазные мощности равны $P_{ab} = P_{bc} = P_{ca} = P_Ф = U_Ф I_Ф \cos\varphi$; $Q_{ab} = Q_{bc} = Q_{ca} = Q_Ф = U_Ф I_Ф \sin\varphi$.
Активная мощность симметричного трехфазного приемника
$P = 3 P_Ф = 3 U_Ф I_Ф \cos\varphi$.
Аналогично выражается и реактивная мощность
$Q = 3 Q_Ф = 3 U_Ф I_Ф \sin\varphi$.
Полная мощность
$S = 3 S_Ф = 3 U_Ф I_Ф$.
Так как за номинальные величины обычно принимают линейные напряжения и токи, то мощности удобней выражать через линейные величины $U_Л$ и $I_Л$.

При соединении фаз симметричного приемника звездой $U_Ф = U_Л / \sqrt{3}$, $I_Ф = I_Л$, при соединении треугольником $U_Ф = U_Л$, $I_Ф = I_Л / \sqrt{3}$. Поэтому независимо от схемы соединения фаз приемника активная мощность при симметричной нагрузке определяется одной и той же формулой

$$P = \sqrt{3}\, U_Л I_Л \cos\varphi.$$

где $U_Л$ и $I_Л$ – линейное напряжение и ток; $\cos\varphi$ – фазный.
Обычно индексы "л" и "ф" не указывают и формула принимает вид

($$P = \sqrt{3}\, U I \cos\varphi.$$

Соответственно реактивная мощность

$$Q = \sqrt{3}\, U I \sin\varphi.$$

и полная мощность

$$S = \sqrt{3}\, U I.$$

При этом надо помнить, что угол φ является углом сдвига фаз между фазными напряжением и током, и, что при неизмененном линейном напряжении, переключая приемник со звезды в треугольник его мощность увеличивается в три раза $\Delta P = Y\ 3P$.

Тема 1.4. Магнитные цепи

Всякий электромагнит состоит из стального сердечника – магнитопровода и намотанной на него катушки с витками изолированной проволоки, по которой проходит электрический ток.
Совокупность нескольких участков: ферромагнитных (сталь) и неферромагнитных (воздух), по которым замыкаются линии магнитного потока, составляют магнитную цепь.

1. Закон полного тока

В основе расчета магнитных цепей лежит закон полного тока (рис. 4.3)

$$\oint H\, d\bar{L} = \oint H \cos\alpha dL = \sum I,$$

где: H – напряженность магнитного поля в данной точке пространства;
dL – элемент длины замкнутого контура L;
α – угол между направлениями векторов $\bar{H}$ и $d\bar{L}$;
 I – алгебраическая сумма токов, пронизывающих контур L.

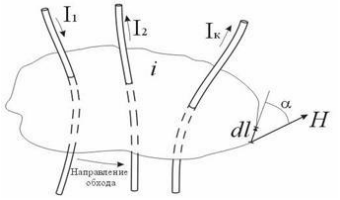


Рис. 3. Закон полного тока

Ток $I_к$, пронизывающий контур L считается положительным, если принятое направление обхода контура и направление этого тока связаны правилом правоходового винта (буравчика).

Применение закона полного тока для расчета магнитных цепей

Рассмотрим простейшую магнитную цепь, выполненную в виде кольца тороида из однородного материала (рис. 4).

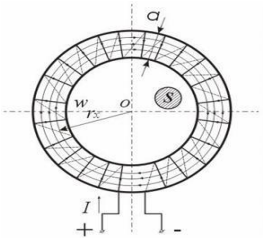


Рис. 4. Кольцевая магнитная цепь

Обмотка имеет W витков и обтекается током I. Магнитные линии внутри кольца представляют собой концентрические окружности с центров точке О. Применим к контуру C_x, совпадающему с одной из магнитных линий, проходящих в магнитопроводе, закон полного тока. При этом будем считать:

$\overline{H}$ и $d\overline{L}$ совпадают, следовательно $\alpha = 0$;

величина Hx во всех точках контура одинакова;

сумма токов, пронизывающих контур, равна IW.

Тогда

$$\oint H_x \cos\alpha dL = H_x \oint dL = H_x L_x = IW.$$

Отсюда

$$H_x = \frac{IW}{L_x} = \frac{IW}{2\pi r_x} \text{ [А/м]},$$

где L_x – длина контура, вдоль которого велось интегрирование; r_x – радиус окружности.

Вектор $\overline{H}$ внутри кольца зависит от расстояния r_x. Если α – ширина кольца << d, то эта разница между значениями H в пределах сердечника не велика. При этом в расчет допустимо принять для всего поперечного сечения магнитопровода одно значение напряженности магнитного поля:

$H_{ср} = IW / L$,

где L – длина средней магнитной линии.

2. Закон Ома для магнитной цепи. Линейные и нелинейные магнитные сопротивления

В кольцевом магнитопроводе с равномерной обмоткой все поле концентрируется внутри кольца. Определим в этом случае магнитный поток в магнитопроводе с распределенной обмоткой.

Исходя из соотношений $\Phi = B_{ср} S$ и $B_{ср} = \mu_a H_{ср}$ получим

$\Phi = B_{ср} S = \mu_a H_{ср} S$.

(*)

$$\Phi = \mu_a S \frac{IW}{L} = \frac{IW}{\frac{L}{\mu_a S}} = \frac{F}{R_м}.$$

Магнитный поток Ф зависит от произведения IW = F, которое получило название магнитодвижущей силы (МДС).

Величину $L / (\mu_a S) = R_м$ – принято назвать магнитным сопротивлением магнитопровода (по аналогии с электрическим сопротвлением $r = L / \gamma S$).

Магнитное сопротивление воздуха (зазоров) линейное, т.к. $\mu_a = \mu_o = const$. Магнитное сопротивление сердечника нелинейно – μ_a зависит от B.

Если намагничивающую силу F, уподобить действию ЭДС, будет получено соотношение, похожее на выражение закона Ома для цепи постоянного тока. В связи с этим формулу (*) принято назвать законом Ома для магнитной цепи. Следует оговориться, что эта аналогия – формальная, а физическая сущность процессов в электрических и магнитных цепях различна.

3. Ферромагнитные материалы и их свойства

Известно, что магнитная проницаемость μ_a ферромагнитных материалов переменная величина и зависит от B. Это влечет за собой непостоянство магнитного сопротивления $R_м$ и значительно усложняет расчеты магнитных цепей. Поэтому для расчета магнитных цепей, содержащих ферромагнитные участки, необходимо располагать кривыми намагничивания, представляющими собой зависимость B = f(H). Эти зависимости получают экспериментальным путем – испытанием замкнутых магнитопроводов с распределенной обмоткой.

Первоначальному намагничиванию образца соответствует кривая □, называемая кривой первоначального намагничивания (рис. 5).

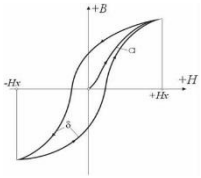


Рис. 5. Зависимость B(H) – петля гистерезиса

Если образец подвергать циклическому намагничиванию при изменении напряженности магнитного поля в пределах $+H_x$ до $-H_x$, то график будет представлять замкнутую кривую, известную под названием петли гистерезиса.

Если процесс циклического намагничивания повторять для постепенно увеличивающихся значений напряженности магнитного поля, то можно получить семейство петель гистерезиса, и так называемую предельную петлю гистерезиса, которой соответствует изменение напряженности магнитного поля в пределах от $+H_{max}$ до $-H_{max}$, увеличение H сверх H_{max} не повлечет за собой увеличение площади петли гистерезиса. Предельная петля гистерезиса определяет значение остаточной магнитной индукции и коэрцетивной силы H_c. Кривая, соединяющая вершины петель гистерезиса, называется основной кривой намагничивания. Эти кривые приводятся в справочных руководствах и используются в расчетах магнитных цепей.

Процесс циклического перемагничивания требует затраты энергии, как известно из курса физики, пропорциональной площади петли гистерезиса.

В связи с этим магнитопроводы электротехнических устройств, работающих в условиях непрерывного перемагничивания (например трансформаторы), целесообразно выполнять из ферромагнитных материалов, имеющих узкую петлю гистерезиса (на рис. 4.6, кривые □). Такие ферромагнитные материалы называют магнитомягкими (листовая электротехническая сталь и ряд специальных сплавов, например пермаллой, состоящий из никеля, железа и других компонентов).

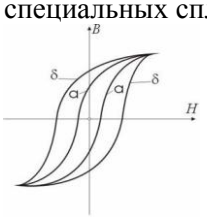


Рис. 6. Петли гистерезиса магнитомягих (кривые α) и магнитотвердых (кривые δ) материалов

Для изготовления постоянных магнитов рекомендуется использовать ферромагнитные материалы с широкой петлей гистерезиса (кривые δ), имеющих большую остаточную индукцию и большую коэрцетивную силу. Такие ферромагнитные материалы называют магнитотвердыми (ряд сплавов железа с вольфрамом, хромом и алюминием).

Раздел 2. Трансформаторы
Тема 2.1. Трансформаторы

1. Назначение и области применения

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно-связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока. Трансформаторы широко используются в промышленности и быту для различных целей.

1. Для передачи и распределения электрической энергии.

Обычно на электростанциях генераторы переменного тока вырабатывают электрическую энергию при напряжении 6-24 кВ, а передавать электроэнергию на дальние расстояния выгодно при значительно больших напряжениях (110, 220, 330, 400, 500, и 750 кВ). Поэтому на каждой электростанции устанавливают трансформаторы, осуществляющие повышение напряжения.

Распределение электрической энергии между промышленными предприятиями, населёнными пунктами, в городах и сельских местностях, а также внутри промышленных предприятий производится по воздушным и кабельным линиям, при напряжении 220, 110, 35, 20, 10 и 6 кВ. Следовательно, во всех распределительных узлах должны быть установлены трансформаторы, понижающие напряжение до величины 220, 380 и 660 В (рис. 1.1)

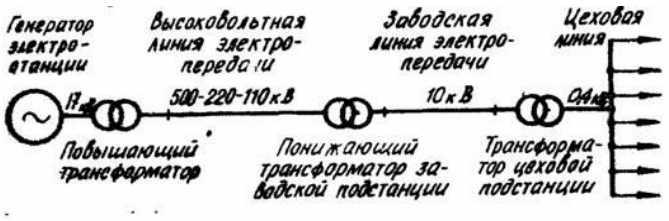


Рис. 1

2. Для обеспечения нужной схемы включения вентилей в преобразовательных устройствах и согласования напряжения на выходе и входе преобразователя. Трансформаторы, применяемые для этих целей, называются преобразовательными.
3. Для различных технологических целей: сварки (сварочные трансформаторы), питания электротермических установок (электропечные трансформаторы) и др.
4. Для питания различных цепей радиоаппаратуры, электронной аппаратуры, устройств связи и автоматики, электробытовых приборов, для разделения электрических цепей различных элементов указанных устройств, для согласования напряжения и пр.
5. Для включения электроизмерительных приборов и некоторых аппаратов (реле и др.) в электрические цепи высокого напряжения или же в цепи, по которым проходят большие токи, с целью расширения пределов измерения и обеспечения электробезопастности. Трансформаторы, применяемые для этих целей, называются измерительными.

Классификацию трансформаторов можно произвести по нескольким признакам:
1. По назначению трансформаторы разделяют на силовые общего и специального применения. Силовые трансформаторы общего применения используются в линиях передачи и распределения электроэнергии. Для режима их работы характерна частота переменного тока 50 Гц и очень малые отклонения первичного и вторичного напряжений от номинальных значений. К трансформаторам специального назначения относятся силовые специальные (печные, выпрямительные, сварочные, радиотрансформаторы), измерительные и испытательные трансформаторы, трансформаторы для преобразования числа фаз, формы кривой ЭДС, частоты и т.д.
2. По виду охлаждения – с воздушным (сухие трансформаторы) и масляным (масляные трансформаторы) охлаждением.
3. По числу фаз на первичной стороне – однофазные и трёхфазные.
4. По форме магнитопровода – стержневые, броневые, тороидальные.
5. По числу обмоток на фазу – двухобмоточные, трёхобмоточные, многообмоточные (более трёх обмоток).
6. По конструкции обмоток – с концентрическими и чередующимися (дисковыми) обмотками.

2. Принцип действия трансформатора

Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора состоит из двух обмоток (рис. 2), размещенных на замкнутом магнитопроводе, который выполнен из ферромагнитного материала. Применение ферромагнитного магнитопровода позволяет усилить электромагнитную связь между обмотками, т.е. уменьшить магнитное сопротивление контура, по которому проходит магнитный поток трансформатора. Первичную обмотку 1 подключают к источнику переменного тока – электрической сети с напряжением сети u_1. К вторичной обмотке 2 присоединяют сопротивление нагрузки Zн.

Обмотку более высокого напряжения называют обмоткой высшего напряжения (ВН), а низкого напряжения – обмоткой низшего напряжения (НН). Начала и концы обмотки ВН обозначают буквами А и Х; обмотки НН – буквами а и х.

При подключении к сети в первичной обмотке возникает переменный ток i_1, который создаёт переменный магнитный поток Ф, замыкающийся по магнитопроводу. Поток Ф индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС – e_1 и e_2 пропорциональные, согласно закону Максвелла, числам витков w_1 и w_2 соответствующей обмотки и скорости изменения потока dФ/dt.

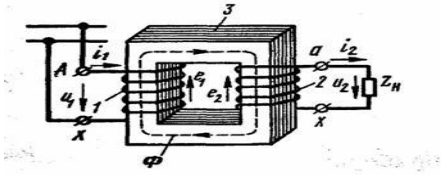


Рис. 2

Таким образом, мгновенные значения ЭДС, индуцированные в каждой обмотке.

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

Следовательно, отношение мгновенных и действующих ЭДС в обмотках определяется выражением

(1) $E_1 / E_2 = e_1 / e_2 = w_1 / w_2$.

Если пренебречь падениями напряжения в обмотках трансформатора, которые обычно не превышают 3-5 % от номинальных значений U_1 и U_2, и считать $E_1 \approx U_1$ и $E_2 \approx U_2$, то получим

(2) $U_1 / U_2 \approx w_1 / w_2$.

Следовательно, подбирая соответствующим образом числа витков обмоток, при заданном напряжении U_1 можно получить желаемое напряжение U_2. Если необходимо повысить вторичное напряжение, то число витков w_2 берут больше числа w_1; такой трансформатор называют повышающим. Если требуется уменьшить напряжение U_2, то число витков w_2 берут меньшим w_1; такой трансформатор называют понижающим.

Отношение ЭДС $E_{вн}$ обмотки высшего напряжения к ЭДС $E_{нн}$ обмотки низшего напряжения (или отношение их чисел витков) называют коэффициентом трансформации

$n = \frac{E_{вн}}{E_{нн}} = \frac{w_{вн}}{w_{нн}}$.

Коэффициент n всегда больше единицы.

В системах передачи и распределения энергии в ряде случаев применяют трёхобмоточные трансформаторы, а в устройствах радиоэлектроники и автоматики – многообмоточные трансформаторы. В таких трансформаторах на магнитопроводе размещают три или большее число изолированных друг от друга обмоток, что даёт возможность при питании одной из обмоток получать два или большее число различных напряжений (U_2, U_3, U_4 и т.д.) для электроснабжения двух или большего числа групп потребителей. В трехобмоточных силовых трансформаторах различают обмотки высшего, низшего и среднего (СН) напряжения.

В трансформаторе преобразуются только напряжения и токи. Мощность же остаётся приблизительно постоянной (она несколько уменьшается из-за внутренних потерь энергии в трансформаторе). Следовательно, полная мощность потребляемая из сети

$S_1 = U_1 I_1$,

практически полностью выделяется на нагрузке $S_1 = U_1 I_1 \approx S_2 = U_2 I_2$.

Отсюда следуют соотношения между токами и напряжениями на первичной и вторичной обмотках трансформатора.

(4) $U_1 / U_2 = I_2 / I_1 = w_1 / w_2 = n$.

При уменьшении вторичного напряжения в n раз по сравнению с первичным, ток i_2 во вторичной обмотке соответственно увеличится в n раз.

Трансформатор может работать только в цепях переменного тока. Если первичную обмотку трансформатора подключить к источнику постоянного тока, то в его магнитопроводе образуется магнитный поток, постоянный во времени по величине и направлению. Поэтому в первичной и вторичной обмотках в установившемся режиме не индуцируются ЭДС, а, следовательно, не передаётся электрическая энергия из первичной цепи во вторичную. Такой режим опасен для трансформатора, так как из-за отсутствия ЭДС E_1 в первичной обмотке ток $I_1 = U_1 / R_1$ весьма большой.

Важным свойством трансформатора, используемым в устройствах автоматики и радиоэлектроники, является способность его преобразовывать сопротивление нагрузки. Если к источнику переменного тока подключить нагрузку с сопротивлением R через трансформатор с коэффициентом трансформации n, то для цепи источника

$R' = \frac{P_1}{I_1^2} \approx \frac{P_2}{I_1^2} \approx \frac{I_2^2 R}{I_1^2} \approx n^2 R$,

где: P_1 – мощность, потребляемая трансформатором от источника переменного тока, Вт; $P_2 = I_2^2 R \approx P_1$ – мощность, потребляемая нагрузкой с сопротивлением R от трансформатора.

Таким образом, трансформатор изменяет значение сопротивления нагрузки R в n^2 раз. Это свойство широко используется при разработке электрических схем для согласования сопротивлений нагрузки с внутренним сопротивлением источников электрической энергии.

3. Устройство трансформаторов

Магнитная система. В зависимости от конфигурации магнитной системы, трансформаторы подразделяют на стержневые (рис. 1.3, а), броневые (рис.1.3, б) и тороидальные (рис. 3, в).
Стержнем называют часть магнитопровода, на которой размещают обмотки (рис. 3; 2). Часть магнитопровода, на которой обмотки отсутствуют, называют ярмом (рис. 3; 1). Трансформаторы большой и средней мощности обычно выполняют стержневыми. Они имеют лучшие условия охлаждения и меньшую массу, чем броневые.

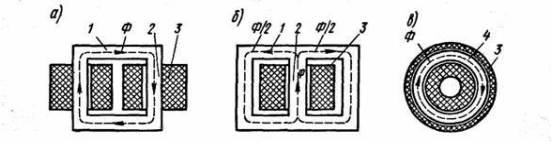


Рис. 3

Для уменьшения потерь от вихревых токов, магнитопроводы трансформаторов (рис. 3) собирают из изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,28-0,5 мм при частоте 50 Гц.
Трансформаторы малой мощности и микротрансформаторы часто выполняют броневыми, так как они имеют более низкую стоимость по сравнению со стержневыми трансформаторами из-за меньшего числа катушек и упрощения сборки и изготовления. Применяют также и маломощные трансформаторы стержневого типа с одной или двумя катушками (рис. 3; 3). Преимущество тороидальных трансформаторов – отсутствие в магнитной системе (рис. 3; 4) воздушных зазоров, что значительно уменьшает магнитное сопротивление магнитопровода. В трансформаторах малой мощности магнитопровод собирают из штамповых пластин П-, Ш- и О- образной формы (рис. 4, а, б, в).
Широкое применение получили магнитопроводы, навитые из узкой ленты электротехнической стали или из специальных железоникелевых сплавов типа пермаллой. Их можно использовать для стержневых, броневых, тороидальных и трёхфазных трансформаторов
Монолитность конструкции ленточного магнитопровода обеспечивается путём применения клеющих лаков и эмалей.
Для трансформаторов, работающих при частоте 400 и 500 Гц, магнитопроводы выполняют из специальных сортов электротехнической стали с малыми удельными потерями при повышенной частоте, а также из железоникелевых сплавов типа пермаллой, которые имеют большие начальную и максимальную магнитные проницаемости и позволяют получить магнитные поля с большой индукцией при сравнительно слабой напряжённости. Толщина листов составляет 0.2; 0,15; 0.1 и 0.08 мм. При частотах более10-20 кГц магнитопроводы прессуют из порошковых материалов (магнитодиэлектриков и ферритов).
Обмотки. В современных трансформаторах первичную (рис. 5; 1) и вторичную (рис. 1.5; 3, 4, 5) обмотки стремятся расположить для лучшей магнитной связи как можно ближе одну к другой. При этом на каждом стержне магнитопровода (рис. 5; 2) размещают обе обмотки либо концентрически – одну поверх другой (рис. 1.5 а), либо в виде нескольких дисковых катушек, чередующиеся по высоте стержня (рис. 5 б). В первом случае обмотки называют концентрическими, во втором – чередующимися. В силовых трансформаторах обычно применяют концентрические обмотки, причём ближе к стержням располагают обмотку НН, требующей меньшей изоляции относительно остова трансформатора, а снаружи – обмотку ВН.
В трансформаторах малой мощности и микротрансформаторах используют однослойные и многослойные обмотки из круглого провода с эмалевой или хлопчатобумажной изоляцией, которые наматывают на гильзу или на каркас из электрокартона (рис. 1.5; а); между слоями проводов прокладывают изоляцию из кабельной бумаги или ткани.

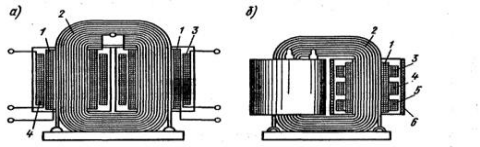


Рис. 5

В микротрансформаторах часто выполняют из алюминиевой фольги толщиной 30-20 мкм. Изоляцией здесь служит окисная плёнка фольги, которая обладает достаточной теплоёмкостью, теплопроводностью и может выдерживать рабочее напряжение до 100 В.

4. Идеализированный трансформатор

Для выяснения сущности физических процессов, происходящих в трансформаторе, рассмотрим идеализированный трансформатор, у которого магнитный поток Ф полностью замыкается по стальному магнитопроводу и сцеплен с обеими обмотками, а потери в стали отсутствуют. К

первичной обмотке трансформатора (рис. 6, а) подводится синусоидальное напряжение $u_1 = U_m \sin \omega t$, благодаря чему по этой обмотке проходит переменный ток, создающий переменный магнитный поток. Переменный поток наводит в обмотках трансформатора ЭДС

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

В режиме холостого хода цепь вторичной обмотки разомкнута и ток i_2=0. При этом для контура первичной обмотки трансформатора

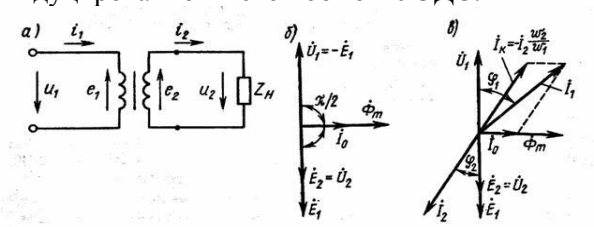
$$u_1 = i_1 R_1 + w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (6)$$

где: u_1 – мгновенное значение приложенного к первичной обмотке напряжения.

Уравнение (6) справедливо, если принять, что не только i_2=0, но и отсутствуют потери в стали магнитопровода (от вихревых токов и гистерезиса); иначе эти потери должны были бы учитываться в виде потерь от тока, проходящего по замкнутой накоротко вторичной обмотке с большим активны сопротивлением

Вводя в формулу (1.6) значение ЭДС $e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}$, индуцируемой в первичной обмотке переменным магнитным потоком, и пренебрегая падением напряжения в активном сопротивлении первичной обмотки i_1R_1 из-за его малости, получаем $u_1 + e_1 = 0$,

т.е. напряжение, приложенной к первичной обмотке, практически полностью уравновешивается индуцированной в этой обмотке ЭДС.



Если питающее напряжение u_1 – изменяется по синусоидальному закону $u_1 = U_m \sin \omega t$, то магнитный поток также изменяется синусоидально, отставая по фазе от приложенного напряжения на угол 90°,

$$\Phi = \int \frac{u_1}{w_1} dt = \frac{U_{1m}}{w_1} \int \sin \omega t \, dt = -\Phi_m \cos\omega t + C = \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Можно показать, что постоянная интегрирования в установившемся режиме C=0.

Связь между ЭДС и магнитным потоком определяется из уравнения

$$e_1 = -w_1 \frac{d}{dt}\left[\Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)\right] = -w_1 \omega \Phi_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = 2\pi f w_1 \Phi_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

и выражается для амплитудного значения ЭДС формулой $E_{1m} = 2\pi f w_1 \Phi_m$ или для действующего значения формулой

$$E_1 = 4{,}44 f w_1 \Phi_m.$$

Учитывая синусоидальный характер изменения напряжения u_1 и ЭДС e_1, уравнение (7) можно представить в комплексной форме:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 = 0.$$

Уравнение (9) справедливо для идеализированного трансформатора, в котором пренебрежимо мало активное сопротивление обмоток и отсутствуют потери в стали магнитопровода. Однако, несмотря на принятые допущения, оно правильно определяет сущность качественных процессов, происходящих в трансформаторе, и поэтому является одним из фундаментальных в теории электрических машин. Количественные ошибки, вызванные идеализацией трансформатора, можно всегда довольно легко подсчитать.

Предположив, что насыщение в стали трансформатора отсутствует и весь магнитный поток замыкается по стальному магнитопроводу, можно считать ток первичной обмотки идеализированного трансформатора прямо пропорциональным магнитному потоку. В связи с этим, на векторной диаграмме идеализированного трансформатора в режиме холостого хода (рис 1.6 ,б) ток холостого хода $\dot{I}_{10}$ изображён вектором, совпадающий по направлению с вектором

магнитного потока. $\dot{\Phi}_m$. На этой же диаграмме векторы ЭДС $\acute{E}_1$ и напряжения $\acute{U}_1$ показаны в противофазе в соответствии с уравнением 9), а вектор магнитного потока $\dot{\Phi}_m$ опережает вектор ЭДС на 90°. Поскольку магнитный поток не имеет действующего значения, на диаграмме показано его амплитудное значение. Там же показан вектор ЭДС $\acute{E}_2$ совпадающий по фазе с вектором $\acute{E}_1$, так как ЭДС $\acute{E}_2$ индуцируется тем же самым магнитным потоком, что и $\acute{E}_1$, и может быть определена по формуле

$$E_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi_m.$$

При работе под нагрузкой для первичной обмотки идеализированного трансформатора можно написать уравнение

$$u_1 = w_1 \frac{d\Phi_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_2}{dt} = w_1 \frac{d}{dt}(\Phi_1 + \Phi_2),$$

где: Φ_1 и Φ_2 – потоки, создаваемые токами первичной и вторичной обмоток.

Обозначая, как и при холостом ходе, $e_1 = -w_1 \frac{d}{dt}(\Phi_1 + \Phi_2)$, получаем

$$u_1 + e_1 = 0,$$

т.е. такое же соотношение, что и при холостом ходе. Очевидно, если первичное напряжение при нагрузке идеализированного трансформатора остаётся неизменным, то величина ЭДС e_1 такая же, как и при холостом ходе. Следовательно, результирующий поток при нагрузке равен потоку при холостом ходе:

$$\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_0,$$

или в комплексной форме

$$\dot{\Phi}_{m1} + \dot{\Phi}_{m2} = \dot{\Phi}_{m0}.$$

Неизменность магнитного потока при переходе от режима холостого хода к режиму нагрузки является важнейшем свойством трансформатора. Из этого свойства следует закон равновесия магнитодвижущих сил (МДС) в трансформаторе:

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_{10},$$

где: F_1 и F_2 – МДС, создаваемые первичной и вторичной обмотками трансформатора при нагрузке; F_{10} – МДС, создаваемая первичной обмоткой при холостом ходе.

При переменном токе оперируют с амплитудами МДС; при этом из (12) следует, что

$$\sqrt{2}\dot{I}_1 w_1 + \sqrt{2}\dot{I}_2 w_2 = \sqrt{2}\dot{I}_{10} w_1$$

Или

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + \left[-\dot{I}_2\left(\frac{w_2}{w_1}\right)\right].$$

Для наглядности уравнение (13) можно представить иначе:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + \dot{I}'_2,$$

где: $\dot{I}'_2 = -\dot{I}_2(w_2 / w_1)$ - нагрузочная составляющая тока первичной обмотки (приведенный ток нагрузки).

Таким образом, МДС, создаваемая током I'_2 равна по величине и противоположна по фазе МДС вторичной обмотки, т.е. компенсирует МДС вторичной обмотки. Это обуславливает неизменность магнитного потока трансформатора. Векторная диаграмма идеализированного трансформатора, работающего с нагрузкой, показана на (рис. 6, в). Мощность нагрузочной составляющей первичного тока равна мощности, отдаваемой трансформатором нагрузке, так как

$$I'_2 E_1 \cos\varphi_2 = I_2\left(\frac{w_2}{w_1}\right) E_2\left(\frac{w_1}{w_2}\right)\cos\varphi_2 = I_2 E_2 \cos\varphi_2.$$

Следовательно, нагрузочная составляющая тока I_1 не только уравновешивает МДС вторичной обмотками, но и обеспечивает поступление в трансформатор из сети мощности, отдаваемой приёмнику электрической энергии, подключённому к вторичной обмотке.

Основные закономерности работы идеализированного трансформатора справедливы и для реальных трансформаторов.

5. Намагничивающий ток и ток холостого хода

Намагничивающий ток. Величина и форма тока холостого хода определяются магнитным потоком трансформатора и свойствами его магнитной системы. Выше показано, что магнитный поток

изменяется во времени синусоидально: $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, а его амплитуда определяется ЭДС: $\Phi_m = \frac{E_1}{4{,}44 f w_1}$.

Так как при холостом ходе ЭДС практически равна напряжению, то значение магнитного потока определяется напряжением первичной обмотки, её числом витков и частотой.

Свойства магнитной системы трансформатора описываются в основном магнитной характеристикой, представляющей собой графическое изображение зависимости магнитного потока Ф от МДС трансформатора F или намагничивающего тока I_η, пропорционального МДС.

Активная составляющая тока холостого хода. Намагничивающий ток I_η является главной составляющей тока холостого хода трансформатора I_{10}. Этот ток является реактивным, т.е. $I_\eta = I_{10p}$. Однако реальный трансформатор в режиме холостого хода потребляет от источника переменного тока некоторую активную мощность, так как при переменном магнитном потоке в стальном магнитопроводе возникают потери энергии от гистерезиса и вихревых токов (магнитные потери ΔP_c). Поэтому ток холостого хода I_{10} должен иметь еще и активную составляющую $I_{10a} = \Delta P_c / U_1$, которая обеспечивает поступление в первичную обмотку мощности, компенсирующей магнитные потери (электрическими потерями в первичной обмотке в этом режиме можно пренебречь из-за малости тока холостого ход). Следовательно, ток холостого хода

(16) $$\dot{I}_{10} = \dot{I}_{10p} + \dot{I}_{10a} \text{ или } I_{10} = \sqrt{I_{10p}^2 + I_{10a}^2}.$$

Обычно при выполнении магнитопровода трансформатора из листовой электротехнической стали толщиной 0,28-0,50 мм и частоте 50 Гц активная составляющая тока I_{10a} не превышает 10% от тока I_{10}, поэтому она оказывает весьма малое влияние на значение ток холостого хода (изменяет его не более чем на 1%). Форма кривой тока холостого хода определяется в основном кривой намагничивающего тока.

Раздел 3. Машины постоянного тока

Тема 3.1. Устройство и принцип действия машин постоянного тока. Принцип действия генератора. Принцип действия двигателя.

1. Устройство машин постоянного тока

Электротехническая промышленность в настоящее время выпускает электрические машины постоянного тока для работы в различных условиях. На рисунке (1) приведены продольный и поперечный разрез машины нормального исполнения. Машина постоянного тока состоит из 2–х основных частей: неподвижной – статора и вращающейся – якоря. Между ними всегда имеется воздушный зазор.

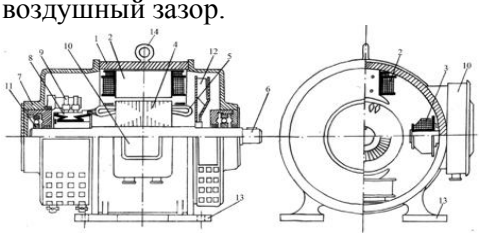


Рисунок 1— ДПТ в разрезе

Статор, являющийся индуктором, т.е. такой частью машины, в котором наводится магнитное поле, состоит из станины I, главных 2 и добавочных 3 полюсов. К статору относятся также подшипниковые щиты 7 с подшипниками 11. На статоре крепятся щеточный аппарат 9 и коробка выводов 10.

Якорь состоит из сердечника якоря 4 и коллектора 8, насаженных на вал 6. В машинах с самовентиляцией на валу крепится вентилятор 12.

Станина – служит в качестве магнитопровода и одновременно является конструктивной основой, к которой крепятся главные и добавочные полосы и подшипниковые щиты. Она представляет собой полый цилиндр, отлитый или сваренный из чугуна или стали. У крупных машин станина делается разъемной. На кораблях для удобства обслуживания и ремонта применяются также машины с поворотной станиной. Часть станины, по которой замыкаются магнитные потоки главных и добавочных полюсов, называется ярмом 1. Вместе со станиной отливаются лапы 13 для

крепления машины к фундаменту. На станине устанавливается один или несколько рымов 14 для подъема машины.

Главные полюсы предназначены для создания в машине магнитного потока необходимой величины. Главный полюс (рисунок 1.5) состоит из сердечника 1 и катушек обмоток возбуждения 2,3. Со стороны, обращенной к якорю, сердечник заканчивается полюсным наконечником 4, с помощью которого обеспечивается требуемое распределение магнитной индукции в воздушном зазоре.

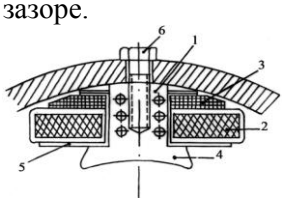


Рисунок 2.

Сердечник полюсов набирается из листов электротехнической стали толщиной 0,5÷1,0 мм., покрытых изоляционным лаком для уменьшения потерь от вихревых токов, вызванных пульсацией магнитного потока из–за зубчатости якоря. Листы стали спрессовывают и скрепляют шпильками. Катушки обмоток возбуждения наматываются на изолирующий каркас 5, а затем надеваются на сердечник. По отношению к обмотке якоря обмотки возбуждения могут включаться параллельно или последовательно. Катушки параллельной обмотки 2 состоят из большого числа витков провода малого сечения. Катушки последовательной обмотки 3 состоят из малого числа витков провода большого сечения, по которым проходит большой ток якоря. Для улучшения изоляции катушки компаундируют, т.е. пропитывают изоляционными лаками (компаундами) в вакууме при повышенной температуре, а затем сушат в специальных печах. Полюс в собранном виде крепится к станине болтами 6.

Добавочные полюсы служат для улучшения коммутации машины, т.е. обеспечивают безыскровую работу щеток и коллектора. Они состоят из сердечника 1 и полюсной катушки 5 (рисунок 1.6) и устанавливаются между главными полюсами по линии геометрической нейтрали. Сердечник имеет наконечник 2 определенной формы. Катушка изготавливается из полосовой меди большого сечения, так как она включается последовательно в цепь якоря и по ней проходит большой ток. Величина зазора δ между полюсом и якорем регулируется при наладке работы машины с помощью магнитных и немагнитных прокладок 4 между полюсом и станиной. Добавочные полюсы крепятся к станине болтами 3.

Якорь состоит из сердечника магнитопровода, обмотки 5, вала 6 и конструктивных деталей для их крепления.

Сердечник якоря представляет собой стальной цилиндр, набранный из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, которые изолируются друг от друга лаком для уменьшения потерь от вихревых токов.

В листах штампуются пазы для размещения в них обмотки якоря и отверстия для насаживания сердечника на вал якоря, для стяжных шпилек и осевой вентиляции. Пакет железа якоря крепится на валу шпонкой, а с торцов стягивается нажимными кольцами. В больших машинах якорь состоит из нескольких пакетов штампованных листов, между которыми делаются промежутки для лучшего охлаждения машины (радиальная вентиляция). Часть сердечника якоря, занятая пазами, называется зубцовой зоной.

Обмотка якоря выполняется из изолированного провода круглого или прямоугольного сечения. Она состоит из отдельных элементов – секций (рисунок 1.8), образованных из одного или нескольких витков.

Секции изготавливаются по шаблонам. Часть секции 1, заложенная в пазы сердечника якоря, называется пазовой или активной частью. Часть секции 2, расположенная вне сердечника – в воздухе и соединяющая активные части, называется лобовой частью (лобовые соединения). Концы секций припаиваются к коллекторным пластинам. Для крепления секций в пазах применяются деревянные, гетинаксовые или текстолитовые клинья. Кроме витковой изоляции обмотка имеет пазовую изоляцию от сердечника. Лобовые части закрепляются с помощью проволочного бандажа.

Электроизоляционные материалы, применяемые для изоляции обмоток, по степени термостойкости делятся на классы, которые допускают определенную температуру нагрева. В машинах постоянного тока применяются в основном классы А, В, С и Н. Коллектор (рисунок 1.9) набирается из медных пластин I, изолированных друг от друга и от вала, на котором он крепится, с

помощью миканитовых прокладок 8 и манжет 5,7. Состороны, обращенной к валу, пластины имеют форму ласточкиного хвоста 2. В два конусообразных углубления коллектора вставляются изолированные нажимные конусы 3,4, которые стягивают коллекторные пластины в осевом направлении. В собранном виде коллектор спрессовывают в горячем состоянии, после чего обтачивают для придания ему строго цилиндрической формы. В зависимости от размера якоря и коллектора концы секций обмотки впаиваются в коллекторные пластины непосредственно или через специ

Коллектор (рисунок 1.9) набирается из медных пластин I, изолированных друг от друга и от вала, на котором он крепится, с помощью миканитовых прокладок 8 и манжет 5,7. Состороны, обращенной к валу, пластины имеют форму ласточкиного хвоста 2.

В два конусообразных углубления коллектора вставляются изолированные нажимные конусы 3,4, которые стягивают коллекторные пластины в осевом направлении. В собранном виде коллектор спрессовывают в горячем состоянии, после чего обтачивают для придания ему строго цилиндрической формы. В зависимости от размера якоря и коллектора концы секций обмотки впаиваются в коллекторные пластины непосредственно или через специальные медные соединения – петушки 9. Коллектор жестко крепится на валу ротора рядом с сердечником якоря.

Щеточное устройство– предназначено для обеспечения электрической связи между неподвижными зажимами, соединенными с внешней цепью, и вращающейся обмоткой якоря (через коллектор) (

Оно состоит из щеток 1, щеткодержателей 3, пальцев 5, траверсы 6 и соединительных шин. Непосредственный контакт с коллектором 2 имеет щетка. Она выполняется обычно из специальным образом обработанной смеси угля, графита и других компонентов в виде прямоугольной призмы и помещается в обойму щеткодержателя 4. Щетка может перемещаться в обойме в радиальном по отношению к коллектору направлении и для плотного прилегания прижимается к нему пружиной через нажимной рычаг. Щеткодержатели крепятся к пальцам 5, которые заделываются в траверсу 6 через изоляционные втулки 7. На одном пальце может быть от 2 до 10 щеток, которые для равномерного износа коллектора располагаются на его поверхности в шахматном порядке и соединяются с пальцами медными гибкими тросиками. Число пальцев всегда равно числу главных полюсов. Пальцы, имеющие одинаковую полярность, соединяются посредством соединительной шины, от которой делается отвод в клемную коробку машины или к обмотке дополнительного полюса.

Траверса может крепиться к подшипниковым щитам, станине или фундаментной плите. Крепление позволяет поворачивать всю систему щеток относительно станины.

Клемная коробка. В клемной коробке устанавливается изоляционная панель с клеммами, к которым подсоединяются выводы обмоток машины для соединения с внешней электрической сетью.

2. Принцип действия машин постоянного тока

Электрическими машинами называются устройства, предназначенные для преобразования механической энергии вращения в электрическую (генератор) и наоборот, электрическую энергию в механическую (двигатель). Работа электрической машины основана на единстве закона электромагнитной индукции и закона электромагнитных сил.

Возьмем устройство, состоящее из двух магнитных полюсов создающих постоянное магнитное поле, и якоря – стального цилиндра с уложенным на нем витком из электропроводного материала. Концы витка присоединены к двум металлическим полукольцам, изолированным друг от друга и от вала. Полукольца соприкасаются с неподвижными щетками, соединенными с внешней цепью (рисунок 1.1).

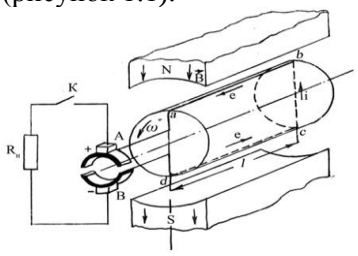


Рисунок 8

При вращении якоря в соответствии с законом электромагнитной индукции в проводниках витка ab и cd при пересечении ими магнитного поля будет индуктироваться ЭДС, которая при наличии стального цилиндра равна $e = BLV$,

где V – линейная скорость движения проводника относительно магнитного поля;

B – индукция магнитного поля;

L – длина активной части витка.

Направления ЭДС в проводниках ab и cd определяется по правилу правой руки. По контуру abcd эти ЭДС складываются и, так как верхний и нижний проводники находятся в одинаковых магнитных условиях, то ЭДС витка будет

$$e_b = 2e_{пр}.$$

Таким образом, в данных условиях характер изменения во времени ЭДС в проводнике при вращении определяется характером распределения индукции в зазоре. Распределение ее по окружности якоря неравномерное, так как магнитное сопротивление Rμ потоку различное. Под полюсами индукция B имеет максимальное значение, в промежутке между полюсами индукция уменьшается, достигая на линии qq нулевого значения (рисунок 1.2,а). Линия dd, проходящая через центр якоря вдоль полюсов, называется продольной осью машины, а линия qq, проходящая через центр якоря посредине между полюсами, называется поперечной осью. Поперечную ось также называют геометрической нейтралью. Часть окружности якоря, приходящуюся на один полюс, называет полюсным делением и обозначают τ.

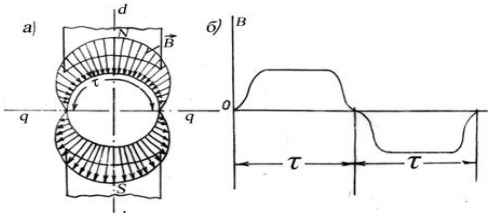


Рисунок 9

При вращении якоря через каждые полоборота проводники ab и cd оказываются в поле противоположных полюсов. Поэтому направление ЭДС в них меняется на противоположное. Таким образом, при вращении якоря в витке индуктируется переменная ЭДС (рисунок 1.2,б). Для получения во внешней цепи постоянного тока устанавливают специальный переключатель, называемый коллектором. Проводники ab и cd присоединяются к полукольцам, изолированным друг от друга и от вала. Полукольца (пластины коллектора) соприкасаются с неподвижными щетками, соединенными с внешней цепью. При вращении якоря каждая из щеток будет соприкасаться только с той коллекторной пластиной и соответственно только с тем из проводников, который находится под полюсом данной полярности. Направление ЭДС в витке изменяется на линии геометрической нейтрали и в это же момент происходит переключение полуколец к щеткам A и B. В результате полярность щеток в процессе работы машины остается неизменной, а ЭДС и ток во внешней цепи становятся постоянными по направлению и переменным» по величине (рисунок 1.3). Таким образом, коллектор играет роль механического переключателя сторон витка к щеткам, т.е. является выпрямителем. Чтобы сгладить пульсацию ЭДС и тока во внешней цепи, на якоре располагают несколько витков, присоединенных к соответствующим парам коллекторных пластин и сдвинутых относительно друг друга на некоторый угол. Практически уже при 16 витках на якоре пульсации тока становятся незаметными и ток во внешней цепи можно считать постоянными не только по направлению, но и по величине. Таким образом, мы получили генератор постоянного тока.

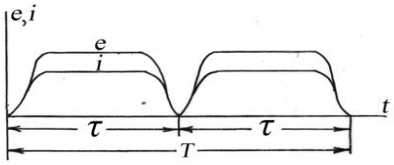


Рисунок 10

Рассмотрим работу данной системы в режиме двигателя. Если к щеткам приложить напряжение внешнего источника электроэнергии, то в витке потечёт ток. Согласно закону электромагнитных сил на каждую сторону витка будет действовать сила

$F_{ЭМ} = Bli$.

Эти силы создадут вращающий момент

$M = F_{ЭМ} Д_a$

Под действием этого момента якорь начнет вращаться, преодолевая момент сопротивления на валу. После прохождения сторонами витка линии геометрической нейтрали они попадают в зону полюса противоположной полярности. Но в это же время в них изменяется и направление тока, что осуществляется с помощью коллектора. В результате направление момента остается прежним, и якорь будет вращаться в том же направлении. В этом случае коллектор выполняет роль инвертора – преобразователя постоянного тока в переменный

1. Принцип действия генератора.

Простейший генератор можно представить в виде витка, вращающегося в магнитном поле (рис. 1.4, *а, б)*. Концы витка выведены на две пластины коллектора. К коллекторным пластинам прижимаются неподвижные щетки, к которым подключается внешняя цепь.

Принцип работы генератора основан на явлении электромагнитной индукции. Пусть виток приводится во вращение от внешнего приводного двигателя *ПД*. Проводники активной части витка пересекают магнитное поле и в них по закону электромагнитной индукции наводятся ЭДС e_1 и e_2, направление которых определяется по правилу правой руки.

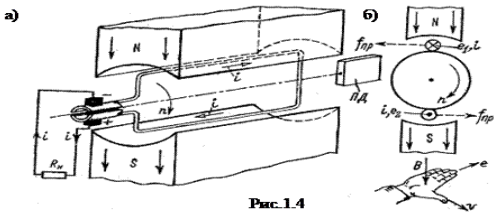


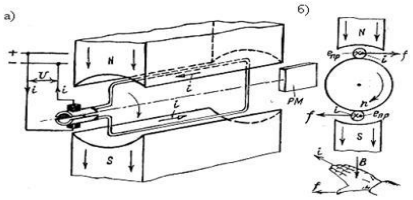
Рис.1.4

При вращении витка по направлению движения часовой стрелки в верхнем проводнике, находящемся под северным полюсом, ЭДС направлена от нас, а в нижнем, находящемся под южным полюсом, – к нам. По ходу витка ЭДС складываются, результирующая ЭДС $e = e_1 – e_2$.

Если внешняя цепь замкнута, то по ней потечет ток, направленный от нижней щетки к потребителю и от него – к верхней щетке. Нижняя щетка оказывается положительным выводом генератора, а верхняя – отрицательным. При повороте витка на 180° проводники из зоны одного полюса переходят в зону другого полюса и направление ЭДС в них изменяется на обратное. Одновременно верхняя коллекторная пластина входит в контакт с нижней щеткой, а нижняя – с верхней, направление тока во внешней цепи не изменяется. Таким образом, коллекторные пластины не только обеспечивают соединение вращающего витка с внешней цепью, но и выполняют роль переключающегося устройства, т. е. являются простейшим механическим выпрямителем.

2.2. Принцип действия двигателя

То же устройство работает в режиме электрического двигателя (рис. 1.5), если к щеткам подвести постоянное напряжение. Под действием напряжения *U* через щетки, пластины коллектора и виток потечет ток *i*. По закону электромагнитной силы (закон Ампера) взаимодействие тока и магнитного поля *B* создает силу *f*, которая направлена перпендикулярно *i*. Направление силы *f* определяется правилом левой руки (рис. 1.5): на верхний проводник сила действует вправо, на нижний – влево. Эта пара сил создает вращающий момент Мвр, поворачивающий виток по часовой стрелке. При переходе верхнего проводника в зону южного полюса, а нижнего – в зону северного полюса концы проводников и соединенные с ними коллекторные пластины вступают в контакт со щетками другой полярности.



Направление тока в проводниках витка изменяется на противоположное, а направление сил *f*,момента Мвр и тока во внешней цепи не изменяется. Виток непрерывно будет вращаться в магнитном поле и может приводить во вращение вал рабочего механизма (РМ).

Таким образом, коллектор в режиме двигателя не только обеспечивает контакт внешней цепи с витком, но и выполняет функцию механического инвертора, т.е. преобразует постоянный ток во внешней цепи в переменный ток в витке.

Рассмотрение принципа действия показывает, что машина постоянного тока может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя, т. е. обладает свойством обратимости.

Противодействующий момент и противо-ЭДС.

При работе машины в режиме генератора по замкнутой внешней цепи и витку обмотки якоря протекает ток, направление которого совпадает с направлением ЭДС (рис. 1.4,6), взаимодействие тока с магнитным полем полюсов создает момент*М,* направленный в рассматриваемом случае против часовой стрелки. Так как приложенный к витку вращающий момент приводного двигателя *Мвр* направлен по часовой стрелке, то возникающий при работе генератора момент называется противодействующим моментом *Мпр*. По существу возникновение *Мпр* — это реакция машины на воздействие внешнего момента *Мвр*, а физическая природа противодействующего момента та же, что и вращающего момента у двигателя. В установившемся режиме работы генератора между *Мвр* и *Мпр* устанавливается равновесие и *Мвр=Мпр.*

При работе машины в режиме двигателя проводники якоря пересекают магнитное поле и в них наводится ЭДС (рис. 1.5,б). Ее направление определяется по правилу правой руки. В рассматриваемом случае она направлена против тока и, следовательно, навстречу приложенному напряжению сети *U* и поэтому называется противо-ЭДС *Епр*. Физическая природа противо-ЭДС та же, что и ЭДС генератора. В установившемся режиме работы двигателя между *Епр* и *U* устанавливается равновесие и можно считать, что $Епр \approx U$.

Таким образом, при работе машины постоянного тока в любом режиме во вращающихся проводниках наводится ЭДС *Е* и возникает момент *М,* но роль их в разных режимах различная.

Тема 3.2. Электродвижущая сила якоря и электромагнитный момент. Магнитная цепь машины постоянного тока. Реакция якоря. Коммутация в машинах постоянного тока. Схемы включения машин постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения.

Электродвижущая сила якоря и электромагнитный момент

В соответствии с законом электромагнитной индукции в каждом отдельном проводнике обмотки якоря независимо от режима работы машины, индуктируется ЭДС

$$e_x = B_x l V$$

где e_x – ЭДС произвольно взятого проводника обмотки якоря;

B_x – магнитная индукция в месте размещения данного проводника;

L– длина якоря;

V – линейная скорость движения проводника.

Распределение индукции в воздушном зазоре на одном полюсном делении **τ** имеет примерно трапециидальный характер (рисунок 1), поэтому для определения ЭДС удобно воспользоваться средним значением магнитной индукции, приняв его равным высоте прямоугольника АВ´С´Д с основанием **τ**, площадь которого равна площади фигуры АВСД (см. рисунок)

$$B_{cp} = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} B_x dx$$

Тогда среднее значение ЭДС, индуктируемой в одном проводнике равно

$$E_{cp} = B_{cp} l V$$

Обмотка якоря состоит из N проводников, однако, как было показано выше, ЭДС обмотки на зажимах якоря равна ЭДС одной параллельной ветви, в которую входит N/2a последовательно соединенных проводников. Поэтому ЭДС обмотки якоря

$$E = E_a = E_{cp} \cdot \frac{N}{2a} = B_{cp} l V \cdot \frac{N}{2a}$$

где $V = \frac{\pi Д_a n}{60}$

– линейная скорость вращающегося якоря;

n – частота вращения якоря, об/мин;

$Д_a$ –диаметр якоря.

Длину окружности якоря можно выразить

$$\pi Д_a = 2p\tau$$.

Тогда

$$V = \frac{\tau \cdot 2p \cdot n}{60}$$

Подставив значение V в формулу для ЭДС получим

$$E = E_a = E_{cp} \cdot \frac{N}{2a} = B_{cp} l V \cdot \frac{N}{2a}$$

Здесь произведение ***l·τ=S*** представляет собой площадь, которую пронизывает магнитный поток Ф под одним полюсом. Поэтому $B_{cp} l \cdot \tau = B_{cp} \cdot S = \Phi$

Следовательно $E = \frac{pN}{60a} \cdot \Phi \cdot n$

где $\frac{pN}{60a} = C_e$

– для данной машины есть величина постоянная.

Отсюда $E = C_e \Phi n$

Таким образом, ЭДС машины, индуктируемая в проводниках обмотки якоря зависит от магнитного потока и частоты вращения якоря. Изменяя их, можно изменять величину ЭДС.

В соответствии с законом электромагнитных сил на каждый отдельный проводник обмотки якоря независимо от режима работы машины действует сила равная

$$f_x = B_x \cdot l \cdot i_a;$$

где **f_x** – сила действующая на произвольно взятый проводник обмотки якоря;

B_x – магнитная индукция в месте размещения данного проводника;

L – длина активной стороны проводника якоря;

i_a– ток секции якоря.

Сила **f_x** создает на валу машины момент, который равен

$$M_x = f_x \cdot \frac{Д_a}{2} = B_x \cdot l \cdot i_a \cdot \frac{Д_a}{2}$$

В реальной машине под каждым полисом находится **N/2p** проводников, поэтому общий момент будет равен сумме всех моментов, создаваемых каждым проводником под полюсом умноженным на число полюсов 2р

$$M_a = 2p \int_{x=1}^{N/2p} M_x = 2pli_a \int_{x=1}^{N/2p} B_x$$

При достаточно большом числе проводников величина суммы $\int_{x=1}^{N/2p} B_x$ равна среднему значению индукции**B_{cp}**, умноженному на число проводников под одним полюсным делением

$$\int_{x=1}^{N/2p} B_x = B_{cp} \frac{N}{2p}$$

где по аналогии с ЭДС

$$B_{cp} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} B_x dx$$

Кроме того, известно, что

$$i_a = \frac{I_a}{2a}$$

Подставим выражения в формулу момента

$$M_a = 2pl \frac{I_a}{2a} \cdot \frac{Д_a}{2} \cdot B_{cp} \cdot \frac{N}{2p}$$

В этом выражении можно заменить

$$B_{cp} l\tau = B_{cp} \cdot S = \Phi \text{ и } \pi Д_a = 2p\tau$$

откуда

$$Д_a = \frac{2p\tau}{\pi}.$$

Тогда момент машины будет

$$M_a = \frac{pN}{2\pi \cdot a} \cdot I_a \cdot \Phi$$

где

$$\frac{pN}{2\pi \cdot a} = C_м$$

– для данной машины величина постоянная, зависящая от конструкции.

Следовательно

$$M_a = C_м \cdot I_a \cdot \Phi .$$

Таким образом, из полученного выражения видим, что электромагнитный момент машины постоянного тока зависит от тока в якоре, магнитного потока и постоянной величины $\mathbf{C_м}$.

4. Магнитная цепь машины постоянного тока

Для получения в машине постоянного тока номинальных данных в ней необходимо наличие магнитного потока **Ф**. Требуемая величина магнитного потока может быть определена из формулы

$$\Phi = \frac{E}{c_1 n}$$

Магнитный поток в машинах постоянного тока создается под действием магнитодвижущей силы (МДС) обмоток возбуждения главных полюсов. Магнитный поток замыкается в машине между разноименными полюсами по определенному пути, который называется магнитной цепью машины.На рисунке 1.25 показана магнитная цепь пары полюсов четырехполюсной машины. Магнитная цепь машины обычно симметрична и имеет пять характерных однородных участков: главные полюса $\mathbf{h_п}$, воздушный зазор**δ**, зубцы якоря $\mathbf{h_z}$, сердечник якоря $\mathbf{l_я}$ и станину $\mathbf{l_c}$ машины. Поток, создаваемый каждым из полюсов,, делится относительно продольной оси полюса на две части, образующие вместе с соседними полюсами два одинаковых магнитных контура. Число таких контуров равно числу полюсов. Расчет магнитной цепи машины постоянного тока заключается в определении МДС, необходимой для создания под полюсами машины основного магнитного потока требуемой величины. Расчет ведут обычно на одну пару полюсов ввиду симметричности машины. Магнитную цепь можно рассчитать на основе закона полного тока для средней магнитной линии

$$\oint \overline{H} d\overline{l} = \sum I$$

где $\overline{H}$ – напряженность магнитного поля;

$d\overline{l}$ – элемент длины магнитной линии;

$\sum I$ – полный ток, охватываемый магнитной линией.

Предположив, что на протяжении каждого однородного участка **H** постоянна, заменяем интеграл суммой

$$\sum H_k \cdot l_k = \sum I = F_0$$

где $\mathbf{H_k}$– напряженность магнитного поля в каждом однородном участке;

$\mathbf{l_k}$ – средняя длина однородного участка;

$\mathbf{F_0}$ – полная МДС пары полюсов, действующая в контуре цепи.

Таким образом, общую МДС, действующую в контуре, можно представить суммой МДС, необходимых для проведения магнитного потока на заданных участках

$$F_0 = F_п + F_\delta + F_z + F_я + F_c =$$
$$= H_p 2l_п + H_л 2l_л \cdot K_л + H_z 2h_z + H_я l_я + H_c l_c$$

Коэффициент $\mathbf{K_\delta}$ учитывает возрастание среднего воздушного зазора, называется коэффициентом воздушного зазора (коэффициентом Картера) и равен 1,1÷1,5. Величину напряженности поля в К–ом участке можно определить по формуле

$$H_k = \frac{B_k}{\mu_k}$$

где $\mathbf{B_k}$ – индукция магнитного поля в участке;

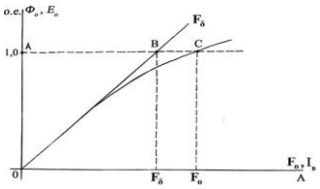
$\mathbf{\mu_k}$ – магнитная проницаемость участка.

Для участков из ферромагнитных материалов $\mathbf{H}_k$ находится по кривым намагничивания $\boldsymbol{B = f\ (H)}$, так как для них $\boldsymbol{\mu = var}$.

Индукцию $\mathbf{B_k}$ определяют по величине потока $\mathbf{\Phi_k}$ и сечению участка $\mathbf{S_k}$

$$B_k = \frac{\Phi_k}{S_k}$$

Подставив найденные значения $\mathbf{H}_k$ и $\mathbf{l_k}$ в формулу общей МДС получим полную МДС пары полюсов.Расчетное значение МДС возбуждения зависит от потока **Ф**, который необходимо создать в машине. Задаваясь различными значениями основного потока, например 0,5Ф, 0,75Ф, 1,0Ф, 1,25Ф можно рассчитать соответствующие им МДС обмотки возбуждения и построить графически зависимость $\mathbf{\Phi = f\ (F_o)}$.



Эта зависимость (рис.2) носит название характеристики намагничивания машины. Степень насыщения магнитной системы машины характеризуется коэффициентом насыщения, который находится расчетным путем или из кривой намагничивания

$$K_\mu = \frac{F_0}{F_л} = \frac{AC}{AB}.$$

Коэффициент насыщения для различных машин находится в пределах 1,25÷1,75. Характеристика намагничивания, выраженная в другом масштабе, представляет собой характеристику холостого хода машины$\mathbf{E_o = f\ (I_в)}$, т.е. зависимость ЭДС от тока возбуждения при постоянной частоте вращения **n = const** .

5. Реакция якоря

При работе машины постоянного тока в режиме холостого хода (I_a =0) ток в обмотке якоря практически отсутствует и в магнитной цепи машины действует лишь одна МДС обмотки возбуждения F_o. Магнитное поле машины в этом случае является симметричным относительно полюсов и не зависит от направления вращения машины и расположения щеток на коллекторе

Обмотка возбуждения является сосредоточенной на главных полюсах и любая замкнутая магнитная линия основного потока охватывает всю сумму токов обмотки. МДС такой обмотки в пределах полюсного деления τпостоянна и равна F_o/τ (рис. 1.б). Распределение магнитной индукции поля вдоль окружности якоря зависит от величины воздушного зазора и приближенно показано на рис. 1.б.

При нагрузке машины по обмотке якоря протекает ток, который создает собственное магнитное поле. Поэтому магнитный поток в воздушном зазоре и пространственное распределение магнитного поля при нагрузке машины будет определяться совместным намагничивающим действием полюсов и якоря. Магнитный поток и распределение результирующего поля в воздушном зазоре будут уже иными, чем при холостом ходе. Воздействие МДС якоря F_a на основное магнитное поле машины называется реакцией якоря.

Как видно из этого рисунка поле при нагрузке смещается по направлению вращения в генераторе (Г) и против направления вращения в двигателе (М), распределяясь несимметрично относительно оси полюсов. Под набегающим краем полюса генератора поле ослабляется, а под сбегающим усиливается. В двигательном режиме наоборот. Под воздействием поперечной реакции якоря физическая нейтраль (т.е. действительная, на которой B=0) смещается на некоторый угол β и занимает положение mm . У современных машин с добавочными полюсами щетки устанавливаются на геометрической нейтрали. Однако вследствие неточной установки щеточной траверсы может иметь место некоторый сдвиг щеток относительно геометрической нейтрали. В этом случае распределение токов якоря относительно главных полюсов становится несимметричным

МДС якоря $\mathbf{F_a}$, направленную всегда по линии щеток, можно разделить на иве составляющие: поперечную$\mathbf{F_{aq}}$, направленную по оси **qq**, образующую поперечную реакцию якоря и продольную $\mathbf{F_{ad}}$, направленную вдоль оси **dd**, создающую продольную реакцию якоря. При сдвиге щеток с нейтрали в направлении вращения якоря продольная МДС якоря генератора действует

навстречу МЛС возбуждения, т.е. размагничивает машину; при сдвиге щеток против вращения действует согласно с МДС возбуждения, т.е. намагничивает машину. В двигательном режиме получается обратная картина.
При сдвиге щеток с геометрической нейтрали возникает также реакция добавочных полюсов. В генераторах она воздает размагничивающий эффект при сдвиге щеток по направлению вращения якоря и намагничивающие – при сдвиге против вращения якоря. Добавочные полюса в этом случае начинают частично выполнять роль главных полюсов.
Таким образом, под действием реакции якоря происходит изменение магнитного потока машины и перераспределение поля в воздушном зазоре. Это оказывает влияние на мгновенные значения ЭДС. отдельных секций якоря и результирующую ЭДС его обмотки. Для устранения вредного влияния реакции якоря на работу машины используются добавочные полюсы, последовательная и компенсационная обмотки.

6. Коммутация в машинах постоянного тока

При вращении якоря секции обмотки непрерывно переходят из одной параллельной ветви в другую и в них происходит изменение направления тока. Процесс переключения секции из одной параллельной ветви в другую называется коммутацией. В широком смысле слова под коммутацией понимают совокупность явлений, связанных с изменением направления тока в секциях при переходе их из одной параллельной ветви в другую, и передачей тока через скользящий контакт между коллектором и щеткой. Процессы, возникающие при этом в секциях и под щетками, называются коммутационными. Переключаемая секция называется коммутируемой, а время в течение которого происходит процесс коммутации — периодом коммутации Т. Коммутацию рассмотрим на примере простой петлевой обмотки

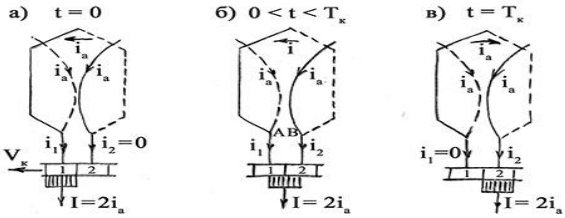


Рис.1 — Коммутация простой петлевой обмотки — процесс переключения одной секции

Процесс переключения одной секции показан на рис.1 при условии, что ширина щеток $b_щ$ равна ширине коллекторной пластины b_k. В реальной машине щетка перекрывает несколько пластин и процесс коммутации происходит сразу в нескольких секциях. За время переключения сила тока в короткозамкнутой (коммутирующей) секции изменяется от значения i_a до того же значения в обратном направлении т.е. от $+i_a$до $-i_a$. Установим закон изменения коммутационного тока, причины и следствия его изменения. При вращении коллектора пластина I постепенно сбегает со щетки, а пластина 2 набегает на щетку, происходит замыкание секции щеткой через коллекторные пластины I и 2 накоротко. Для контура короткозамкнутой секции можно составить уравнение ЭДС по второму закону Кирхгофа.

$$\sum e = \sum iR_k$$

где $\sum e$ – сумма ЭДС индуктируемых в коммутируемой секции ;
i – ток в коммутируемой секции ;
R_k– активное сопротивление K–го участка контура.
В коммутируемой секции индуктируется ЭДС самоиндукции e_L, вызванная изменением тока в секции, ЭДС взаимоиндукции e_M, вызванная изменением тока в соседних одновременно коммутируемых секциях, коммутирующей ЭДС e_k, возникающей в секции за счет пересечения ее результирующим полем или полем добавочных полюсов. Кроме того возникает трансформаторная ЭДС e_τ, вызванная пульсацией во времени магнитного потока Ф из–за зубчатости якоря.
Однако она мала и ее в дальнейшем не учитываем.
Сумму ЭДС самоиндукции и взаимоиндукции называют реактивной ЭДС

$$e_p = e_L + e_M$$

Она равна

$$e_p = -(L_c + M_c)\frac{di}{dt} = -L_k\frac{di}{dt}$$

где L_c– индуктивность секции ;
M_c– взаимная индуктивность секции;
$L_k=L_c+M_c$ –эквивалентная индуктивность секции.
По закону Ленца реактивная ЭДС направлена таким образом, чтобы препятствовать изменению тока в коммутируемой секции.
ЭДС e_k может действовать как согласно с e_p, так и встречно. Это зависит от направления внешнего магнитного поля в зоне коммутации, то есть

$$\sum e = e_p \pm e_k$$

Активное сопротивление щеточного контакта значительно больше других сопротивлений контура короткозамкнутой секции. Поэтому для упрощения будем учитывать только сопротивления $R_{щ1}$ и $R_{щ2}$ – контактные сопротивления сбегающего и набегающего краев щетки. Тогда

$$\sum e = e_p \pm e_k = i_1 R_{щ1} - i_2 R_{щ2}$$

По первому закону Кирхгофа для узлов А и В можно записать

$$i_1 = i_a + i\,, \qquad i_2 = i_a - i\,.$$

Решая совместно уравнения получим

$$i = i_a\frac{R_{щ2} - R_{щ1}}{R_{щ1} + R_{щ2}} + \frac{\sum e}{R_{щ1} + R_{щ2}}$$

Переходные сопротивления $R_{щ1}$ и $R_{щ2}$ обратно пропорциональны площадям касания щетки с коллекторными пластинами и, если учесть, что эти площади изменяются пропорционально времени коммутации, то получим

$$R_{щ1} = R_{щ} \cdot \frac{S_{щ}}{S_{щ1}} = R_{щ}\frac{T_k}{T_k - t};$$

$$R_{щ2} = R_{щ} \cdot \frac{S_{щ}}{S_{щ2}} = R_{щ}\frac{T_k}{t},$$

Где $R_{щ}$ – сопротивление переходного контакта всей поверхности щетки ;
$S_{щ}$ – полная площадь контакта щетки с коллектором ;
$S_{щ1}$, $S_{щ2}$ – площади сбегающего и набегающего контакта щеток с коллектором;
Тк – период коммутации ;
t– промежуток времени от начала коммутации.
Подставляя значение $R_{щ1}$ и $R_{щ2}$ в уравнение, найдем

$$i = i_a\left(1 - 2\frac{t}{T_k}\right) + \frac{\sum e}{R_{щ}T_k^2}(T_k - t)t\,.$$

Анализируя уравнения видим, что если коммутирующая ЭДС e_k будет равна реактивной ЭДС e_p, и направлена навстречу ей, то вторая составляющая коммутационной силы тока будет равна нулю, так как $\sum e$ =0 и сила тока будет изменяться по линейному закону

$$i = i_a\left(1 - 2\frac{t}{T_k}\right) = i_л$$

График этой функции представлен на рис.2. Токи i_1 и i_2, текущие через коллекторные пластины изменяются во времени линейно. Коммутация с таким характером изменения токов называется прямолинейной. Плотность тока по всей площади будет одинаковой. Это наиболее благоприятная коммутация.

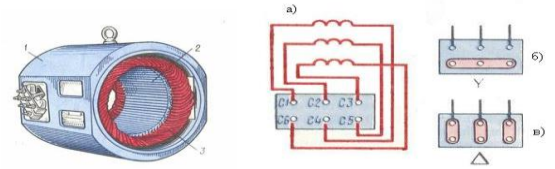
При $\sum e$ = 0 ток в секции i представляет сумму двух составляющих: линейного тока $i_л$ и так называемого добавочного тока коммутации $i_к$, определяемого величиной $\sum e$.
При $e_к<e_р$ добавочная сила тока $i_к$, накладываясь на силу тока линейной коммутации $i_л$, будет задерживать изменение тока в секции и она сначала будет изменяться медленнее (кривая I рис.3), чем при линейной коммутации. Такой процесс изменения силы тока в коммутируемой секции называется замедленной криволинейной коммутацией. Она характеризуется неравномерным

распределением тока под щеткой. Под сбегающим краем щетки плотность будет больше, чем род набегающим. Это приведет к искрообразованию на коллекторе.
При $e_к > e_р$ добавочная сила тока $i_к$ накладываясь на $i_л$будет ускорять изменение тока i в секции и процесс коммутации пойдет быстрее, чем при линейной коммутации (кривая 2 рис.3). Такая коммутация называется ускоренной криволинейной коммутацией. В этом случае добавочный ток будет увеличивать плотность тока под набегающим краем щетки и уменьшать под сбегающим, создавая неравномерную плотность тока. Это также приводит к искрообразованию на коллекторе.Таким образом, состояние коммутации определяется, главным образом, значением тока $i_к$, величина которого зависит от суммарной ЭДС и сопротивления переходного контакта щетки $R_щ$.
В соответствии с нормами (ГОСТ 183-74) искрение на коллекторе электрической машины должно оцениваться по степени искрения под сбегающим краем щётки и по шкале (классам коммутации). Электрические машины,предназначенные для работы в длительном режиме, при номинальной нагрузке должны практически работать без искрения (допустимая степень искрения должна быть не выше 1 ½). У электрических машин, работающих в кратковременном и повторно-кратковременном режимах, при номинальной нагрузке может быть допущена степень искрения (класс коммутации)
В крупных машинах на большую силу тока доска зажимов отсутствует и выводные концы прикрепляют к нижней части станины машины, причем выводные концы последовательной цепи выполняют в виде шин, а параллельной – в виде кабелей с наконечниками; выводят зажим якоря Я1, зажим компенсационной обмотки К2, и Ш2, уравнительной обмотки У1иУ2 и других специальных обмоток.

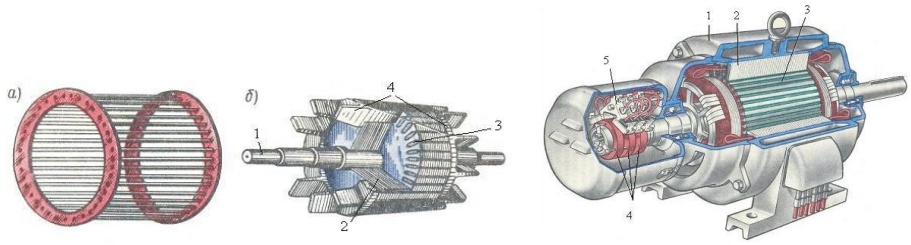
Раздел 4. Асинхронные машины

Тема 4.1. Устройство трехфазной асинхронной машины. Получение вращающегося магнитного поля. Режимы работы трехфазной асинхронной машины. Режим двигателя. Режим генератора. Режим электромагнитного тормоза

Устройство трёхфазной асинхронной машины
Неподвижная часть машины называется статор, подвижная – ротор. Сердечник статора набирается из листовой электротехнической стали и запрессовывается в станину. На рис. 1 показан сердечник статора в сборе. Станина (1) выполняется литой, из немагнитного материала. Чаще всего станину выполняют из чугуна или алюминия. На внутренней поверхности листов (2), из которых выполняется сердечник статора, имеются пазы, в которые закладывается трёхфазная обмотка (3). Обмотка статора выполняется в основном из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения, реже – из алюминия.
Обмотка статора состоит из трёх отдельных частей, называемых фазами. Начала фаз обозначаются буквами c_1, c_2, c_3, концы – c_4, c_5, c_6. Начала и концы фаз выведены на клеммник (рис. 2.а), закреплённый на станине. Обмотка статора может быть соединена по схеме звезда (рис. 2.2.б) или треугольник (рис. 2.2.в). Выбор схемы соединения обмотки статора зависит от линейного напряжения сети и паспортных данных двигателя. В паспорте трёхфазного двигателя задаются линейные напряжения сети и схема соединения обмотки статора. Например, 660/380, Y/Δ. Данный двигатель можно включать в сеть с $U_л = 660$В по схеме звезда или в сеть с $U_л = 380$В – по схеме треугольник. Основное назначение обмотки статора – создание в машине вращающего магнитного поля



Сердечник ротора (рис 3.б) набирается из листов электротехнической стали, на внешней стороне которых имеются пазы, в которые закладывается обмотка ротора. Обмотка ротора бывает двух видов: **короткозамкнутая** и **фазная**. Соответственно этому асинхронные двигатели бывают с короткозамкнутым ротором и фазным ротором (с контактными кольцами).

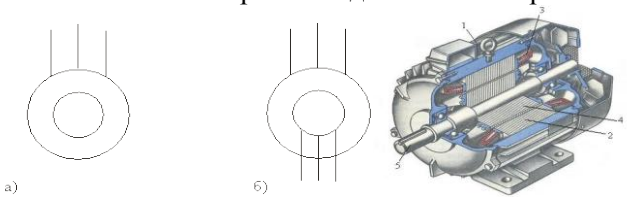


Короткозамкнутая обмотка (рис. 3) ротора состоит из стержней 3, которые закладываются в пазы сердечника ротора. С торцов эти стержни замыкаются торцевыми кольцами 4. Такая обмотка напоминает “беличье колесо” и называют её типа “беличьей клетки” (рис. 3.а). Двигатель с короткозамкнутым ротором не имеет подвижных контактов. За счёт этого такие двигатели обладают высокой надёжностью. Обмотка ротора выполняется из меди, алюминия, латуни и других материалов.

Доливо-Добровольский первым создал двигатель с короткозамкнутым ротором и исследовал его свойства. Он выяснил, что у таких двигателей есть очень серьёзный недостаток – ограниченный пусковой момент. Доливо-Добровольский назвал причину этого недостатка – сильно закороченный ротор. Им же была предложена конструкция двигателя с фазным ротором.

На рис. 4 приведен вид асинхронной машины с фазным ротором в разрезе: 1 – станина, 2 – обмотка статора, 3 – ротор, 4 – контактные кольца, 5 – щетки.

У фазного ротора обмотка выполняется трёхфазной, аналогично обмотке статора, с тем же числом пар полюсов. Витки обмотки закладываются в пазы сердечника ротора и соединяются по схеме звезда. Концы каждой фазы соединяются с контактными кольцами, закреплёнными на валу ротора, и через щётки выводятся во внешнюю цепь. Контактные кольца изготавливают из латуни или стали, они должны быть изолированы друг от друга и от вала. В качестве щёток используют металлографитовые щётки, которые прижимаются к контактным кольцам с помощью пружин щёткодержателей, закреплённых неподвижно в корпусе машины. На рис. 5 приведено условное обозначение асинхронного двигателя с короткозамкнутым (а) и фазным (б) ротором.



На рис. 6 приведен вид асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в разрезе: 1 – станина, 2 – сердечник статора, 3 – обмотка статора, 4 – сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой, 5 – вал.

На щитке машины, закреплённом на станине, приводятся данные: $P_н$, $U_н$, $I_н$, $n_н$, а также тип машины.

$P_н$ – это номинальная полезная мощность (на валу)

$U_н$ и $I_н$ – номинальные значения линейного напряжения и тока для указанной схемы соединения. Например, 380/220, Y/Δ, $I_н$Y/$I_н$Δ.

$n_н$ – номинальная частота вращения в об/мин.

Тип машины, например, задан в виде 4АН315S8. Это асинхронный двигатель (А) четвёртой серии защищённого исполнения. Если буква Н отсутствует, то двигатель закрытого исполнения.

315 – высота оси вращения в мм;

S – установочные размеры (они задаются в справочнике);

8 – число полюсов машины.

3. Получение вращающегося магнитного поля

Условия получения:

наличие не менее двух обмоток;

токи в обмотках должны отличаться по фазе

оси обмоток должны быть смещены в пространстве.

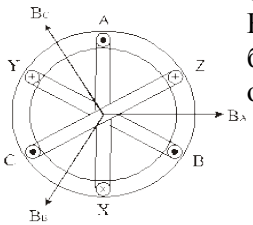


Рис. 2.7

В трёхфазной машине при одной паре полюсов ($p = 1$) оси обмоток должны быть смещены в пространстве на угол 120°, при двух парах полюсов ($p = 2$) оси обмоток должны быть смещены в пространстве на угол 60° и т.д.

Рассмотрим магнитное поле, которое создаётся с помощью трёхфазной обмотки, имеющей одну пару полюсов ($p = 1$) (рис.7). Оси обмоток фаз смещены в пространстве на угол 120° и создаваемые ими магнитные индукции отдельных фаз (B_A, B_B, B_C) смещены в пространстве тоже на угол 120°.

Магнитные индукции полей, создаваемые каждой фазой, как и напряжения, подведённые к этим фазам, являются синусоидальными и отличаются по фазе на угол 120°.

Приняв начальную фазу индукции в фазе A (φ_A) равной нулю, можно записать:

$B_A = B_m \sin(\omega t)$,

$B_B = B_m \sin(\omega t - 120°)$,

$B_C = B_m \sin(\omega t - 240°)$.

Магнитная индукция результирующего магнитного поля определяется векторной суммой этих трёх магнитных индукций. $\dot{\mathbf{B}} = \dot{\mathbf{B}}_A + \dot{\mathbf{B}}_B + \dot{\mathbf{B}}_C$.

Как следует из рис. 2.8, магнитная индукция B результирующего магнитного поля машины вращается, оставаясь неизменной по величине. Таким образом, трёхфазная обмотка статора создаёт в машине круговое вращающееся магнитное поле. Направление вращения магнитного поля зависит от порядка чередования фаз. Величина результирующей магнитной индукции

$B = 3/2 \times B_m$.

Частота вращения магнитного поля n_0 зависит от частоты сети f и числа пар полюсов магнитного поля p.

$n_0 = (60f)/p$, [об/мин].

Обратите внимание, что частота вращения магнитного поля не зависит от режима работы асинхронной машины и её нагрузки.

При анализе работы асинхронной машины часто используют понятие о скорости вращения магнитного поля ω_0, которая определяется соотношением:

$\omega_0 = (2\pi f)/p = \pi n_0/30$, [рад/сек]

4. Режимы работы трёхфазной асинхронной машины

Асинхронная машина может работать в режимах двигателя, генератора и электромагнитного тормоза.

Режим двигателя

Этот режим служит для преобразования потребляемой из сети электрической энергии в механическую.

Пусть обмотка статора создаёт магнитное поле, вращающееся с частотой n_0 в указанном направлении (рис. 9). Это поле будет наводить согласно закону электромагнитной индукции в обмотке ротора ЭДС. Направление ЭДС определяется по правилу правой руки и показано на рисунке (силовые линии должны входить в ладонь, а большой палец нужно направить по направлению движения проводника, т.е. ротора, относительно магнитного поля). В обмотке ротора появится ток, направление которого примем совпадающим с направлением ЭДС. В результате взаимодействия обмотки ротора с током и вращающегося магнитного поля возникает электромагнитная сила F. Направление силы определяется по правилу левой руки (силовые линии должны входить в ладонь, четыре пальца – по направлению тока в обмотке ротора). В данном режиме (рис. 9) электромагнитная сила создаст вращающий момент, под действием которого ротор начнёт вращаться с частотой n. Направление вращения ротора совпадает с направлением вращения магнитного поля. Чтобы изменить направление вращения ротора (реверсировать двигатель), нужно изменить направление вращения магнитного поля. Для реверса двигателя нужно изменить порядок чередования фаз подведённого напряжения, т.е. переключить две фазы.

Пусть под действием электромагнитного момента ротор начал вращаться с частотой вращения магнитного поля ($n = n_0$). При этом в обмотке ротора ЭДС E_2 будет равна нулю. Ток в обмотке ротора $I_2 = 0$, электромагнитный момент M тоже станет равным нулю. За счёт этого ротор станет вращаться медленнее, в обмотке ротора появится ЭДС, ток. Возникнет электромагнитный момент. Таким образом, в режиме двигателя ротор будет вращаться несинхронно с магнитным полем. Частота вращения ротора будет изменяться при изменении нагрузки на валу. Отсюда появилось название двигателя – асинхронный (несинхронный). При увеличении нагрузки на валу двигатель должен развивать больший вращающий момент, а это происходит при снижении частоты вращения ротора. В отличие от частоты вращения ротора частота вращения магнитного поля не зависит от нагрузки. Для сравнения частоты вращения магнитного поля n_0 и ротора n ввели

коэффициент, который назвали скольжением и обозначили буквой S. Скольжение может измеряться в относительных единицах и в процентах.

$S = (n_0 - n) / n_0$ или $S = [(n_0 - n) / n_0]\,100\%$.

При пуске в ход асинхронного двигателя $n = 0$, $S = 1$. В режиме идеального холостого хода $n = n_0$, $S = 0$. Таким образом, в режиме двигателя скольжение изменяется в пределах:

$0 < S \leq 1$.

При работе асинхронных двигателей в номинальном режиме:

$S_н = (2 \div 5)\,\%$.

В режиме реального холостого хода асинхронных двигателей:

$S_{хх} = (0{,}2 \div 0{,}7)\,\%$.

Режим генератора

Этот режим служит для преобразования механической энергии в электрическую, т.е. асинхронная машина должна развивать на валу тормозной момент и отдавать в сеть электрическую энергию. Асинхронная машина переходит в режим генератора, если ротор начинает вращаться быстрее магнитного поля ($n > n_0$). Этот режим может наступить, например, при регулировании частоты вращения ротора.

Пусть $n > n_0$. При этом изменится (по сравнению с режимом двигателя) направление ЭДС и тока ротора, а также изменится направление электромагнитной силы и электромагнитного момента (рис. 10). Машина начинает развивать на валу тормозной момент (потребляет механическую энергию) и возвращает в сеть электрическую энергию (изменилось направление тока ротора, т.е. направление передачи электрической энергии).

При $n > n_0$, $S = 0$.

При $n \to +\infty$, $S \to -\infty$.

Таким образом, в режиме генератора скольжение изменяется в пределах:

$0 > S > -\infty$.

Режим электромагнитного тормоза

Этот режим работы наступает, если ротор и магнитное поле вращаются в разные стороны. Этот режим работы имеет место при реверсе асинхронного двигателя, когда изменяют порядок чередования фаз, т.е. изменяется направление вращения магнитного поля, а ротор по инерции вращается в прежнем направлении.

Согласно рис. 11 электромагнитная сила будет создавать тормозной электромагнитный момент, под действием которого будет снижаться частота вращения ротора, а затем произойдёт реверс.

В режиме электромагнитного тормоза машина потребляет механическую энергию, развивая на валу тормозной момент, и одновременно потребляет из сети электрическую энергию. Вся эта энергия идёт на нагрев машины.

При $n = n_0$, $S = 1$.

При $n \to -\infty$, $S \to +\infty$.

Таким образом, в режиме электромагнитного тормоза скольжение изменяется в пределах:

$0 < S < \infty$.

Тема 4.2. Электромагнитный момент асинхронной машины. Зависимость электромагнитного момента от скольжения. Механическая характеристика асинхронного двигателя. Пуск в ход асинхронного двигателя. Использование двигателей с улучшенными пусковыми свойствами

Электромагнитный момент асинхронной машины

Электромагнитный момент возникает при наличии магнитного поля, создаваемого обмоткой статора, и тока в обмотке ротора. Можно показать, что электромагнитный момент определяется соотношением:

$M = C\,\Phi\,I_2 \cos\psi_2$.

Здесь: $C = 3 \times 4{,}44 f \dfrac{w_2 к_2}{\omega_0} = \dfrac{3}{\sqrt{2}} w_2 к_2 p$ – конструктивный коэффициент;

$\omega_0 = 2\pi f / p$ – скорость вращения магнитного поля;

ψ_2 – сдвиг по фазе между ЭДС и током ротора;

$I_2 \cos\psi_2$ – активная составляющая тока ротора.

Таким образом, величина электромагнитного момента зависит от результирующего магнитного поля Ф и активной составляющей тока ротора.
На рис. 12 приведено пояснение влияния $\cos\psi_2$ на величину электромагнитного момента: а) $\psi_2 = 0°$, ($\cos\psi_2 = 1$) ; б) $\psi_2 = 90°$, ($\cos\psi_2 = 0$) .
Как следует из рис. 12.а, если $\psi_2 = 0°$, в создании электромагнитного момента участвуют все проводники обмотки ротора, т.е. момент имеет наибольшее значение. Если $\psi_2 = 90°$ (рис. 12.б), результирующая электромагнитная сила и момент равны нулю.
В режиме двигателя при изменении нагрузки на валу изменяется частота вращения ротора, что приводит к изменению скольжения, частоты тока ротора, индуктивного сопротивления ротора и $\cos\psi_2$. В результате изменяется вращающий момент. На рис. 13 приведено пояснение влияния индуктивного сопротивления ротора на угол ψ_2: а) при $S = 1$ (пуск в ход); б) при $S \leq 1$ (после разгона). Наибольшие значения ЭДС и частота тока ротора имеют в момент пуска в ход, когда скольжение $S = 1$. При этом $f_2 = f_1$, $X_2 >> R_2$, угол ψ_2 близок к $90°$ (рис. 13.а).
За счет малого $\cos\psi_2$ в момент пуска в ход асинхронные двигатели имеют ограниченный пусковой момент. Кратность пускового момента (по сравнению с номинальным) у них составляет
$M_{пуск} / M_н = 0{,}8 \div 1{,}8$.
Причем большие цифры относятся к двигателям специальной конструкции с улучшенными пусковыми свойствами.
По мере разгона ротора двигателя частота тока ротора падает, уменьшается индуктивное сопротивление ротора X_{2S} и угол ψ_2 уменьшается (рис. 13.б). Это приводит к увеличению вращающего момента и дальнейшему разгону двигателя.
Подставим в выражение для электромагнитного момента соотношения для I_2, $\cos\psi_2$ и Ф, полученные ранее:

$$I_2 = \frac{E_2 S}{\sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2}}, \quad \cos\psi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2}}, \quad \Phi = \frac{E_1}{4{,}44 w_1 k_1 f}.$$

Тогда

$$M = C \frac{E_1 E_2 R_2 S}{4{,}44 w_1 k_1 f [R_2^2 + (S X_2)^2]},$$

Используя соотношение

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1 k_1}{w_2 k_2} = k_{тр},$$

где: $k_{тр}$ – коэффициент трансформации асинхронной машины.
Выразим $E_2 = E_1 / k_{тр}$, а E_1 приравняем к напряжению U_1, подведенному к обмотке статора ($E_1 \approx U_1$). В результате получим другое выражение для электромагнитного момента, которое удобно использовать при анализе работы машины, при построении ее характеристик
(*)

$$M = C_м \frac{U_1^2 R_2 S}{R_2^2 + (S X_2)^2}.$$

Из полученного выражения для электромагнитного момента следует, что он сильно зависит от подведенного напряжения ($M \sim U_1^2$). При снижении, например, напряжения на 10%, электромагнитный момент снизится на 19% ($M \sim (0{,}9U_1)^2 = 0.81U_1^2$). Это является одним из недостатков асинхронных двигателей, так как приводит на производстве к снижению производительности труда и увеличению брака.

7. Зависимость электромагнитного момента от скольжения

Выражение для электромагнитного момента (*) справедливо для любого режима работы и может быть использовано для построения зависимости момента от скольжения при изменении последнего от $+\infty$ до $-\infty$
Рассмотрим часть этой характеристики, соответствующая режиму двигателя, т.е. при скольжении, изменяющемся от 1 до 0. Обозначим момент, развиваемый двигателем при пуске в ход ($S = 1$) как $M_{пуск}$. Скольжение, при котором момент достигает наибольшего значения, называют критическим скольжением $S_{кр}$, а наибольшее значение момента – критическим моментом $M_{кр}$. Отношение критического момента к номинальному называют перегрузочной способностью двигателя
$M_{кр} / M_н = \lambda = 2 \div 3$.

Из анализа формулы (*) на максимум можно получить соотношения для $M_{кр}$ и $S_{кр}$

$$M_{кр} = C_м \frac{U_1^2}{2X_2}; \quad S_{кр} \approx \frac{R_2}{X_2}.$$

Критический момент не зависит от активного сопротивления ротора, но зависит от подведенного напряжения. При уменьшении U_1 снижается перегрузочная способность асинхронного двигателя.
Из выражения (*), разделив M на $M_{кр}$, можно получить формулу, известную под названием «формула Клосса», удобную для построения $M = f(S)$.

$$\boxed{\frac{M}{M_{кр}} = \frac{2}{S/S_{кр} + S_{кр}/S}}$$

Если в эту формулу подставить вместо M и S номинальные значения момента и скольжения ($M_н$ и $S_н$), то можно получить соотношение для расчета критического скольжения.

$$S_{кр} = S_н\left(\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1}\right).$$

Участок характеристики (рис. 14), на котором скольжение изменяется от 0 до $S_{кр}$, соответствует устойчивой работе двигателя. На этом участке располагается точка номинального режима ($M_н$, $S_н$). В пределах изменения скольжения от 0 до $S_{кр}$ изменение нагрузки на валу двигателя будет приводить к изменению частоты вращения ротора, изменению скольжения и вращающего момента. С увеличением момента нагрузки на валу частота вращения ротора станет меньше, что приведет к увеличению скольжения и электромагнитного (вращающего) момента. Если момент нагрузки превысит критический момент, то двигатель остановится.
Участок характеристики, на котором скольжение изменяется от $S_{кр}$ до 1, соответствует неустойчивой работе двигателя. Этот участок характеристики двигатель проходит при пуске в ход и при торможении.

Механическая характеристика асинхронного двигателя

Под механической характеристикой принято понимать зависимость частоты вращения ротора в функции от электромагнитного момента $n = f(M)$. Эту характеристику (рис. 15) можно получить, используя зависимость $M = f(S)$ и пересчитав частоту вращения ротора при разных значениях скольжения.

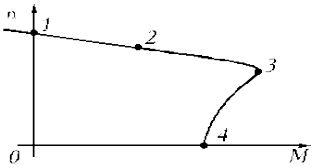


Рис. 15

Так как $S = (n_0 - n)/n_0$, отсюда $n = n_0(1 - S)$. Напомним, что $n_0 = (60f)/p$ – частота вращения магнитного поля.
Участок 1-3 соответствует устойчивой работе, участок 3-4 – неустойчивой работе. Точка 1 соответствует идеальному холостому ходу двигателя, когда $n = n_0$. Точка 2 соответствует номинальному режиму работы двигателя, ее координаты $M_н$ и $n_н$. Точка 3 соответствует критическому моменту $M_{кр}$ и критической частоте вращения $n_{кр}$. Точка 4 соответствует пусковому моменту двигателя $M_{пуск}$. Механическую характеристику можно рассчитать и построить по паспортным данным. Точка 1:

$n_0 = (60f)/p$,

где: p – число пар полюсов машины; f – частота сети.

Точка 2 с координатами $n_н$ и $M_н$. Номинальная частота вращения $n_н$ задается в паспорте. Номинальный момент рассчитывается по формуле:

$$M_н = 9{,}55\frac{P_н}{n_н}\left[\frac{Вт}{об/мин} = НМ\right]$$

здесь: $P_н$ – номинальная мощность (мощность на валу).
Точка 3 с координатами $M_{кр}n_{кр}$. Критический момент рассчитывается по формуле $M_{кр} = M_н\lambda$.
Перегрузочная способность λ задается в паспорте двигателя $n_{кр} = n_0(1 - S_{кр})$, $S_{кр} = S_н(\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1})$, $S_н = (n_0 - n_н)/n_0$ – номинальное скольжение.
Точка 4 имеет координаты $n = 0$ и $M = M_{пуск}$. Пусковой момент вычисляют по формуле

$M_{пуск} = M_н \lambda_{пуск}$,
где: $\lambda_{пуск}$ – кратность пускового момента задается в паспорте.
Асинхронные двигатели имеют жесткую механическую характеристику, т.к. частота вращения ротора (участок 1–3) мало зависит от нагрузки на валу. Это одно из достоинств этих двигателей.

Пуск в ход асинхронного двигателя

В момент пуска в ход $n = 0$, т.е. скольжение $S = 1$. Т.к. токи в обмотках ротора и статора зависят от скольжения и возрастают при его увеличении, пусковой ток двигателя в 5 ÷ 8 раз больше его номинального тока
$I_{пуск} = (5 \div 8) I_н$.
Как рассматривалось ранее, из-за большой частоты ЭДС ротора асинхронные двигатели имеют ограниченный пусковой момент
$M_{пуск} = (0{,}8 \div 1{,}8) M_н$.
Для пуска в ход двигателя необходимо, чтобы развиваемый им пусковой момент превышая момент нагрузки на валу. В зависимости от мощности источников питания и условий пуска используют разные способы пуска, которые преследуют цели: уменьшение пускового тока и увеличение пускового момента.
Различают следующие способы пуска в ход асинхронных двигателей: прямое включение в цепь, пуск при пониженном напряжении, реостатный пуск, использование двигателей с улучшенными пусковыми свойствами.

Прямое включение в сеть

Это самый простой и самый дешевый способ пуска. На двигатель вручную или с помощью дистанционного управления подается номинальное напряжение. Прямое включение в сеть допускается, если мощность двигателя не превышает 5% от мощности трансформатора, если от него питается и осветительная сеть. Ограничение по мощности объясняется бросками тока в момент пуска, что приводит к снижению напряжения на зажимах вторичных обмоток трансформатора. Если от трансформатора не питается осветительная сеть, то прямое включение в сеть можно применять для двигателей, мощность которых не превышает 25% от мощности трансформатора.

Пуск при пониженном напряжении

Этот способ применяют при пуске в ход мощных двигателей, для которых недопустимо прямое включение в сеть. Для понижения подводимого к обмотке статора напряжения используют дроссели и понижающие автотрансформаторы. После пуска в ход на обмотку статора подается напряжение сети.Понижение напряжения производят с целью уменьшения пускового тока, но одновременно, как это следует из рис. 17 и 17.б, происходит уменьшение пускового момента. Если напряжение при пуске понизить в $\sqrt{3}$ раз, пусковой момент понизится в 3 раза. Поэтому этот способ пуска можно применять только при отсутствии нагрузки на валу, т.е. в режиме холостого хода.
Если, согласно паспортным данным, двигатель должен включаться в сеть по схеме треугольник, то для снижения пускового тока на время пуска в ход обмотку статора включают по схеме звезда.
Основные недостатки этого способа пуска: высокая стоимость пусковой аппаратуры и невозможность пуска с нагрузкой на валу.

Реостатный пуск асинхронных двигателей

Этот способ применяют при тяжелых условия пуска, т.е. при большой нагрузке на валу. Для реостатного пуска используют асинхронные двигатели с фазным ротором, в цепь ротора включается пусковой реостат. Реостатный пуск служит для увеличения пускового момента. Одновременно происходит уменьшение пускового тока двигателя. По мере разгона двигателя пусковой реостат выводится и после окончания пуска обмотка ротора оказывается замкнутой накоротко.

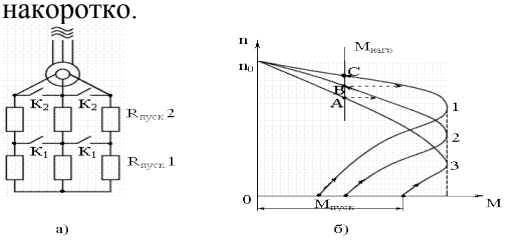


Рис. 19

В момент пуска в ход (рис. 19.а) в цепь ротора введен полностью пусковой реостат ($R_{пуск3} = R_{пуск1} + R_{пуск2}$), для чего контакты реле $К_1$ и $К_2$ разомкнуты. При этом двигатель будет запускаться по характеристике 3 (рис. 19.б) под действием пускового момента $M_{пуск}$. При заданной нагрузке на валу и введенном реостате $R_{пуск3}$ разгон закончится в точке A. Для дальнейшего разгона двигателя нужно замкнуть контакты $К_1$, при этом сопротивление пускового реостата снизится до $R_{пуск2}$ и разгон будет продолжаться по характеристике 2 до точки B. При замыкании контактов $К_2$, пусковой реостат будет полностью выведен ($R_{пуск} = 0$) и окончательный разгон двигателя будет продолжаться по его естественной механической характеристике 1 и закончится в точке C.

Критическое скольжение равно:

для естественной характеристики $S_{кр1} \approx R_2 / X_2$;

для искусственной характеристики $S_{кр3} \approx (R_2 + R_{пуск3}) / X_2$.

Пусковой момент для искусственной характеристики можно рассчитать по формуле Клосса

$$M_{пуск} = \frac{2M_{кр}}{S_{кр3}/1 + 1/S_{кр3}}.$$

Задаваясь необходимой величиной пускового момента, можно вычислить $S_{кр3}$ и величину пускового сопротивления

$$\frac{S_{кр}}{S_{кр3}} = \frac{R_2}{R_2 + R_{пуск3}}.$$

Использование двигателей с улучшенными пусковыми свойствами

Стремление совместить достоинства асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (высокая надежность) и фазным ротором (большой пусковой момент) привело к созданию этих двигателей. Они имеют короткозамкнутую обмотку ротора специальной конструкцией. Различают двигатели с обмоткой ротора в виде двойной «беличьей клетки» (рис.20.а) и с глубоким пазом

У двигателя с двойной «беличьей клеткой» на роторе закладывается две короткозамкнутые обмотки. Обмотка 1 выполняет роль пусковой, а обмотка 2 является рабочей. Для получения повышенного пускового момента пусковая обмотка должна обладать большим активным сопротивлением, чем рабочая обмотка. Поэтому обмотка 1 выполняется из материала с повышенным удельным сопротивлением (латунь), чем обмотка 2 (медь). Сечение проводников, образующих пусковую обмотку, меньше, чем у рабочей обмотки. За счет этого повышается активное сопротивление пусковой обмотки.

Рабочая обмотка, расположенная глубже, охватывается большим магнитным потоком, чем пусковая. Поэтому индуктивное сопротивление рабочей обмотки значительно больше, чем пусковой. За счет этого в момент пуска в ход, когда частота тока ротора имеет наибольшее значение, ток в рабочей обмотке, как следует из закона Ома, будет небольшим и в создании пускового момента будет участвовать в основном пусковая обмотка, имеющая большое активное сопротивление. По мере разгона двигателя частота тока ротора падает, уменьшается и индуктивное сопротивление обмоток ротора, это приводит к увеличению тока в рабочей обмотке, за счет этого в создании вращающего момента будет участвовать, в основном, рабочая обмотка. Т.к. она обладает малым активным сопротивлением, естественная механическая характеристика двигателя будет жесткой.

Аналогичная картина наблюдается у двигателя с глубоким пазом (рис. 20.б). Глубокий стержень обмотки (1) можно представить в виде нескольких проводников, расположенных по высоте паза. За счет высокой частоты тока в обмотке ротора в момент пуска в ход происходит «вытеснение тока к поверхности проводника». За счет этого в создании пускового момента участвует только верхний слой проводников обмотки ротора. Сечение верхнего слоя значительно меньше сечения всего проводника. Поэтому при пуске в ход обмотка ротора обладает повышенным активным сопротивлением, двигатель развивает повышенный пусковой момент. По мере разгона двигателя плотность тока по сечению проводников обмотки ротора выравнивается, сопротивление обмотки ротора снижается.

В целом эти двигатели имеют жесткие механические характеристики, повышенный пусковой момент и меньшую кратность пускового тока, чем двигатели с короткозамкнутым ротором обычной конструкцией.

Тема 4.3. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Тормозные режимы работы асинхронных машин. Коэффициент мощности асинхронного двигателя и его зависимость от нагрузки на валу двигателя.

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей

При работе многих механизмов, приводящихся во вращение асинхронными двигателями, в соответствии с технологическими требованиями возникает необходимость регулировать скорость вращения этих механизмов. Способы регулирования частоты (скорости) вращения асинхронных двигателей раскрывает соотношение:

$n = (1 - S)\, n_0 = (1 - S)\, 60f / p$.

Отсюда следует, что при заданной нагрузке на валу частоту вращения ротора можно регулировать:

изменением скольжения;

изменением числа пар полюсов;

изменением частоты источника питания.

Изменение скольжения

Этот способ используют в приводе тех механизмов, где установлены асинхронные двигатели с фазным ротором. Например, в приводе подъемно-транспортных машин. В цепь фазного ротора вводится регулировочный реостат. Увеличение активного сопротивления ротора не влияет на величину критического момента, но увеличивает критическое скольжение (рис. 21).

На рис. 21 приведены механические характеристики асинхронного двигателя при разных сопротивлениях регулировочного реостата $R_{p3} > R_{p2} > 0$, $R_{p1} = 0$.

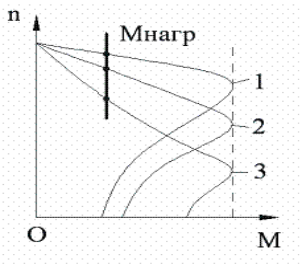


Рис. 21

Как следует из рис. 21 при этом способе можно получить большой диапазон регулирования частоты вращения в сторону понижения. Основные недостатки этого способа:

Из-за больших потерь на регулировочном реостате снижается коэффициент полезного действия, т.е. способ неэкономичный.

Механическая характеристика асинхронного двигателя с увеличением активного сопротивления ротора становится мягче, т.е. снижается устойчивость работы двигателя.

Невозможно плавно регулировать частоту вращения.

Из-за перечисленных недостатков этот способ применяют для кратковременного снижения частоты вращения.

Изменение числа пар полюсов

Эти двигатели (многоскоростные) имеют более сложную обмотку статора, позволяющую изменять ее число пар полюсов, и короткозамкнутый ротор. При работе асинхронного двигателя необходимо, чтобы обмотки ротора и статора имели одинаковое число пар полюсов. Только короткозамкнутый ротор способен автоматически приобретать то же число пар полюсов, что и поле статора. Многоскоростные двигатели нашли широкое применение в приводе металлорежущих станков. Нашли применение двух, трех и четырех скоростные двигатели.

На рис. 22 показана схема соединения и магнитное поле статора двигателя при последовательном (б) и параллельном (а) соединении полуобмоток.

У двухскоростного двигателя обмотка каждой фазы состоит из двух полуобмоток. Включая их последовательно или параллельно можно в 2 раза изменять число пар полюсов.

У четырехскоростного двигателя на статоре должно размещаться две независимые обмотки с разным числом пар полюсов. Каждая из обмоток позволяет в два раза изменять число пар полюсов. Например, у двигателя, работающего от сети с частотой $f = 50$ Гц, со следующими частотами вращения 3000/1500/1000/500 [об/мин] с помощью одной из обмоток статора можно

получить частоту вращения 3000 об/мин и 1500 об/мин (при этом $p = 1$ и $p = 2$). С помощью другой из обмоток можно получить частоту вращения 1000 об/мин и 500 об/мин (при этом $p = 3$ и $p = 6$).
При переключении числа пар полюсов изменяется и магнитный поток в зазоре, что приводит к изменению критического момента $M_{кр}$ (рис. 23.б). Если при изменении числа пар полюсов одновременно изменять и подведенное напряжение, то критический момент может остаться неизменным (рис..23.а). Поэтому при этом способе регулирования могут быть получены два вида семейства механических характеристик (рис. 23).
Достоинства этого способа регулирования: сохранение жесткости механических характеристик, высокий К.П.Д. Недостатки: ступенчатое регулирование, большие габариты и большая стоимость двигателя.

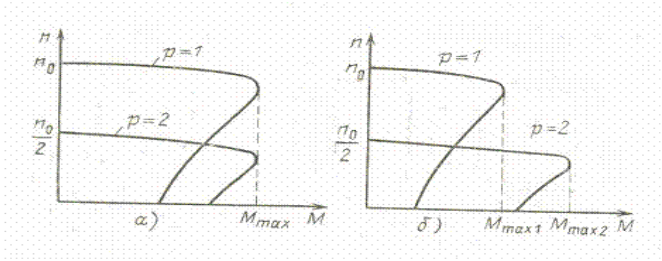


Рис. 23

Изменение частоты источника питания

В качестве таких источников питания в настоящее время начали находить применение преобразователи частоты (ПЧ), выполняемые на мощных полупроводниковых приборах – тиристорах. Из уравнения трансформаторной ЭДС $U_1 = 4{,}44 w_1 k_1 f \Phi$ следует, что для сохранения неизменным магнитного потока, т.е. для сохранения перегрузочной способности двигателя, необходимо вместе с частотой изменять и действующее значение подведенного напряжения. При выполнении соотношения $U_1 / f_1 = U'_1 / f'_1$, критический момент не изменяется и получается семейство механически характеристик, представленное на рис. 24.

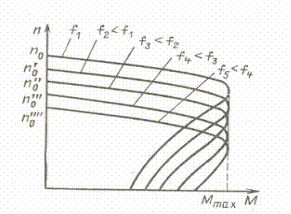


Рис. 24. Механические характеристики при частотном регулировании

Достоинства этого способа: плавное регулирование, возможность повышать и понижать частоту вращения, сохранение жесткости механических характеристик, экономичность. Основной недостаток – требуется преобразователь частоты, т.е. дополнительные капитальные вложения.

Тормозные режимы асинхронных машин

При работе многих производственных механизмов возникает необходимость в быстрой остановке (торможении) двигателя. Для этой цели широко используются механические тормоза, но асинхронная машина может сама выполнять функции тормозного устройства, работая в одном из тормозных режимов. При этом механические тормоза используются как запасные или аварийные, а также для удержания механизма в неподвижном состоянии.
Различают следующие тормозные режимы асинхронных машин:генераторное торможение; динамическое торможение; торможение противовключением.

Генераторное торможение

Машина переходит в режим генератора, если $n > n_0$, т.е. если ротор вращается быстрее магнитного поля. Этот режим может наступить при регулировании скорости вращения увеличением числа пар полюсов или уменьшением частоты источника питания, а также в подъемно-транспортных машинах при опускании груза, когда под действием силы тяжести груза ротор начинает вращаться быстрее магнитного поля.
В режиме генератора изменяется направление электромагнитного момента, т.е. он становится тормозным, под действием чего происходит быстрое снижение скорости вращения. Одновременно изменяется фаза тока в обмотке статора, что приводит к изменению направления передачи электрической энергии. В режиме генератора происходит возврат энергии в сеть.
На рис. 25 представлены механические характеристики при генераторном торможении за счет опускания груза (а) и понижении частоты источника питания (б).

Пусть двигатель с заданной нагрузкой на валу работал в точке A (рис. 25.а). Если под действием опускаемого груза ротор начнет вращаться быстрее магнитного поля и рабочая точка попадает в точку B, то $n_в > n_0$, машина будет развивать тормозной момент и частота вращения снизится до величины меньшей n_0. Одно из достоинств генераторного торможения у асинхронных машин заключается в том, что переход в режим генератора происходит автоматически, как только ротор начинает вращаться быстрее магнитного поля. Это защищает асинхронные двигатели от аварийной ситуации, которая может наступить у двигателей постоянного тока. Асинхронные двигатели не могут пойти в разнос. Максимальная частота вращения ротора ограничивается частотой вращения магнитного поля. Пусть двигатель работает с заданной нагрузкой на валу в точке A характеристики 1 (рис. 25.б). При снижении частоты источника питания рабочая точка должна перейти в точку C характеристики 2. Но если n_A окажется больше новой пониженной частоты вращения магнитного поля n_{02}, то машина из точки A переходит в точку B, работая на участке $B - n_{02}$ в режиме генератора. За счет этого происходит быстрое снижение частоты вращения. На участке $n_{02} - C$ машина работает в режиме двигателя, но происходит дальнейшее уменьшение частоты вращения ротора, пока вращающий момент не станет равным моменту нагрузки (т. C). Новое состояние равновесия с заданной нагрузкой наступает в точке C. Генераторное торможение является самым экономичным режимом, т.к. происходит преобразование механической энергии в электрическую и возврат энергии в сеть. Одним из достоинств этого тормозного режима является его самопроизвольное появление, т.е. не требуется никакая контролирующая аппаратура

Динамическое торможение

Этот тормозной режим используется для точной остановки мощных двигателей. На время торможения обмотка статора отключается от сети переменного напряжения и подключается и источнику с постоянным напряжением. При этом обмотка статора будет создавать постоянное неподвижное магнитное поле. При вращении ротора относительно этого магнитного поля изменяется направление ЭДС и тока ротора, что приведет к изменению направления электромагнитного момента, т.е. он станет тормозным. Под действием этого момента происходит торможение. Изменяя величину подведенного к обмотке статора напряжения, можно регулировать время торможения. Основным достоинством этого тормозного режима является точная остановка. Постоянное напряжение можно подводить к обмотке статора только на время торможения. После остановки двигатель нужно отключить от сети постоянного тока. На рис. 26 показаны схемы включения асинхронного двигателя и механические характеристики при динамическом торможении. Пусть двигатель работает с нагрузкой в точке A. При подаче на обмотку статора постоянного напряжения рабочая точка перейдет из точки A в точку B тормозной характеристики Под действием тормозного электромагнитного момента будет происходить снижение частоты вращения до полной остановки (точка 0). Основные недостатки динамического торможения: необходим источник постоянного тока и неэкономичность.

Торможение противовключением

Этот тормозной режим возникает при реверсе двигателя, а также широко используется для быстрой остановки двигателя. На рис. 27 представлены механические характеристики асинхронного двигателя при торможении противовключении для прямого (1) и обратного (2) порядка чередования фаз. Пусть двигатель с нагрузкой на валу работал в точке A. Для торможения двигателя нужно изменить порядок чередования фаз, т.е. переключить две фазы. При этом рабочая точка перейдет в точку B (рис. 27). На участке $B - C$ машина работает в режиме электромагнитного тормоза, развивая тормозной момент, под действием которого происходит быстрое снижение скорости до нуля. В точке C двигатель нужно отключить от сети, иначе произойдет реверс.

Достоинством этого тормозного режима является быстрое торможение, т.к. тормозной момент действует на всем тормозном пути. Недостатки: большие токи и потери в обмотках при торможении, необходима аппаратура, контролирующая скорость вращения и отключающая двигатель от сети при его остановке. Если в приводе механизма двигатель часто работает в режиме реверса, приходится завышать его мощность из-за больших потерь мощности.

Коэффициент мощности асинхронного двигателя и его зависимость от нагрузки на валу

Коэффициент мощности определяется соотношением

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}},$$

где: P_1, Q_1, S_1 – активная, реактивная и полная мощность двигателя.

$P_1 = P_2 + \Delta P$,
где: P_2 – мощность на валу (полезная мощность;
ΔP – мощность потерь.
$\Delta P = \Delta P_{эл} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех}$,
где: $\Delta P_{эл}$ – электрические потери (потери на нагрев обмоток);
$\Delta P_{ст}$ – потери в стали (потери на нагрев сердечника);
$\Delta P_{мех}$ – механические потери.
Электрические потери $\Delta P_{эл}$ зависят от токов в обмотках и возрастают при увеличении нагрузки на валу. Потери в стали не зависят от нагрузки на валу, а зависят от подведенного к обмотке статора напряжения.
Механические потери относятся к постоянным потерям.
В номинальном режиме $\cos\varphi_н = 0{,}75 \div 0{,}95$, $\cos\varphi_{хх} = 0{,}08 \div 0{,}15$.
Снижение $\cos\varphi_{хх}$ объясняется тем, что активная мощность мала ($P_{1хх} = \Delta P_{эл} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех}$), а реактивная мощность Q_1 остается такой же, как и в номинальном режиме.
На рис. 28 показана зависимость коэффициента мощности асинхронного двигателя от нагрузки на валу. При большой недогрузке асинхронного двигателя он имеет низкий коэффициент мощности, что экономически невыгодно.
Для повышения $\cos\varphi$ при малой нагрузке рекомендуется понижать подведенное к двигателю напряжение. При этом уменьшается реактивная мощность, а коэффициент мощности повышается

Раздел 5. Синхронные машины

Тема 5.1. Устройство и принцип действия синхронных машин. Принцип работы и ЭДС синхронного генератора. Принцип работы синхронного двигателя. Краткая классификация синхронных машин. Схема замещения синхронного генератора. Угловые характеристики синхронного генератора. Основные характеристики синхронного генератора. Параллельная работа синхронных генераторов.

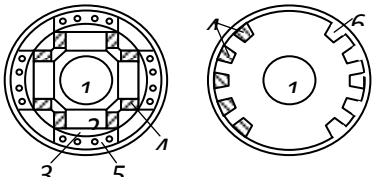
1. Устройство и принцип действия синхронных машин

Синхронные машины обратимы, могут работать в двух режимах: в режиме генератора и в режиме двигателя. Состоят из двух основных частей: неподвижного статора (якоря) и ротора (индуктора).

Статор трехфазной синхронной машины аналогичен статору трехфазного асинхронного двигателя. Он состоит из корпуса (цилиндрического сердечника, набранного из отдельных пластин электротехнической стали) и трехфазной обмотки, уложенной в пазы сердечника.

Роторы синхронных машин бывают двух типов: явнополюсного (рис.14.1,а) и неявнополюсного (рис.14.1,б) исполнения. Ротор синхронной машины представляет собой электромагнит постоянного тока, который создает магнитное поле, вращающееся вместе с ротором. Ротор имеет обмотку возбуждения (рис.14.1,4), которая через специальные контактные кольца питается постоянным током от выпрямителя или от генератора постоянного тока, называемого возбудителем.

На рис.14.1 изображены: 1 – вал машины; 2 – полюсный сердечник; 3 – полюсный наконечник; 4 – обмотка возбуждения; 5 – полная пусковая обмотка; 6 – пазы в неявнополюсном роторе. На рис.14.1 показана для двигателя пусковая, а для генератора успокоительная обмотка 5.



а) *б)*

Рис.14.1.

Роторы явнополюсного исполнения (рис.14.1,а) применяются в машинах, работающих при частоте вращения не более 1500 об/мин. Для быстроходных машин применяют неявнополюсные роторы, при $n > 1500$ об/мин (рис.14.1,б).

2. Принцип работы и ЭДС синхронного генератора

Принцип действия синхронных машин основан на явлении электромагнитной индукции.

Получение трехфазной системы ЭДС на зажимах обмотки статора синхронного генератора было объяснено в гл.4 (см. рис.4.1). Обмотка возбуждения создает неподвижный относительно ротора основной магнитный поток Φ_0, распределенный в воздушном зазоре между статором и ротором по синусоидальному закону. При вращении ротора поток Φ_0 вращается вместе с ним и пересекает обмотки статора. При этом в обмотках статора индуцируется трехфазная система ЭДС. Действующее значение каждой фазной ЭДС

$$E_0 = E_ф = 4{,}44\, f_1 w_1 k_{об} \Phi_0 ,$$

где w_1 – число витков фазной обмотки статора; $k_{об}$ – обмоточный коэффициент; f_1 – наводимая частота.

Фазные ЭДС E_A, E_B, E_C равны по значению и отстают друг от друга по фазе на угол 120°.

Обмотка, в которой ЭДС индуцируется основным магнитным потоком, называется *обмоткой якоря*. Поэтому у синхронных машин обмотка статора является обмоткой якоря. Если к этой обмотке присоединена нагрузка, то по ней протекает ток I_a, создающий магнитный поток Φ_a. Воздействие магнитного потока якоря Φ_a на основной магнитный поток Φ_0 называется *реакцией якоря* и зависит от характера нагрузки, т.е. от угла сдвига фаз между ЭДС и током статора.

Магнитный поток якоря Φ_a создается токами трех фаз и вращается с частотой

$$n_1 = 60\, f_1 / p ,$$

т.е. с той же частотой, что и основной магнитный поток. Результирующий магнитный поток в воздушном зазоре Φ_δ, равный сумме основного потока и потока якоря

($\Phi_\delta = \Phi_0 + \Phi_a$),

вращается с синхронной скоростью. Этот поток, как и основной, неподвижен относительно ротора.

Направление вращающегося потока статора всегда совпадает с направлением потока той фазы, ток в которой в данный момент времени максимальный.

Синхронной машиной называется машина переменного тока, частота вращения ротора которой зависит от частоты питающей сети, т.е. частоты вращения магнитного поля.

3. Принцип работы синхронного двигателя

Если обмотку статора синхронного двигателя включить в сеть трехфазного тока, то внутри статора возникает вращающееся магнитное поле. При подаче постоянного тока в обмотку возбуждения ротора возникает магнитное поле полюсов ротора.

Принцип действия синхронного двигателя основан на явлении притяжения разноименных полюсов двух магнитных полей – статора и ротора (рис.14.2). Но, несмотря на наличие вращающегося магнитного поля статора, ротор будет оставаться неподвижным. Это объясняется тем, что силы взаимодействия между полюсами вращающегося поля и полюсами ротора будут направлены поочередно то в одну, то в другую сторону. Поэтому ротор, обладающий определенной массой, а следовательно, и инерцией, не может тронуться с места и развить необходимую частоту вращения.

Отсутствие начального пускового момента является большим недостатком синхронных двигателей. Сложность пуска синхронных двигателей состоит в том, что нужно предварительно осуществить разгон ротора до синхронной или почти синхронной частоты вращения. Только в этом случае начнут взаимодействовать полюсы вращающегося магнитного поля и полюсы ротора, в результате чего ротор войдет в синхронизм, и будет вращаться с той же частотой вращения, что и поле, т.е. синхронно. На рис.14.2 показано, что поле статора Φ_a является ведущим, а поле ротора Φ_0 – ведомым. Φ_δ, – поток в воздушном зазоре.

Если к валу ротора приложить механическую нагрузку, которая создает момент сопротивления $M_д$, ось полюса ротора сместиться в сторону отставания на угол θ (рис.14.2). Этот угол θ назван *углом нагрузки* синхронной машины.

4. Краткая классификация синхронных машин

Синхронные машины разделяются на генераторы, двигатели и компенсаторы. Конструкция синхронных генераторов определяется в основном типом приводного двигателя.

В зависимости от частоты вращения и типа приводного двигателя генераторы подразделяют на:

турбогенераторы, быстроходные n_p = 3000, 1500 об/мин, p = 1 или 2. Мощность P = 150, 300, 500, 800, 1000 МВт. Приводятся во вращение паровыми турбинами;
гидрогенераторы – приводятся во вращение гидротурбинами, тихоходные, многополюсные *(p>6)*, $n_1 = 60 \div 500$ об/мин. Мощность P = 500 МВт – Красноярская ГЭС, $P = 250$ МВт – Братская ГЭС. Общая мощность Братской ГЭС 250 МВт × 18 агрегатов = 4500 МВт, при U_1 = 15 *кВ* и I_1=15 *кА;*
дизельгенераторы средней мощности на $n_2 = 500 \div 1500$ об/мин – приводятся во вращение двигателями внутреннего сгорания,
Синхронные двигатели – выполняются многополюсными. Применяются для привода механизмов, работающих с постоянной и переменной частотой вращения $P = 10, 15, 20$ МВт. На авманосцах используют регулируемые двигатели $P = 40$ МВт, которые вращают гребные винты. Двигатели, кроме механической мощности могут выдавать реактивную с опережающим током с целью улучшения $cos\varphi$ сети.
Синхронные компенсаторы – это синхронные двигатели, работающие на холостом ходу, при регулировании тока возбуждения. Применяются для производства реактивной (емкостной) мощности, с целью улучшения $cos\varphi$ сети, выравнивания напряжения. $P_{ск}$ = 50, 75, 100 МВт.
Все СГ подразделяются на неявнополюсные (турбогенераторы с распределенной ОВ) и явнополюсные (гидрогенераторы с сосредоточенной О

5. Схема замещения синхронного генератора

Для упрощения анализа синхронного генератора будем считать, что мы имеем машину с неявновыраженными полюсами. При таком допущении можно считать, что в машине существует три магнитных потока, изображенных на схеме замещения синхронного генератора (рис.14.3), каждый из которых прямо пропорционален соответствующей магнитодвижущей силе ($Iw = F$): основной магнитный поток Φ_0 прямо пропорционален МДС обмотки возбуждения, потоки рассеяния Φ_p и реакции якоря Φ_a прямо пропорциональны МДС обмотки статора и потоку в воздушном зазоре Φ_δ.

С целью выявления свойств синхронного генератора можно составить уравнение по второму закону Кирхгофа для цепи статора машины.

Под действием МДС обмотки возбуждения возникает основной магнитный поток Φ_0, которым в каждой фазе обмотки статорая индуктируется ЭДС E_0 (рис.14.3):
– в обмотке возбуждения

$$U_в \to w_в I_в \to \Phi_0;$$

– в обмотке статора

$$e_0 = -w_a \frac{d\Phi_0}{dt} \to E_0 = 4{,}44 w_a k_{об} f_1 \Phi_0.$$

Ток статора I_a вызывает в активном сопротивлении R_a фазы статора падение напряжения $U_R = E_R = R_a I_a$. МДС обмотки статора $w_a I_a$ возбуждает поток рассеяния Φ_p, которым в обмотке статора индуктируется ЭДС самоиндукции

$$\dot{E}_p = -jX_p I_a,$$

где $X_p = \omega L_p$ – индуктивное сопротивление, обусловленное полем рассеяния; L_p – индуктивность, обусловленная полем рассеяния.

Как известно, МДС обмотки статора возбуждается магнитным потоком Φ_a, под действием которого изменяется результирующее поле машины.

Явление реакции якоря можно учесть, введя в уравнение ЭДС E_a, индуктируемую в обмотке якоря – статора полем якоря

$$\dot{E}_a = -jX_a \dot{I}_a,$$

где $X_a = \omega L_a$ – индуктивное сопротивление, обусловленное полем реакции якоря; L_a – индуктивность, обусловленная полем реакции якоря.

Реакция якоря – это воздействие МДС статора на МДС ротора.

Выразим вышесказанное с помощью уравнений. Обмотка возбуждения и обмотка статора генератора создают магнитные поля, которые наводят ЭДС. В обмотке возбуждения:

$$OB \to w_в I_в \to \Phi_0,$$

в обмотке статора:

$$e_0 = -w_a \frac{d\Phi_0}{dt} \to E_0 = 4{,}44 w_a k_{об} f_1 \Phi_0 .$$

$$OC \to w_a I_a \to \Phi_a \left\{ \begin{array}{l} \to e_a = -w_a \dfrac{d\Phi_a}{dt} \to \dot{E}_a = -jX_a \dot{I}_a, \\ \to \dot{E}_p = -jX_p \dot{I}_a, \\ \to \dot{E}_R = R_a \dot{I}_a. \end{array} \right.$$

По второму закону Кирхгофа записывается уравнение электрического равновесия синхронного генератора:

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_p + \dot{E}_R = \dot{E}_0 - jX_a \dot{I}_a - jX_p \dot{I}_a + R_a \dot{I}_a =$$

$$= \dot{E}_0 - jX_c \dot{I}_a + R_a \dot{I}_a;$$

где $X_c = X_p + X_a$; $X_a = \omega L_a$; $X_p = \omega L_p$; $R_a << X_c$.

Магнитные потоки обмотки возбуждения (*ОВ*) Φ_0 и обмотки статора (*ОС*) Φ_a складываясь образуют результирующий поток в воздушном зазоре

$$\dot{\Phi}_\delta = \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_a .$$

В данном случае предположение независимости магнитных потоков дает возможность понять влияние всех факторов на работу синхронного генератора.

6. Угловые характеристики синхронного генератора

Электромагнитная мощность неявнополюсного генератора при $R_a = 0$:

$$P_{эм} = \frac{m_1 U E_0}{X_c} \sin\theta ,$$

где θ – угол между векторами U и E_0.

Для явнополюсного генератора:

$$P_2 = P_{эм} = \frac{m_1 U E_0}{X_d} \sin\theta + \frac{m_1 U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta ,$$

где $X_q = X_{aq} + X_{p1}$ – синхронное индуктивное сопротивление явнополюсного генератора по поперечной оси; $X_d = X_{ad} + X_{p1}$ – синхронное индуктивное сопротивление явнополюсного генератора по продольной оси.

Разделив выражение мощностей генератора на синхронную угловую скорость

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2\pi f}{p} ,$$

где p – число пар полюсов, получим выражение электромагнитных моментов:

неявнополюсного генератора

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{m_1 U_1 E_0}{\omega_1 X_c} \sin\theta , \text{ Нм};$$

явнополюсного генератора

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{m_1 U E_0}{\omega_1 X_d} \sin\theta + \frac{m_1 U^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta , \text{ Нм}.$$

Анализ выражения момента явнополюсного генератора показывает, что электромагнитный момент явнополюсного генератора имеет две составляющие: одна из них $M_{осн}$ представляет собой основную составляющую электромагнитного момента, а другая – реактивную составляющую момента M_p:

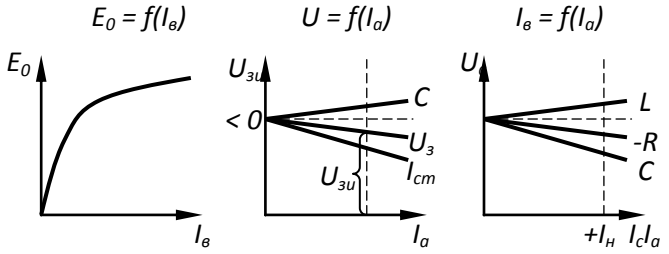
$$M_{эм} = M_{осн} + M_p .$$

$M_{осн}$ зависит от U и ЭДС E_0, т.е. от возбуждения генератора. M_p не зависит от возбуждения и действует даже в невозбужденном генераторе.

Вращающий момент явнополюсной синхронной машины и ее мощность пропорциональны синусу угла сдвига между осями полюсов ротора и результирующего магнитного поля машины.

7. Основные характеристики синхронного генератора

Основными характеристиками генератора являются: характеристика холостого хода, внешняя и регулировочная.



а) *б)* *в)*

Характеристика холостого хода выражает магнитные свойства генератора: $E_0 = f(I_в)$ или $Ф_0 = f(I_в)$. Форма характеристики обусловлена явлением насыщения магнитной системы. Нет пропорциональности между E_0 и $I_в$ или $Ф_0$ и $I_в$ (рис.14.4,а).

Внешней характеристикой называется зависимость $U = f(I_a)$ при $n = const$ и $cos\varphi = const$, снятой при неизменном токе возбуждения и при чисто активной R, индуктивной L и емкостной C нагрузках (рис.14.4,б).

Номинальным изменением напряжения генератора $\Delta U_{ном}$ называется изменение напряжения при изменении нагрузки от нуля до номинальной при неизменном токе возбуждения

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\,\%.$$

Регулировочная характеристика $I_в = f(I_a)$ при $U = const$ и $f = const$. Характеристики показывают, как надо изменять $1_в$, чтобы обеспечить $U = const$ при $I_a = U_a$ (рис.14.4,в).

8. Параллельная работа синхронных генераторов

Различают одиночную (автономную) работу генераторов и параллельную работу генераторов. Автономная работа встречается сравнительно редко: стройки, село. На крупных электростанциях генераторы работают параллельно при условии:

$U_{СГ1} = U_{СГ2}$ – равенства напряжений синхронных генераторов;

$f_{СГ1} = f_{СГ2}$ – равенства частот или равенство частот вращения;

$ABC_{СГ1} = ABC_{СГ2}$ – одинакового чередования фаз.

Равенство напряжений достигается путем регулирования тока возбуждения , а равенство частот — путем регулирования частоты вращения ротора генератора. На станции частота вращения изменяется за счет изменения частоты вращения паровой или гидравлической турбин, т. е. за счет изменения частоты вращения приводного двигателя.

Тема 5.2. Схема замещения и уравнение электрического равновесия цепи статора синхронного двигателя. Угловая и механическая характеристика синхронного двигателя. Рабочие характеристики синхронного двигателя. Способы пуска в ход синхронного двигателя. Пуск в ход с помощью разгонного двигателя. Асинхронный способ пуска. Частотный пуск. Механическая характеристика. Частотное торможение.

Схема замещения и уравнение электрического равновесия цепи статора синхронного двигателя

Синхронная машина обратима. Поэтому если к обмотке статора подвести трехфазное напряжение, то токи обмотки якоря создадут вращающееся магнитное поле. Если теперь ротор развернуть до синхронной частоты вращения посторонним двигателем, то установится магнитная связь между полем якоря (статора) и полем ротора N S.

Полюсная система ротора будет увлекаться вращающимся магнитным полем статора, и ротор будет вращаться с той же частотой вращения, что и поле статора, т.е. синхронно.

Схема замещения двигателя состоит из тех же элементов, что и схема генератора, но в ней изменяется условно-положительное направление тока (рис.14.5), а уравнение электрического равновесия цепи статора:

$$\dot{U}_a = \dot{E}_0 + jX_a\dot{I}_a + jX_p\dot{I}_a + R_a\dot{I}_a\,.$$

Если $X_c = X_p + X_a$, то $\dot{U}_a = \dot{E}_0 + jX_c\dot{I}_a + R_a\dot{I}_a$, а так как $R_a << X_c$, то $\dot{U}_a = \dot{E}_0 + jX_c\dot{I}_a$, тогда ток статора будет равен

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a - \dot{E}_0}{jX_c}.$$

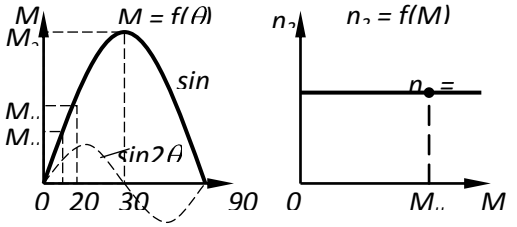
Несмотря на то, что двигатель работает с механической нагрузкой на валу, можно изменять потребляемый из сети ток путем изменения тока возбуждения с изменением $I_в$ изменяется Φ_0 и E_0. А изменение E_0 приводит к изменению I_a. Минимальное значение I_a получается тогда когда $\cos\varphi = 1$.

В создании магнитного потока воздушного зазора Φ_δ двигателя принимают участие как обмотка статора Φ_a, так и обмотка ротора Φ_0. Доля участия той или иной обмотки в создании Φ_δ зависит от величины тока этих обмоток.

Угловая и механическая характеристика синхронного двигателя

В двигателе (так же, как и в генераторе) взаимодействием тока статора с магнитным полем ротора создается $M_{эм}$, но в отличие от генератора этот момент в двигателе является вращающим

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{m_1 U_1 E_0}{\omega_1 X_c}\sin\theta.$$



Зависимость $M_{эм}$ двигателя от нагрузки θ - это угловая характеристика (рис.14.6), она аналогична угловой характеристике генератора. При изменениях нагрузки у двигателя меняется угол θ. Номинальный $\theta_н = 20 \div 30°$. Максимальный угол нагрузки равен $\theta_{max} = 90°$.

Частота вращения ротора n_2 всегда равна синхронной частоте вращения

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p},$$

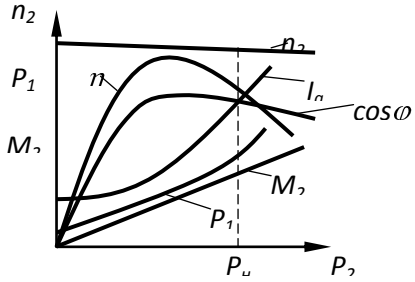
а потому график $n_2 = f(M)$ имеет вид прямой линии (рис.14.7), параллельной прямой оси абсцисс, и называется *механической характеристикой* синхронного двигателя.

Уравнение момента двигателя подобно уравнению момента генератора, т.е. реактивная составляющая момента изменяется пропорционально синусу 2θ.

При $\theta = 90°$, $M_{\max} = \frac{3U_1E_0}{\omega_1 X_c}$, $\frac{M_{\max}}{M_{ном}} = \lambda_м = 2 \div 2{,}3$ - называется *перегрузочной способностью* двигателя. Из выражения максимального момента следует, что момент на валу синхронного двигателя пропорционален первой степени напряжения, в отличие от асинхронного двигателя, у которого момент пропорционален квадрату напряжения. Из этого следует, что синхронные двигатели менее чувствительны к изменению напряжения, чем асинхронные.

Рабочие характеристики синхронного двигателя

Рабочие характеристики синхронного двигателя (рис.14.8) представляют собой зависимости частоты вращения ротора n_2, тока в обмотке статора I_a, мощности на входе двигателя P_1, полезного момента M_2, $\cos\varphi$ и КПД η от полезной мощности на валу P_2. Полезный момент на валу двигателя находится в следующей зависимости от P_2 $M_2 = \frac{P_2}{\omega_1}$.



Кривая $cos\varphi = f(P_2)$ зависит от характера возбуждения двигателя (недовозбуждение или перевозбуждение) в режиме холостого хода. Если при холостом ходе $cos\varphi = 1$, то при увеличении нагрузки $cos\varphi$ уменьшается (рис.14.8).

Величина тока в обмотке статора двигателя равна

$$I_a = \frac{P_1}{m_1 U_1 \cos\varphi}.$$

Из этого выражения видно, что ток I_a с увеличением нагрузки P_2 растет быстрее, чем мощность P_1, вследствие уменьшения $cos\varphi$ (рис.14.8).

Способы пуска в ход синхронного двигателя

Практическое применение имеют три способа пуска вход синхронных двигателей: пуск в ход посредством вспомогательного (разгонного) двигателя, асинхронный и частотный пуск.

Пуск в ход с помощью разгонного двигателя

При таком способе пуска синхронный двигатель имеет на одном валу специальный пусковой двигатель, который разгоняет его до синхронной частоты вращения, при которой происходит синхронизация двигателя с сетью. В качестве разгонного двигателя применяется чаще всего асинхронный двигатель сравнительно малой мощности, имеющего большую частоту вращения. Поэтому разгонный двигатель разгоняет на несколько большую частоту вращения синхронной скорости. После этого разгонный двигатель отключается от сети, агрегат начинает замедляться, проходя плавно через синхронную скорость, что позволяет провести в нужный момент включение синхронного двигателя в сеть

Недостатком данного способа является невозможность пуска двигателя под нагрузкой, т.к. нерационально иметь пусковой двигатель большой мощности, удорожающий и усложняющий установку. Пуск с помощью разгонного двигателя применяется редко, т.к. разгонный двигатель используется только при пуске.

Асинхронный способ пуска

Распространение получил так называемый асинхронный пуск синхронного двигателя. Для осуществления асинхронного пуска ротор синхронного двигателя снабжается специальной пусковой короткозамкнутой обмоткой из медных или бронзовых стержней типа беличьей клетки асинхронного короткозамкнутого двигателя (рис.14.1,5). Пуск двигателя осуществляется следующим образом (рис.14.5).

Вначале обмотка возбуждения синхронного двигателя замыкается на пусковой реостат (ПР на рис.14.5), сопротивление которого в 10-15 раз больше, чем сопротивление обмотки возбуждения (если оставить обмотку возбуждения разомкнутой, то в ней при пуске вращающимся полем статора будет наводится значительная ЭДС, опасная для изоляции). При включении обмотки статора на трехфазное напряжение двигатель за счет короткозамкнутой обмотки начинает работать как асинхронный. Когда частота вращения ротора двигателя достигается примерно 95% синхронный частоты вращения поля статора n_1, пусковой реостат ПР отключают, а обмотку возбуждения ротора включают на постоянное напряжение U_b. Так как теперь частота вращения поля статора отличается незначительно от частоты поля вращающегося ротора, полюсы полей статора и ротора вступают во взаимодействие, двигатель втягивается в синхронизм и начинает работать как синхронный.

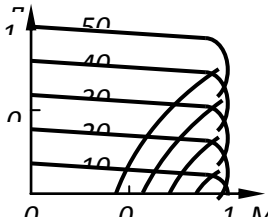
В рабочем, т.е. в синхронном, режиме токи в пусковой короткозамкнутой обмотке не возникают и она в работе двигателя не участвует.

Пусковое сопротивление ПР, включаемое в цепь ротора, играет примерно ту же роль, что и пусковой реостат при пуске обычных асинхронных двигателей с фазным ротором (рис.14.7,а,б).

На рис.14.9 показаны механические характеристики синхронного двигателя при различных сопротивлениях пусковой обмотки, где кривая 1 отражает облегченный пуск, а кривые 2 и 3 – для тяжелых пусковых условий. При этом нужно в обоих случаях обеспечить не только требуемую величину пускового момента M_n, но и необходимую величину так называемого входного момента $M_{вх}$, способствующего синхронизации двигателя с сетью. Под последним понимают момент, развиваемый двигателем при 95% синхронной частоты вращения, т.е. при скольжении $S=5\%$. Для кривой 1 входной момент значительно больше, чем для кривой 2 и 3. Отсюда следует, что синхронные двигатели, развивающие при пуске большой пусковой момент M_{n2}, M_{n3} имеют меньший входной момент, т.е. труднее синхронизируются с сетью (рис.14.9).

В обмотку возбуждения двигателя, после того как он достигает частоты вращения, составляющей примерно 95% синхронной, подается постоянный ток.

Пуск синхронного двигателя можно облегчить путем применения асинхронно-частотного способа пуска, рис.14.10. При названном пуске обмотка статора СД питается от преобразователя частоты. При асинхронно-частотном пуске двигатель входит в синхронизм при малых частотах и малых напряжениях питающей сети. В этом случае бросок пускового тока исключается. На рис.14.10 показано семейство механических характеристик при асинхронно-частотном пуске и различных значениях частоты питающей статор сети 10, 20, 30, 40, 50 Гц. Пуск осуществляется при наглухо включенном статическом возбудителе.



Частотный пуск, механическая характеристика и частотное торможение

Синхронный двигатель может быть пущен в ход методом частотного пуска, когда частота подводимого к нему при пуске напряжения плавно изменяются от нуля до номинального для данного двигателя значения. При этом двигатель вращается синхронно в течение всего периода пуска.

При пуске по этому методу двигатель получает питание от источника бесконечной мощности, напряжение и частота которого изменяются пропорционально

$$\frac{U}{f} = const.$$

В этом случае магнитный поток в статоре всегда постоянный. Для изменения или регулирования частоты вращения ротора СД достаточно изменения частоты источника напряжения *f*, однако, для сохранения коэффициента мощности и перегрузочной способности двигателя и для обеспечения высокого значения КПД, необходимо одновременно изменять и напряжение источника *U*.

Частотный пуск значительно облегчает пуск двигателя, так как практически упраздняет броски пускового тока, т.е. исключает все пусковые перегрузки, а значит, увеличивает надежность пусковой операции и, в конечном счете, увеличивает срок службы СД. Пускается СД при частотном пуске с подключенным полупроводниковым возбудителем, пусковая схема в этом случае упрощается и находит все большее применение.

Пусть цикл частотного регулирования - пуска и торможения начинается с процесса пуска двигателя увеличением напряжения и частоты при включенном на частотный преобразователь неподвижного двигателя, рис.14.11 точка 0. Возбуждение СД независимое от полупроводникового выпрямителя. С возрастанием частоты, т.е. параметра регулирования α, $\alpha = f_1 / f_н$ момент СД растет, при неподвижном роторе. Когда момент достигнет и превысит значение равное статическому моменту, точка 1 рис.14.11, двигатель начнет разбег. В этой граничной точке, как и во всей рассмотренной области неподвижного СД, частота, наводимая в демпферной обмотке ротора, равна частоте питающей статор сети, так как частота вращения ротора $n_p = 0$. Момент трогания СД начинается тогда когда $M_п > M_{ст}$.

Чем плавнее и медленнее производится трогание с места, тем вернее пускаемый СД входит в синхронизм с сетью. Дальнейшее разворачивание ротора до необходимой частоты вращения уже не представляет затруднений.

В точке 1, рис.14.11, наступает синхронизация СД с сетью, где пусковой момент равен входному $M_п = M_{вх}$. С дальнейшим повышением напряжения и частоты питающей сети, изображающая точка *n, M,* переходя с одной механической характеристики СД $n = f(M)$ на другую, опишет в плоскости механических характеристик вертикальную прямую, рис.14.11, для которой время является параметром. Когда напряжение и частота достигнет необходимого по условиям пуска значения, например при $\alpha = 1$, траектория изображающей точки *n, M* выходит на соответствующую механическую характеристику двигателя в точке 2. Траекторией, изображающей точки при частотном пуске, является отрезок 1-2 по оси ординат. На этом пуск заканчивается и изображающая точка 2 перемещается по любой механической характеристике СД, на какой частот е работает двигатель.

Что касается торможения, то снижение оборотов синхронного двигателя будет проходить по той же характеристике, но в обратном направлении. С постепенным уменьшением частоты питающей сети будет уменьшаться и частота вращения ротора

Раздел 6. Основы электропривода.
Тема 6.1. Общие сведения об электроприводе. Условия, определяющие выбор типа электродвигателя. Управление электроприводами

1. Общие сведения об электроприводе

Электроприводом называется электромеханическая система, состоящая из электродвигателя (или нескольких электродвигателей), передаточного механизма к рабочей машине и всей аппаратуры для управления электродвигателем.

Основным элементом электропривода является электродвигатель. Электродвигатель должен не только иметь достаточную мощность для преодоления момента сопротивления рабочей машины, но также осуществлять пуск привода и преодолевать кратковременные механические перегрузки. Элементы системы управления приводом должны обеспечивать реверсирование и регулирование частоты вращения рабочих машин в соответствии с требованиями технологического процесса, заданное время пуска и торможения.

Электроприводы производственных машин делятся на регулируемые и нерегулируемые. Частота вращения нерегулируемого привода при неизменном напряжении питающей сети и постоянной нагрузке на валу двигателя ($M = const$) практически остается постоянной.

В регулируемых приводах частота вращения принудительно изменяется (регулируется) в определенных пределах в соответствии с требованиями производственного процесса. Применение регулируемых приводов вместо нерегулируемых в большинстве случаев обеспечивает более благоприятное протекание технологического процесса, улучшает технические показатели использования установленного оборудования, способствует повышению качества продукции.

Основными техническими показателями регулирования частоты вращения являются:
диапазон регулирования, представляющий собой отношение максимальной скорости к (выражается в виде отношения 2:1; 5:1 и т.д.);
число частот вращения m, которое можно получить в данном диапазоне регулирования: чем больше число m, тем выше плавность регулирования;
направление регулирования, т.е. возможность получения частоты вращения, превышающую основную частоту (регулирование вверх), и частоты вращения, меньше основной частоты (регулирование вниз);
стабильность работы при значительных колебаниях нагрузки;
надежность эксплуатации и удобство обслуживания.
К экономическим показателям системы регулирования относятся: первоначальные капитальные затраты и эксплуатационные расходы (включая плату за электроэнергию).
Преобразование электрической энергии в механическую работу сопровождается появлением потерь, которые выделяются в виде тепла в обмотках и магнитопроводе двигателя и вызывают повышение температуры его частей. С ростом нагрузки потери в двигателе увеличивается, и температура его нагрева повышается. Наиболее допустимое повышение температуры двигателя обычно ограничивается теплоемкостью применяемых изоляционных материалов, поскольку другие материалы (металлы), используемые в двигателе, способны выдерживать более высокие температуры.
Температура нагрева двигателя зависит не только от его параметров и нагрузки, но и от температуры окружающей среды $\theta_{окр}$. Номинальную мощность двигателей заводы-изготовители определяют, принимая $\theta_{окр}=+35°C$. При этом условии максимально допустимое превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды

$$\tau_{доп} = \theta_{доп} - \theta_{окр} = 100^{\circ} - 35^{\circ} = 65^{\circ} C.$$

Номинальной мощности двигателя $P_н$, определяемой условиями нагрева, соответствует номинальный момент двигателя $M_н$. Этот момент у всех двигателей меньше максимального момента M_{max}, который двигатель способен развивать по своим электромагнитным и электромеханическим свойствам. Отношение максимального

$$\kappa_м = M_{\max} / M_н$$

или критического момента $M_{кр}$

$$\kappa_м = M_{кр} / M_н$$

характеризует механическую перегрузочную способность двигателя, $\kappa_м$.

Критерий перегрузочной способности часто имеет решающее значение при выборе электродвигателя для производственных механизмов, режим работы которых характеризуется значительными толчками, набросами нагрузки.

Чтобы установить соответствие выбираемого двигателя условиям нагрева, необходимо иметь график мощности *P=f(t),* момента *M=f(t)* или тока *I=f(t)* на валу двигателя за полный цикл работы машины $t_ц$. Подобные диаграммы называют *нагрузочными диаграммами* электропривода. Температура, до которой двигатель нагревается в процессе работы, определяется в первую очередь его нагрузочной диаграммой. Показатели степени использования электродвигателя является наивысшая температура, до которой он нагревается в условиях эксплуатации при данном режиме работы. Если температура нагрева двигателя приближается к предельно допустимой, но не превышает ее, то это показывает, что в этом режиме работы двигатель используется полностью.

Электропривод определяет собой уровень силовой электровооруженности предприятия и является основным фактором в увеличении производительности труда.

2. Условия, определяющие выбор типа электродвигателя

Выбор электродвигателей к рабочим машинам и исполнительным механизмам производится по следующим параметрам:

по роду тока и напряжению - род тока постоянный или переменный; напряжение трехфазное 127, 220, 380, 500 (1000), 3000, 6000 и 10000 В, а постоянного 110, 220, 400 В, (800 В);

по частоте вращения - наиболее простым и надежным способом сочленения двигателя с рабочей машиной является непосредственное соединение при помощи муфты или редуктора;

по условиям окружающей среды во многих случаях атмосфера, в которой приходится работать двигателю, содержит большое количество пыли, влаги, газов, паров кислот, взрывоопасной смеси. При наличии взрывоопасной смеси в окружающей среде, возникшая в двигателе искра может вызвать взрыв. Поэтому должна быть предусмотрена защита двигателей от вредного влияния атмосферы и защита среды от взрыва при искрообразованиях в двигателях. В соответствии с этим изготавливаются двигатели открытого, защищенного, закрытого и взрывобезопасного исполнений:

а) открытые, не имеющие специальных приспособлений для предохранения от случайного прикосновения к токоведущим частям, а также для предотвращения попадания посторонних предметов внутрь двигателя;

б) защищенные, имеющие приспособление от случайных прикосновений к вращающимся и токоведущим частям, а также для предотвращения попадания посторонних предметов внутрь двигателя;

в) закрытые, снабженные боковыми крышками, которые прилегают к корпусу плотно, даже герметически. Двигатели этого типа защищены от проникновения пыли извне. Закрытые двигатели делятся на категории: закрытые невентилируемые, закрытые с независимой вентиляцией, герметически закрытые, корпус которых снабжен специальными уплотнителями не пропускающих внутрь двигателя влаги в течение 4 часов при полном погружении его в воду;

г) взрывобезопасные (взрывозащищенные), снабженные специальными кожухами, которые выдерживают давление при взрыве газов или паров внутри двигателя и не передают пламени взрыва в окружающую его взрывоопасную среду.

По характеру и величине нагрузки. Выбор электродвигателя по характеру и величине нагрузки производится в зависимости от мощности и режима работы рабочей машины.

Правильный выбор электродвигателя обуславливает достижение во всех его частях нормальной допустимой температуры при работе его по графику, заданному рабочей машиной.

Мощность электродвигателя должна быть выбрана наиболее близкой к мощности рабочей машины, равной или на 5-10% больше его номинальной мощности. Длительная перегрузка недопустима, т.к. это приводит к резкому сокращению срока его службы. Недогрузка двигателя приводит к понижению $cos\varphi$ и недоиспользованию его мощности, что отрицательно влияет на работу электроустановки в целом.

По характеру нагрузки рабочих машин и механизмов различают следующие режимы работы электродвигателей:
продолжительный (с постоянной и переменной нагрузкой);
кратковременный;
повторно-кратковременный.
Продолжительным называют такой режим работы двигателя, при котором температура всех частей электродвигателя достигает установившегося значения τ_y (рис.1), а мощность двигателя определяют по формуле в кВт:

$$P_{дв} = \frac{P_{\max.р.м.}}{\eta_п},$$

где $P_{\max.р.м.}$ – максимальная мощность на валу рабочей машины, кВт; $\eta_п$ – КПД передачи, τ – температура.
Если мощность рабочей машины неизвестна, то мощность двигателя определяют по формуле:

$$P_{дв} = \frac{F_{дв} \cdot \vartheta}{102\,\eta_м \eta_п}, \quad кВт,$$

где $F_{дв}$ – сила, развиваемая электродвигателем, кГ, Н, лошадиных сил, *1 л.с. = 735,5 Вт*; ϑ – скорость движения механизма, рабочей машины, м/с; $\eta_м$ – КПД рабочей машины; $\eta_п$ – КПД передачи.
Мощность электродвигателя для продолжительного режима работы с переменной нагрузкой может быть найдена по эквивалентным значениям тока, мощности или момента, в зависимости от того, в чем выражен график нагрузки рабочей машины
Выбирать мощность двигателя исходя из средней нагрузки нельзя, поскольку тепловые потери в обмотке двигателя зависит от квадрата тока нагрузки. Двигатель, выбранный по средней нагрузке будет перегреваться.
На практике применяют приближенные методы проверки двигателей на нагревание, из которых более простым является метод эквивалентных (среднеквадратичных) величин по рис.16.2:

$$P_{экв} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + P_4^2 t_4 + P_5^2 t_5}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}}.$$

Выбранный двигатель удовлетворяет условиям нагрева, если
$P_{экв} \le P_н$.
Проверка двигателя на перегрузочную способность заключается в сравнении максимального момента по графику нагрузки с максимальным моментом, развиваемым двигателем.
Зная $M_{ном}$ выбранного двигателя, определяют
$M_{max} = к_м M_{ном}$
и сравнивают его с максимальным моментом графика нагрузки
$M_{ном} \ge M_{max}/к_м$.
Если M_{max} двигателя меньше M_{max} нагрузки, то необходимо взять двигатель большей мощности.
При тяжелых пусках проводят проверку двигателя по пусковому моменту
$M_н = M_п / к_п$,
где $к_м$; $к_п$ – данные по справочнику.
Под *кратковременным режимом работы* понимается такой режим, когда в рабочий период температура двигателя не успевает достигнуть установившегося значения, а пауза настолько длинна, что достаточна для охлаждения двигателя до температуры окружающей среды (рис.16.3), а мощность двигателя определяется по уравнению:

$$P_{экв} = \sqrt{\frac{P_п^2 t_п + P_р^2 t_р}{t_п + t_р}},$$

где $P_п$; $P_р$ – мощность при пуске и работе по графику нагрузки, а $t_п$ и $t_р$ – время пуска и работы.
Промышленность выпускает специальные двигатели для кратковременного режима с продолжительностью рабочих периодов 15, 30, 60 и 90 мин.
Повторно - кратковременный режим. При данном режиме двигатель ни в одном из рабочих периодов не нагревается до установившегося значения температуры, в во время пауз не успевает охладиться до температуры окружающей среды (рис..4).
Повторно-кратковременный режим работы характеризуется продолжительностью включения в %:

$$ПВ\% = \frac{t_р}{t_ц} \cdot 100\%,$$

где $t_р$ – время работы; $t_ц$ – время работы за цикл.

Промышленность выпускает специальные двигатели с ПВ 0,15; 0,25; 0,40 и 0,60.
Для повторно-кратковременного режима мощность рассчитывается по формуле:

$$P_{раб} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + P_4^2 t_4 + P_5^2 t_5 + P_6^2 t_6}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}}.$$

Когда расчетная ПВ отличается от стандартного значения, тогда найденная по нагрузочной диаграмме мощность пересчитывается по формуле:

$$P'_{раб} = P_{раб}\sqrt{\frac{ПВ_{расч}}{ПВ_{станд}}},$$

где

$$ПВ_{расч} = \frac{t_р}{t_ц},$$

а $ПВ_{станд}$ берется из справочника, ближайшее к расчетному. Далее по данным справочника [18] может быть подобран двигатель по найденной мощности $P'_{раб}$ и ближайшим ПВ.

Затем проводят проверку двигателя на перегрузочную способность:

$$P_н \geq \frac{P_{max}}{к_м};$$

$$P'_{раб} \leq P_н;$$

$$P_{дв} = к_м \cdot P_н > P_{рм},$$

то есть максимальной мощности рабочей машины.
По способу вентиляции различают:
– двигатели с естественным охлаждением, не имеющие специальных приспособлений для усиления теплоотдачи;
– двигатели с самовентиляцией, имеющие специальный вентилятор, насаженный на вал двигателя и предназначенный для усиления теплоотдачи; у закрытых, так называемых обдуваемых двигателей, этот вентилятор расположен снаружи и покрыт защитным кожухом;
– двигатели с независимым охлаждением (продуваемые); охлаждающий воздух подается в двигатели по воздухопроводу с помощью постороннего вентилятора.

3. Управление электроприводами

Под управлением электроприводами понимают осуществление пуска, торможение, реверсирование, принудительное изменение частоты вращения или поддержание ее на заданном уровне.
Управление электроприводами производится различного рода техническими устройствами – аппаратами управления. Аппараты управления и связывающие их электрические цепи совместно образуют электросхемы управления.
В схемах управления различают:
1) главные электрические цепи, по которым электроэнергия передается от питающей сети к обмоткам приводного двигателя;
2) цепи управления, при помощи которых осуществляется электросвязь между аппаратами управления и обеспечивается последовательность их работы.
Каждое из технических устройств, применяемых в схемах управления, может быть отнесено к одной из следующих групп:
1) коммутационные аппараты для включения и отключения главных электрических цепей: рубильники, автоматы, выключатели, контакторы и т.д.;
2) регулирующие аппараты, например, реостаты, дроссели и другие устройства для изменения величины тока в цепях двигателя;

3) реле – приборы, реагирующие на изменение какой либо физической величины ($I,U,\omega,t°$) и срабатывающие (т.е. замыкающие и размыкающие свои контакты);
4) командоаппараты: кнопки, командоконтроллеры, универсальные переключатели, путевые и конечные выключатели.
В зависимости от способа приведения в действие коммутационных и регулирующих аппаратов различают ручное, дистанционное и автоматическое управление.
При ручном управлении изменение положения коммутационных и регулирующих аппаратов производится за счет мускульной силы человека.
При дистанционном управлении изменение положения коммутационных и регулирующих аппаратов производится силой тяги электромагнитов, вспомогательных двигателей, пневматических, гидравлических и других устройств.
При автоматическом управлении изменения положения различных аппаратов в главных цепях управления, определенная последовательность и темп их работы обеспечиваются цепями управления, но без участия человека (начальная команда дается вручную).
В электрические схемы управления входят также элементы блокировки и защиты электродвигателей.
Блокировочные устройства предназначены для:
предотвращения пуска или останова электродвигателя;
обеспечения определенной последовательности операций;
отключения двигателя при достижении рабочей машиной определенных положений.
Защитные устройства приводятся в действие при возникновении ненормальных режимов: перегрузках, коротких замыканиях, исчезновений или значительном понижении напряжения в питающей сети и др.
Защита осуществляется:
плавкими предохранителями;
специальными реле, контролирующими режим работы электроустановки и автоматически подающими импульс на отключение двигателя.

Раздел 7. Основы электроники.
Тема 7.1. Классификация полупроводниковых приборов. Полупроводниковые резисторы. Полупроводниковые диоды.

Электроника – это область электротехники, изучающая физические явления в электронных приборах и использование этих приборов в промышленности.
Электронным прибором является прибор, в котором электрическая проводимость осуществляется посредством электронов или ионов, движущихся в вакууме, газе или полупроводнике.
Один из основных свойств электронных приборов является нелинейность их вольтамперных характеристик.
Другим важным свойством большой группы электронных приборов является зависимость протекающих в них процессов от внешнего воздействия: тепла, света, сжатия, растяжения, электромагнитного поля и т.д.
Использование в промышленности электроники способствует повышению производительности труда и улучшение условий работы.
Самыми важными полупроводниковыми материалами являются запись меди, селен, германий, кремний, а также арсенид галлия.

Классификация полупроводниковых приборов

В электронике используют большое число различных типов полупроводниковых приборов (ПП), которые можно разделить на несколько групп: 1) ПП резисторы; 2) ПП диоды; 3) биполярные транзисторы; 4) полевые транзисторы; 5) тиристоры

Полупроводниковые резисторы

ПП резистором является ПП прибор с двумя выводами, в котором используется зависимость электрического сопротивления полупроводника от приложенного напряжения ($R = f(U)$).
В ПП резисторах применяют ПП (чаще кремний *Si),* равномерно легированный примесями (легировать – соединять). В зависимости от типа примеси удается получить различные зависимости R от U.

Полупроводниковые диоды

Полупроводниковым диодом называется прибор с одним p-n переходом, имеющим два вывода, пропускающим ток в одном направлении (вентиль). Изготовляются диоды из кремня *Si* и германия *Ge*. Все ПП диоды делятся на два класса: точечные и плоскостные.

В точечном диоде используется пластинка германия или кремния с электропроводностью n-типа. С пластиной соприкасается заостренная стальная проволочка, образующая p-n-переход в месте контакта.

В плоскостных диодах p-n-переход образуется двумя ПП с различными типами электропроводности.

В основе действия всех современных ПП вентилей лежит свойство односторонней проводимости электронно-дырочного перехода, обуславливающее его выпрямляющее действие.

Основными параметрами точечных и плоскостных диодов являются:

- прямой ток диода $1_{пр}$ (при $U_{пр}$ = *1 - 2В);*
- максимальный допустимый прямой ток $1_{пр.max}$;
- максимальное допустимое обратное напряжение $U_{обр.max}$;
- обратный ток диода $1_{обр}$ (при $U_{обр.max}$).

Тема 7.2. Биполярные транзисторы. Полевые транзисторы. Тиристоры.

Биполярным транзистором называется прибор с двумя p-n- переходами, предназначенный для усиления и генерирования электрических колебаний, и представляющий собой пластину кремния или германия, состоящую из трех областей. Имеет три вывода.

Термин "биполярный" связан с наличием двух различных типов носителей заряда - электронов и дырок.

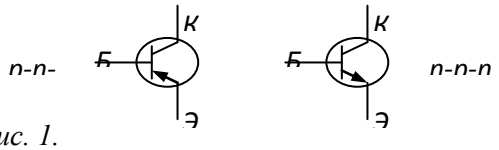


Рис. 1.

Транзисторы p-n-p и n-p-n типа равноценны по своим параметрам, рис..1. Транзисторы p-n-p типа применяются чаще, потому что они проще в изготовлении.

У биполярных транзисторов средний слой называется *базой*. Один крайний слой является источником носителей зарядов, создающий ток прибора, называется *эмиттером*, а другой слой, принимающий заряды, поступающие от эмиттера, – *коллектором*. Дырки в p-n-p транзисторе создающие эмиттерный ток, из области эмиттера попадают в n-область базы, оттуда большая их часть (95-99%) проходит в p-область к коллектору, образуя коллекторный ток I_k . Остальные дырки образуют ток базы $I_б$, текущий через базу Б. На рис.17.2. представлен транзистор p-n-p типа. Транзистор можно рассматривать как соединение двух диодов (рис.17.2). Коллекторный диод работает в обратном направлении для электронов базы, но не для дырок. Дырки, поступающие из эмиттера, попадают в электрическое поле коллектора и притягиваются им.

На высокоомном нагрузочном сопротивлении в цепи коллектора создается падение напряжения, много большее $U_{эб}$, т.е. происходит усиление напряжения. Таким образом, транзистор является усилительным ПП прибором.

Зависимость $I_б = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ}$ = *const* называется входной или базовой характеристикой транзистора, рис.17.3,а. Зависимость $I_k = f(U_{кэ})$ при $I_б$ = *const* называются его выходными (коллекторными) характеристиками (рис.17.3,б).

Биполярные транзисторы являются ПП усилительными и ключевыми приборами универсального назначения. Применяются в усилителях, генераторах, логических и импульсивных схемах.

Полевые транзисторы

Полевым транзистором называется прибор, в котором ток через канал управляется электрическим полем, возникающим с приложением напряжения между затвором и истоком. Устройство транзистора, рис.17.4,а и условное изображение n-типа, рис.17.4,б

Вольтамперные характеристики полевого транзистора с каналами n-типа изображены на рис.17.5,а – выходные, б-переходная.

Канал – это область в транзисторе, сопротивление которого зависит от потенциала на затворе.

Затвором называется электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала.

Истоком – называется электрод, из которого в канал входят основные носители заряда.

Стоком – называется электрод, через который основные носители заряда уходят из канала.

В транзисторе с каналом n-типа основными носителями заряда в канале являются электроны, которые движутся вдоль канала от истока с низким потенциалом к стоку с более высоким потенциалом, образуя ток стока I_c.

Между затвором и истоком приложено $U_{ЗИ}$, запирающее n-p-переход, образованный n-областью канала и p-областью затвора. В полевом транзисторе n-типа приложенное напряжение $U_{СИ} > 0$ и $U_{ЗИ} < 0$.

В полевом транзисторе носители заряда одного знака (- или +) проходят по ПП каналу.

Полевые транзисторы являются низкочастотными приборами и могут работать на частотах до нескольких мегагерц. Применяют их в усилительных каскадах с высоким выходным сопротивлением, ключевых и логических схемах. Изготовляются из кремния.

Тиристоры

Тиристором называется электропреобразовательный ПП прибор с тремя и более p-n переходами, в ВАХ которого имеется участок отрицательного дифференциального сопротивления и, который используется для переключения. На рис.17.6 представлены структура – а, ВАХ – б и условное обозначение тиристора – в.

Отрицательное сопротивление - сопротивление нелинейного проводника, в котором увеличение напряжения вызывает уменьшение тока, и, наоборот. Отрицательное сопротивление проводника обладает падающей характеристикой.

Тиристор ПП прибор, структуры p-n-p-n -типа, содержащий три p-n-перехода. Они изготавливаются из кремния и имеют четыре слоя: p_1-n_1-p_2-n_2.

Между этими слоями возникают три p-n-перехода: $П_1$, $П_2$, $П_3$. Сопротивление открытых переходов $П_1$ и $П_3$ незначительны, поэтому почти все имеющее напряжение U_a приложено к

При повышении U_a, что достигается увеличением ЭДС источника питания E_a, ток вентиля увеличивается незначительно, пока U_a не приблизится к некоторому критическому значению, равному напряжению прямого пробоя $U_{проб1}$.

После этого происходит лавинообразное увеличение числа носителей заряда за счет лавинного умножения носителей в переходе $П_2$ движущимся электронами и дырками. С увеличением числа носителей ток в переходе $П_2$ быстро нарастает, падение напряжения на R_a увеличивается, напряжение на вентиле U_a падает (2-й закон Кирхгофа в действии).

Процесс лавинообразного увеличения числа носителей заряда завершается пробоем перехода $П_2$. После пробоя U_a снижается до 0,5-1 В. При дальнейшем увеличении ЭДС E_a или уменьшении R_a ток в пробое нарастает в соответствии с вертикальным участком ВАХ. Такой пробой не вызывает разрушения перехода $П_2$. При уменьшении тока до нуля восстанавливается высокое сопротивление перехода $П_2$. Время восстановления сопротивления этого перехода после снятия напряжения составляет 10-30 мксек.

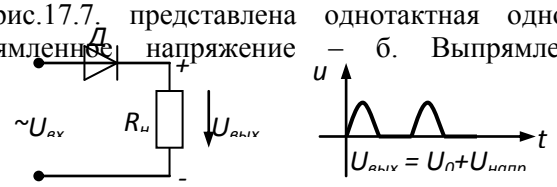
Напряжение пробоя $U_{проб}$, при котором начинается лавинообразное нарастание тока, может быть снижено добавлением третьего управляющего электрода к слою P_2 питаемого от независимого источника напряжения E_y. В какой мере снижается пробивное напряжение $U_{проб}$ при росте тока управления I_y, показывает график характеристики, представленный на рис.17.6.

Тиристоры применяют в управляемых выпрямителях и инверторах. Промышленностью выпускаются тиристоры на токи до 2000 А и напряжением включения или прямого пробоя на 100-4000 В.

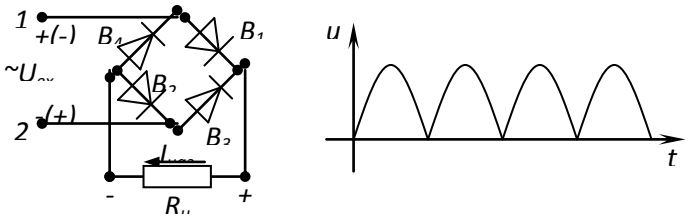
Тема 7.3. Неуправляемые и управляемые выпрямители

Простейший выпрямитель представляет собой вентиль (элемент с односторонней проводимостью), включенный последовательно с приемником постоянного тока в сеть переменного тока.

На рис.17.7. представлена однотактная однополупериодная схема выпрямителя – а и выпрямленное напряжение – б. Выпрямленное напряжение является пульсирующим.



Выпрямителем называется устройство, преобразующее переменные токи в токи, протекающие в одном направлении.
Одной из схем выпрямителя, которая дает меньше пульсаций, является двухполупериодная однофазная мостовая схема выпрямителя, рис.17.8,а

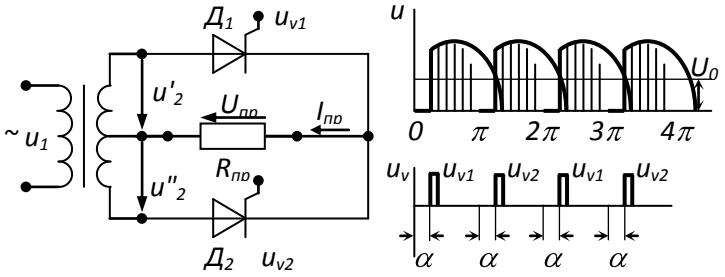


Направление тока через нагрузку одно и то же, как в первую, так и во вторую половину периода, поэтому на нагрузке образуются полуволны напряжения одного и того же знака, рис.17.8,б.

Значительно меньшие пульсации имеют трехфазные схемы выпрямления. Трехфазный выпрямитель может быть выполнен по одно- или двухполупериодной схеме, в этом случае пульсации уменьшаются.
Второй путь уменьшения пульсации $U_{вып}$ – использование электрических фильтров. На рис.17.9. изображены, некоторые, схемы сглаживающих фильтров.

В качестве фильтров в схему включают конденсатор параллельно нагрузке или индуктивную катушку последовательно с нагрузкой. Энергетической основой работы этих фильтров являются накопление энергии емкостью или индуктивностью, в моменты времени, когда возрастает напряжение или ток в нагрузке или когда происходит отдача накопленной энергии в нагрузку при спаде U или I и замедление этого спада.
Сглаживающим фильтром называется устройство, предназначенное для уменьшения переменной составляющей выпрямленного напряжения.можно регулировать значения выходных напряжений.

Управляемым называется такой выпрямитель, у которого при неизменном входном $U_{вх}$ можно регулировать $U_{вых}$ за счет изменения времени прохождения тока через вентиль. На рис.17.10. изображена схема управляемого выпрямителя на тиристорах – а и диаграммы напряжения – б.
Принцип действия управляемых выпрямителей отличается от неуправляемых только тем, что переключение фаз выпрямителя происходит не в момент равенства фазных ЭДС, а позже на угол запаздывания α.



На рис. представлен управляемый выпрямитель, собранный по двухполупериодной схеме с выводом средней точки трансформатора. В схему включены тиристоры *Д1* и *Д2*, моменты их открывания определяются моментом подачи на управляющие электроды положительных управляющих импульсов напряжения u_{y1} или u_{y2}. Если импульс u_{y1} подан на тиристор *Д1* в момент t_1, то он откроется с задержкой во времени относительно момента $t = 0$, то есть со сдвигом по фазе на угол $\alpha = \omega t$. Угол α, выраженный в электрических градусах, называется *углом управления.*

Управляющие импульсы u_{y1} и u_{y2} имеют период следования, равный периоду выпрямленного напряжения. Угол α можно менять в широких пределах. В управляемых выпрямителях подача положительных управляющих импульсов на управляющие электроды тиристора осуществляется при помощи систем управления. Для четкого момента включения тиристоров управляющие импульсы должны иметь крутой передний фронт (рис.17.10,б).

Тема 7.4. Усилители электрических сигналов. Усилители на биполярных транзисторах

Усилителями называются устройства, предназначенные для усиления слабых электросигналов с условием сохранения их формы, за счет дополнительного источника энергии, питающего усилитель.

Такие устройства необходимы в схемах автоматического управления, в измерительной технике, телемеханике, радиотехнике. Приборами, управляющими мощностью внутри усилителя, могут быть транзисторы или электронные лампы, в соответствии с чем электронные усилители подразделяются на полупроводниковые и ламповые.

Свойства усилителя характеризуются, прежде всего, коэффициентами усиления по напряжению, току, мощности:

$$\kappa_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}; \qquad \kappa_I = \frac{I_{вых}}{I_{вх}};$$

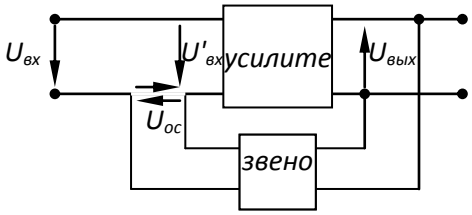
$$\kappa_P = \frac{P_{вых}}{P_{вх}} = \frac{U_{вых} I_{вых}}{U_{вх} I_{вх}} = \kappa_U \kappa_I .$$

В большинстве случаев усиления сигнала, даваемое одним транзистором или лампой, оказывается недостаточным, поэтому используют несколько ступеней усиления, называемых каскадами. Коэффициенты усиления многокаскадных усилителей равны произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов, т.е.

$$\kappa_y = \kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot \kappa_3 \cdot ...$$

Основные связи между каскадами в транзисторных усилителях: емкостная, трансформаторная, гальваническая (через резистор *R*).

Нередко в усилителях часть выходного напряжения или тока подают через какую-либо цепь обратно на вход усилителя. Поэтому *обратной связью* в технике принято называть воздействие выходной величины устройства на ее вход. При этом коэффициент усиления может стать больше или меньше, чем без обратной связи. Следует различать обратную связь отрицательную, если она направлена против входной величины, в противном случае она положительна. В электронных усилителях обратная связь применяется для подавления искажений формы кривой сигнала при усилении, для увеличения коэффициента усиления, например, на рис.17.11 изображена структурная схема усилителя с обратной связью по напряжению. Обратная связь также может быть по току.



Усилители на биполярных транзисторах

Транзисторные усилители включаются по трем основным схемам в зависимости от выбора общего электрода усилительного каскада, т.е. электрода, входящего одновременно во входную и выходную цепи усилителя. Общий электрод обычно заземляется.

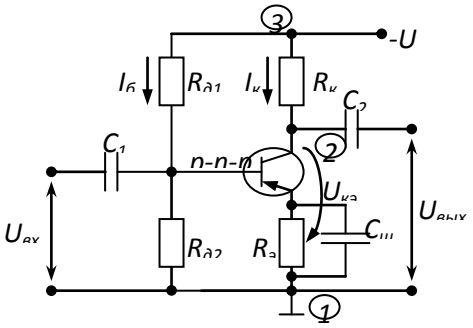
Схемы усилителей на транзисторах бывают: с общей базой, с общим коллектором и с общим эмиттером. Схема с общим эмиттером предпочтительнее других схем при большем усилении мощности и тока (рис.17.12).

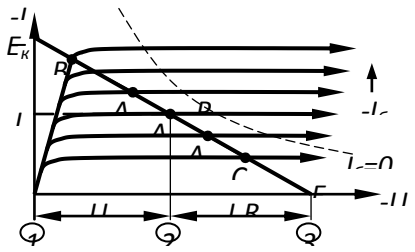
На рис.17.13 представлены семейство выходных характеристик транзистора с нагрузочной прямой.

Технически выгодно получать постоянный ток базы от источника коллекторного напряжения, т.е. использовать лишь один источник питания. На рис.17.12 показана простая схема с делителями напряжения $R_{д1}$ и $R_{д2}$, где через $R_{д1}$ подается ток на базу транзистора.

Работа схемы становится понятной при рассмотрении семейства кривых, где согласно уравнению $U_{кэ} = U - I_к R_к$. Значение $U_{кэ}$ при различных I_k находятся при помощи нагрузочной прямой, которая пересекает семейство характеристик.

Путем задания определенного тока базы $I_б$ при помощи резистора $R_{б1}$ фиксируется рабочая точка *A* на нагрузочной прямой – точка пересечения этой прямой с соответствующей характеристикой тока базы. Рабочая точка определяет ток коллектора и напряжение на участке коллектор-эмиттер.





Усиливаемый сигнал подается на вход, т.е. через конденсатор C_1 на базу. Конденсатор нужен для разделения цепей питания и сигнала. Синфазно с переменным напряжением сигнала $U_{вх}$ изменяется ток базы, а следовательно, и положение рабочей точки на нагрузочной прямой (например, между A_1 и A_2). С помщью проекций участка A_1 - A_2 на ось абсцисс и ось ординат определяют усиленное переменное напряжение и усиленный переменный ток. Переменное напряжение поступает на выходные выводы через конденсатор C_2. В точке *B* наступает режим насыщения, а в точке *C* – режим отсечки (запирание) транзистора. Поэтому рабочая точка не должна заходить в эти области, иначе получается усиление с сильными искажениями.

При любом способе включения транзисторного усилителя возникает обратная связь через ветвь общего электрода.

Назначение емкости $C_ш$ шунтирующей $R_э$ – пропускать переменную составляющую эмиттерного тока помимо сопротивления $R_э$.

Тема 7.5. Импульсная и цифровая техника

Импульсные устройства это дискретные устройства.

Многие радиотехнические устройства работают в прерывистом (импульсном) режиме. Элементы этих устройств и проходящие в них процессы составляют содержание импульсной техники.

Импульсная техника составляет базу радиолокации и телевидения, применяется в автоматике, вычислительной технике, многоканальной радиосвязи, радиоизмерениях и т.д.

Использование методов импульсной (дискретной) техники позволяет решать большой круг задач, совершенствовать способы контроля и технологию производства самых различных отраслей промышленности.

К импульсным (дискретным) устройствам относятся:

импульсные усилители, связанные с автоматикой (выполняются на ПП приборах);

мультивибраторы – релаксационные генераторы, вырабатывающие электрические негармонические колебания близкие по форме к прямоугольным;

триггеры – устройства, имеющие одно или два устойчивых состояний. Из этих состояний триггер выводится внешним запускающим сигналом (иногда триггеры называют спусковым устройством);

блокинг-генераторы – это релаксационные генераторы негармонических колебаний с сильной индуктивной обратной связью;

линейные устройства преобразования импульсов;

нелинейные устройства импульсов - ключевые схемы или проще ключи.

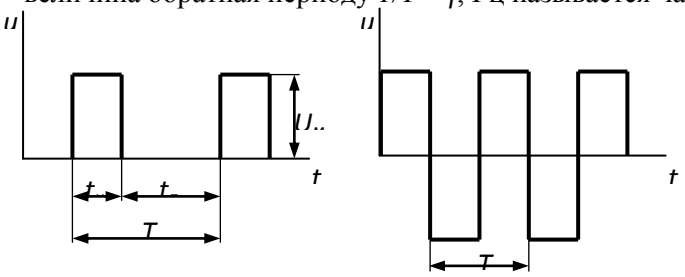
Параметры и характеристики импульсных сигналов

Под импульсом понимается кратковременные отклонение напряжения или тока от некоторого постоянного уровня, в частности от нулевого.

Импульсы могут быть: прямоугольные, треугольные, прямоугольные двуполярные, трапецеидальные, экспоненциальные. Существует два вида импульсов: видеоимпульсы – кратковременное изменение *U* и *I* в цепях постоянного тока; радиоимпульсы – кратковременное изменения синусоидальных *u* и *i*.

Различают импульсы положительной и отрицательной полярности, а также двухсторонние (разнополярные) импульсы. В импульсной технике наиболее часто используется прямоугольные импульсы. На рис.18.1 изображены: а) – прямоугольные импульсы и б) – прямоугольные двуполярные.

На рис.18.1,а изображен реальный прямоугольный импульс и на нем показаны: длительность импульса t_u – это время прохождения импульса (с, мс, мкс, нс – нанос = 10^{-9}с); амплитуда – наибольшее значение U_m или I_m; пауза – время паузы t_n; период повторения импульсов – *T*, с; величина обратная периоду $1/T = f$, Гц называется частотой повторения импульсов.



Под фронтом понимают боковую сторону импульса. Различают передний и задний фронты. Задний называют спадом или срезом. Длительность переднего фронта определяет время нарастания импульса $t_ф$, а длительность заднего фронта - время спада импульса t_c. Крутизна фронта (среза), В/с – это отношение

$$S = \frac{U_m}{t_ф}.$$

Мощность в импульсе, Вт:

$$P_u = \frac{W}{t_u}.$$

Коэффициент заполнения:

$$\gamma = \frac{t_u}{T} = \frac{T - t_n}{T} < 1.$$

Величина обратная коэффициенту заполнения называется скважностью импульсов:

$$q = \frac{1}{\gamma} = \frac{T}{t_u} > 1.$$

Средняя мощность импульса - это энергия *W*, выделенная в цепи за период следования, отнесенная к длительности периода Т:

$$P_{cp} = \frac{W}{T}.$$

Если

$$P_u t_u = P_{cp} T,$$

$$P_u = P_{cp} T / t_u = P_{cp} q,$$

$$P_{cp} = \frac{P_u t_u}{T} = \frac{P_u}{q} = P_u \gamma,$$

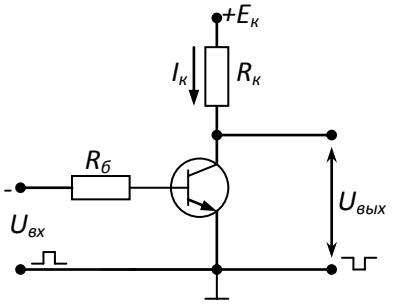
т.е. средняя мощность в *q* раз меньше мощности в импульсе.

Транзисторный ключ

Одним из основных элементов импульсной и цифровой техники является ключевое устройство.

Ключевое устройство (ключи) служат для коммутации (переключения) цепей нагрузки под воздействием внешних управляющих сигналов. Ключи входят в качестве отдельных элементов в состав сложных устройств - триггеров, мультивибраторов и т.д. Схема ключа на биполярном транзисторе n-p-n типа изображена на рис.18.2.

В режиме отсечки (ключ закрыт) $I_б = 0$, $I_к = I_{кн}$, $U_к \approx E_к$, рис.17.13, точка С.



В режиме насыщения (ключ открыт) при положительном потенциале базы, точка В .

Транзисторный ключ может находится в одном из двух состояний: выключено, когда транзистор закрыт и ключ разомкнут, и включено, когда транзистор открыт и ключ замкнут.

Для анализа работы ключа на семейство выходных характеристик наносят нагрузочную прямую, соответствующую определенному сопротивлению резистора R_K и пересекающую координатные оси в точках $E_к$ и $E_к / R_к$, рис.17.13.

При изменении базового тока $i_б$ рабочая точка, перемещается вдоль этой прямой, определяя в каждый момент времени коллекторный ток $I_к$, напряжение $U_{кэ}$ между коллектором – эмиттером и режим работы транзистора.

Триггеры

Запоминающие элементы - триггеры с двумя устойчивыми состояниями.

Триггер – электронная схема, имеющая два устойчивых стационарных состояния; переходы из одного состояния в другое и обратно совершается под действием запускающих импульсов.

На рис.18.3 изображенриггер – элемент с двумя устойчивыми состояниями: а) – обозначение; б) – схема; в) – раздельные входы с гальванической связью; г) – рабочая характеристика. Запоминающие звенья могут быть изготовлены в виде триггеров. Схема состоит из двух одинаковых транзисторных каскадов, работающих в режиме переключения. Оба каскада соединены между собой через резисторы R_3 и R_4 так, что база одного транзистора возбуждается потенциалом коллектора другого транзистора заперт – закрыт, находится в режиме отсечки. Тогда база T_2 присоединится через R_4 и R_1 к положительному полюсу источника и транзистор T_2 отпирается – открывается, находится в режиме насыщения. Коллектор T_2 оказывается под низким остаточным напряжением $U_{кэ.отп}$, которое через R_3, R_5 обеспечивает запирание T_1. Это стабильное состояние (T_1 – запирание – отсечка, T_2 – отпирание – режим насыщения) автоматически сохраняется при наличие сигнала 1 на выходе $У_1$ и сигнала 0 на выходе $У_2$.

Возможным и также стабильным является и обратное состояние, т.к. схема симметрична. Поэтому схема имеет название "с двумя устойчивыми состояниями".

Триггер может переключатся при помощи сигнала, подаваемого на базу транзистора. Пусть T_1 заперт, а T_2 не заперт. Если подать на вход X_2 отрицательный сигнал, то T_2 запирается, его высокий потенциал коллектора откроет T_1. Незначительное остаточное напряжение T_1 через R_4 поступает на базу T_2, T_2 остается запертым из-за отрицательного напряжения смещения (подаваемого через резистор R_6), даже если на вход X_2 уже не подается никакого отрицательного сигнала.

Двухсторонняя связь усиливает процесс переключения, возбуждаемый извне, так что триггер очень быстро "опрокидывается" в другое состояние. Конденсаторы C_1 и C_2 ускоряют процесс опрокидывания. В стабильном состоянии C_1 и C_2 не выполняют никакой функции.

Отрицательное напряжение на входе X_1 может переключить схему в исходное состояние.

Непосредственное управление через входы X_1 и X_2 невозможно, т.к. даже в те интервалы времени, когда управляющих импульсов нет, возможно воздействие помех. Если бы напряжение в эти интервалы времени было равно нулю, то оба транзистора были бы заперты, а при положительном напряжении - отперты.

Цифровые схемы

Значение автоматизации огромно. Она освобождает человека от физической и однообразной умственной работы и позволяет ему заниматься творческим трудом. Выполнение автоматизированных программ управления связано с измерениями и вычислительными операциями.

Управление – это процесс, при котором одна или несколько величин в качестве входных определяет на основе заданных закономерностей выходные величины. При автоматическом

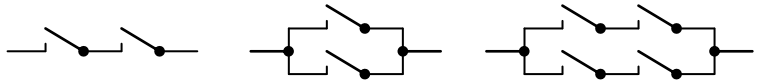
управлении все процессы происходят без участия человека, даже если первоначальный сигнал посылается вручную.

При таком типе управления приходится часто принимать логические решения. Целесообразно при этом использовать цифровые данные. Очень просто можно технически реализовать двоечные числа. Обе двоечные цифры 0 и 1 могут надежно характеризовать два физических состояния объекта, что легко осуществить при помощи электромеханических или электронных переключателей (см. табл.1).

Таблица 1

Двоичная цифра	0	1
контактное реле	разомкнут	замкнут
транзистор	не проводит	проводит
напряжение	малое (почти нулевое)	высокое
ток	малый (почти нулевой)	большой
сопротивление	низкое	высокое

В схемах управления используется последовательные, параллельные или последовательно-параллельные соединения контактов:



С увеличением числа контактов для получения нескольких выходных сигналов при заданных входных сигналах затрудняется процесс выбора управляющих схем. Идеальную помощь оказывает при этом алгебра логики (алгебра переключений). Она является ветвью математической логики и используется утверждениями "истинно" и "ложно". Эти понятия тоже можно выразить через два состояния переключения (см. табл..2).

Алгебра логики описывает лишь функцию схемы, а не ее техническую реализацию. Поскольку здесь логика символов применяется при решении проблем переключения, схемы, работа которых может быть описана при помощи алгебры логики, называются также логическими схемами. Выбор правильной из двух возможностей осуществляется при помощи двухзначной логики. Двухзначная логика дороже многозначной логики, но выразительнее.

Таблица 2.

Двоичная цифра	0	1
Контакт	Разомкнут	Замкнут
Логическое утверждение	Ложно	Истинно
Решение	Нет	Да

Основой устройств цифровой обработки информации: вычислительных машин, цифровых измерительных приборов и устройств автоматики – являются логические элементы вместе с запоминающими устройствами.

Логические элементы выполняют простейшие логические операции над цифровой информацией, а запоминающие элементы служат для ее хранения.

Микропроцессор – это большая интегральная (цельная, единая) схема (БИС), реализующая логические (переключающие) и арифметические операции, функции которой заданны программным путем.

Микропроцессор универсален в том смысле, что заменяет множество специализированных БИС, которые ориентированы на строго определенный и ограниченный круг операций.

Сначала первые интегральные схемы были переключающими схемами. При использовании интегральных схем применялась диодно-транзисторная логика (ДТЛ), транзисторный ключ, триггер и т.д. Из этой логики сформировалось очень распространенное в наше время семейство логических схем, называемое транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ).

Характерным для ТТЛ является наличие на входе схемы многоэмиттерного транзистора. Основным конструктивным элементом является схема НЕ-И.

Интегральные микросхемы поставляются в стандартных (унифицированных) корпусах. Число размещаемых схем ограничивается не объемом, а наличием лишь 14 выводов на кожухе. Сумма входов и выходов с учетом двух питающих проводов с рабочим напряжением не должна превышать число 14. Это обуславливает стандартные комбинации логических схем с различным числом входов в одном кожухе

4.3. Лабораторные работы

№ п/п	Номер раздела дисциплины	Наименование лабораторной работы	Объем (час.)	Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)
1	**1.**	Пассивные элементы электрических цепей	1	-
2	**1.**	Активные элементы электрических цепей	1	-
3	**1.**	Исследование линейных электрических цепей постоянного тока	3	-
4	**1.**	Исследование амплитудных и фазовых соотношений в последовательной RLC- цепи	5	-
5	**1.**	Исследование режимов работы трехфазной электрической цепи синусоидального тока при соединении фаз приемника по схеме «звезда»	4	-
6	**2.**	Исследование однофазного трансформатора (ОТ)	4	-
7	**3.**	Исследование генератора постоянного тока	4	-
8	**4.**	Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	4	-
9	**7.**	Исследование вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов	4	-
10	**7.**	Маломощный однофазный выпрямитель	4	-
		ИТОГО	**34**	-

4.4. Семинары/ практические занятия

Учебным планом не предусмотрено

4.5. Контрольные мероприятия.

Контрольная работа №1 Анализ и расчет линейных электрических цепей постоянного и переменного тока

Цель: закрепление обучающимися основных разделов курса, а также проверка степени усвоения теоретического материала дисциплины

Структура: Контрольная работа должна быть выполнена в виде расчетно-пояснительной записки и чертежей электрических схем согласно заданию.

Основная тематика: Линейные электрические цепи представляют собой совокупность устройств, предназначенных для генерации, передачи, преобразования и потребления электрической энергии. Приступая к решению задачи анализа электрических цепей, необходимо иметь представления о внешних характеристиках и режимах работы генерирующих и приемных устройств, а также об их условных графических и символьных обозначениях. Следует знать основные законы и свойства линейных электрических цепей.

Предполагается, что задачи, выполненные на эту тему, позволят приобрести навыки анализа линейных электрических цепей.

Рекомендуемый объем: 5-7 страниц рукописного текста или текстовой части выполненной на компьютере в формате ODF (ГОСТ Р ИСО/ МЭК 2630 – 2010) , либо в формате MSOffise 2003,2007,2010

Контрольная работа №2. Расчет мощности и выбор типа электрического двигателя для привода рабочего механизма

Цель: Получить навыки расчета мощности электродвигателя для обеспечения высокой производительности, надежности и точности работы производственных механизмов

Структура: Контрольная работа должна быть выполнена в виде расчетно-пояснительной записки и чертежей согласно заданию.

Введение.

1. Выбор электродвигателя

1.1. Предварительный выбор.

1.2. Проверка на перегрузочную способность.

1.3. Построение механической характеристики двигателя.

2. Выбор проводов.

3. Выбор аппаратов управления и защиты.

4. Расчет мощности компенсирующего устройства.

5. Выбор электрической схемы управления.

6. Защитное заземление (зануление) электродвигателя.

Графическая часть работы состоит из четырех листов формата А4, на которых должны быть представлены:

- график нагрузки производственного механизма $M=f(t)$;
- механическая характеристика двигателя $M=f(s)$, $n=f(M)$;
- схема управления электродвигателем;
- схема заземления (зануления) электродвигателя.

Основная тематика:

Расчет индивидуального электродвигательного устройства (ЭДУ) рабочего механизма начинается с ознакомления с технологическим процессом и его особенностями, которые могут существенно влиять на принимаемые решения. При выборе необходимо учитывать, что для данного привода подходит асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Управление им можно производить с помощью магнитного пускателя (реверсивного или нереверсивного).

Во введении обосновывается особенность электропривода строительно-дорожных машин, кратко приводится перечень основных вопросов, решаемых в контрольной работе, способы и методы их решения.

В тексте контрольной работы объясняется ход решения рассматриваемых вопросов с указанием применяемых методов, формул и ссылок на источники.

При рассмотрении какого-либо вопроса должен быть дан пример расчета, а для остальных аналогичных случаев результаты сводятся в таблицу.

Рекомендуемый объем: 20-30 страниц рукописного текста или 18 - 22 страницы текстовой части выполненной на компьютере в формате ODF (ГОСТ Р ИСО/ МЭК 2630 – 2010) , либо в формате MSOffise 2003,2007,2010

Выдача задания, прием и защита контрольных работ проводится в соответствии с календарным учебным графиком

Оценка	**Критерии оценки контрольной работы**
отлично	Контрольная работа сдана в первые две недели защит. В контрольной работе все задания выполнены правильно и в полном объеме. Решения задач содержат пояснения к расчетам. Вычисления приведены в развернутом виде, аргументированы, содержат графики. Электрические схемы выполнены в соответствии с требованиями ЕСКД. Дан полный ответ на контрольный вопрос.
хорошо	Контрольная работа сдана с третью по четвертую недели защит или контрольная работа содержит небольшие неточности в оформлении и расчетах или нет полного ответа на контрольный вопрос.
удовлетворительно	Контрольная работа сдана вне срока приема контрольных работ, но во время экзаменационной сессии или содержит значительное количество ошибок, или 30 % заданий не выполнено
неудовлетворительно	Контрольная работа не сдана в установленный срок или 50 % заданий не выполнено

5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Компетенции / *№, наименование разделов дисциплины*	*Кол-во часов*	*Компетенция*			*Σ комп.*	*$t_{ср}$, час*	*Вид учебных занятий*	*Оценка результатов*
		ОК-1	*ПК-10*	*ПСК-2,7*				
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
1. Электрические и магнитные цепи	39	+	+	+	3	13	Лк, ЛР, СР	кр экзамен
2. Трансформаторы	11	+	+	+	3	3,7	Лк, ЛР, СР	экзамен
3. Машины постоянного тока	16	+	+	+	3	5,3	Лк, ЛР,СР	экзамен
4. Асинхронные машины	25	+	+	+	3	8,3	Лк, ЛР, СР	экзамен
5 Синхронные машины	12	+	+	+	3	4	Лк,СР	экзамен
6. Основы электропривода	11	+	+	+	3	3,7	Лк, СР	кр, экзамен
7. Основы электроники	30	+	+	+	3	10	Лк, ЛР, СР	экзамен
всего часов	**144**	**48**	**48**	**48**	**3**	**48**		

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / М.П.Титов, Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с.
2. Белоус А.И. Полупроводниковая силовая электроника./ Белоус А.И., Ефименко С.А., Турцевич А.С. - Москва: Техносфера, 2013. - 216 с.+12 с цв. вкл
3. Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.

7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№	***Наименование издания***	***Вид заня-тия***	***Количество экземпляров в библиотеке*, шт.**	***Обеспечен-ность*, (экз./ чел.)**
1	**2**	**3**	**4**	**5**
	Основная литература			
1	Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - 8-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2016. - 736 с. https://e.lanbook.com/book/71749#book_name	Лк, ЛР, кр, СР	ЭР	1,0
2	Титов, М. П. Электротехника: Учебник. / М.П.Титов, Г. А. Большанин. 2 – изд., испр. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 356 с. http://ecat.brstu.ru/catalog/Учебные%20и%20учебно-методические%20пособия/Энергетика%20-%20Автоматика/Большанин%20Г.А.%20Электротехника.Учебник.2010.pdf	Лк, ЛР, кр, СР	219+ ЭР	1,0
3	Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: Учебное пособие для вузов / Г.И.Атабеков. - 7-е изд.,	Лк, ЛР, СР	6 + ЭР	1,0

	стереотип. – Санкт-Петербург: Лань, 2009. – 592 с. https://e.lanbook.com/reader/book/90/#4			
4	Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с.	Лк, ЛР, кр, СР	98	1,0
Дополнительная литература				
5	Белоус А.И. Полупроводниковая силовая электроника./ Белоус А.И., Ефименко С.А., Турцевич А.С. - Москва: Техносфера, 2013. - 216 с.+12с цв. вкл http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=273783&sr=1	Лк, ЛР, СР	ЭР	1,0
6	Большанин Г.А. Теоретические основы электротехники: методические указания по выполнению лабораторных работ на компьютеризированном оборудовании /Г.А.Большанин. - Братск: БрГУ, 2011. - 119 с	ЛР, СР	203	1,0
7	Г.А.Большанин, Электротехника и электроника. Исследование электрических машин в системах электроснабжения: методические указания к выполнению лабораторных работ/ Г.А.Большанин, Ю.А.Корнюхин. – Братск: Изд-во БрГУ, 2013. – 96 с.	ЛР,СР	274	1,0
8	Большанин Г. А. Теоретические основы электротехники. В 2-х ч. Ч. 1.: Учебное пособие. / Г. А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2005. – 433 с.	Лк, ЛР, СР	57	1,0
9	Большанин, Г. А. Электротехника и электроника. Расчет мощности и выбор типа электрического двигателя для привода рабочего механизма: методические указания к выполнению контрольной работы / Г. А. Большанин, Н. А. Астапенко. - Братск: БрГУ, 2013. - 46 с.	кр, СР	251	1,0

8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО - ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1.Электронный каталог библиотеки БрГУ
http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=.
2. Электронная библиотека БрГУ
http://ecat.brstu.ru/catalog .
3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online»
http://biblioclub.ru .
4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань»
http://e.lanbook.com .
5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам"
http://window.edu.ru .
6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU http://elibrary.ru .
7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ)
https://uisrussia.msu.ru/ .
8. Национальная электронная библиотека НЭБ
http://xn--90ax2c.xn--p1ai/how-to-search /.

9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ/ семинаров /практических работ

Лабораторная работа № 1 Пассивные элементы электрических цепей

Цель работы: ознакомление с устройством, параметрами и свойствами резистивных, емкостных и индуктивных элементов, экспериментальная проверка принципов преобразования пассивных двухполюсников.

Порядок выполнения:

Резисторы и резистивные двухполюсники

1. Измерить сопротивления резисторов R1…, R5. Результаты измерений и номинальные значения сопротивлений занести в таблицу 1.
2. Пользуясь данными таблицы 1, рассчитать сопротивления двухполюсников.
3. Скоммутировать двухполюсники, измерить их сопротивления и сопоставить результаты измерения и расчетные данные.

Таблица 1

Сопротивления, кОм	R1	R2	R3	R4	R5

2.Конденсаторы

1. Измерить емкости конденсаторов С1,…, С4. Результаты измерений и номинальные значения емкостей занести в таблицу, оформив ее аналогично табл.1.
2. Пользуясь данными табл.2, рассчитать эквивалентные емкости двухполюсников.
3. Скоммутировать двухполюсники, измерить их емкости и сопоставить результаты измерений и вычислений.

3. Индуктивные элементы

3.1.Расчитать индуктивности элемента L1 с одной и двумя обмотками, включенными последовательно. Произвести измерения соответствующих индуктивностей, сопоставить результаты измерений.

3.2. Измерить индуктивности элементов , .Уяснить влияние магнитопровода на велтчтну индуктивности, оценить величину магнитной проницаемости.

Форма отчетности:

Результат выполнения работы представляется и оформляется в форме отчета. В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:

1. Резистивные элементы

1.1. Схемы эксперимента

1.2. Результаты измерений сопротивлений (табл.1)

1.3. Расчет сопротивлений двухполюсников и результаты измерений

2. Конденсаторы

2.1. Схемы эксперимента

2.2. Результаты измерений емкостей (табл.1)

2.3. Расчет сопротивлений двухполюсников и результаты измерений

3. Индуктивные элементы

3.1. Схемы эксперимента

3.2. Результаты измерений и расчетов индуктивностей элемента, выполненного на кольцевом магнитопроводе.

3.3. Выполнить измерение индуктивностей катушек индуктивностей без магнитопровода и с броневым магнитопроводом.

Выводы по работе.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 1.1. раздела 1.

Основная литература

[1,2,3]

Дополнительная литература

[6,8]

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Какие элементы электрических цепей относятся к пассивным? Какими свойствами обладают эти элементы?
2. Дайте определение понятию «идеальный пассивный элемент». назавите параметры идеальных элементов.
3. Как изменится напряжение на заряженном конденсаторе, если параллельно к нему подключить незаряженный конденсатор?
4. Назовите возможные способы регулирования индуктивности (емкости)?

Лабораторная работа № 2 Активные элементы электрических цепей

Цель работы: Изучение свойств источников ЭДС и источников тока

Порядок выполнения:

1. Источник ЭДС

1.1. К гнездам мнемонической схемы источника ЭДС подключить измерительные приборы (вольтметр и амперметр).

1.2. Изменяя сопротивление нагрузки, снять внешнюю характеристику идеального источника ЭДС ( )

1.3. Снять внешние характеристики источника ЭДС для двух конечных значений внутреннего сопротивления.

1.4. Построить ВАХ источника ЭДС.

2. Источник тока

2.1. К гнездам мнемонической схемы источника тока подключить измерительные приборы (вольтметр и амперметр).

2.2. Установить режим идеального источника тока ( ).Изменяя сопротивление нагрузки от нуля (короткое замыкание) до максимального, снять внешнюю характеристику источника тока.

2.3. Снять внешние характеристики источника тока для двух конечных значений внутренней проводимости.

2.4. Построить ВАХ источника тока.

3. *Взаимные преобразования источников электрической энергии*

По указанию преподавателя произвести преобразования источника ЭДС в эквивалентный источник тока, и наоборот.

Форма отчетности:

Результат выполнения работы представляется и оформляется в форме отчета. В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:

1. Исследование источников ЭДС (схема, таблица результатов, ВАХ).
2. Исследование источников тока (схема, таблица результатов, ВАХ).
3. Эквивалентные преобразования источников электрической энергии.
4. Выводы по работе.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 1.1. раздела 1.

Основная литература

[1,2,3]

Дополнительная литература

[6,8]

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. В каких случаях при расчете цепей источники электрической энергии целесообразно представлять в виде источника ЭДС, в каких - в виде источника тока?
2. Приведите примеры реальных источников электрической энергии, свойства которых близки к свойствам источников ЭДС (источника тока)
3. Отражает ли представление источника электрической энергии в виде идеального источника тока реальный энергетический процесс внутри источника. Почему?
4. Возможно ли эквивалентирование идеальных источников ЭДС и тока?

Лабораторная работа № 3 Исследование линейных электрических цепей постоянного тока

Цель работы: выявление степени соответствия аналитических и экспериментальных методов анализа линейных электрических цепей постоянного тока

Порядок выполнения:

1. По величинам E_1 и E_2 и параметрам R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 и R_6, указанным на лабораторной панели или преподавателем, для электрической цепи, схема которой приведена на рис.1 определить истинные направления и рассчитать величины токов во всех ветвях данной цепи.

Для этого использовать метод контурных токов и метод узловых потенциалов. Результаты расчетов внести в табл.1.

Таблица 1

Результаты вычислений и измерений токов в ветвях цепи

Способ определения	I_1, *А*	I_2, *А*	I_3, *А*	I_4, *А*	I_5, *А*	I_6, *А*
Метод контурных токов						
Метод узловых потенциалов						
Метод эквивалентного генератора						
Измерено						

Здесь и далее индексация токов принимается совпадающей с индексацией резисторов.

2. Скоммутировать на лабораторной панели электрическую цепь, схема которой приведена на рис. 1. Измерить токи и рассчитать по закону Ома напряжения на участках цепи. Полученные результаты занести в первую строку табл. 2 и в последнюю строку табл. 1.

Таблица 2

Результаты измерений

E_1	E_2	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
в		**А**						**В**					
	0												
0													

3. Исключить из исследуемой цепи источник ЭДС E_2, замкнув накоротко образовавшийся разрыв. Измерить токи в ветвях и рассчитать напряжения на участках цепи. Полученные результаты занести во вторую строку табл. 2.

4. Восстановить цепь, включить источник ЭДС E_2. Исключить из исследуемой цепи источник ЭДС E_1, замкнув накоротко образовавшийся разрыв. Измерить токи в ветвях и рассчитать напряжения на участках цепи. Результаты измерений занести в третью строку табл. 2. Восстановить цепь.

5. По данным табл. 2 проверить справедливость законов Кирхгофа и принципа суперпозиции (метода наложения).

6. Методом эквивалентного генератора определить ток в ветви с резистором R_6. Для этого, разомкнув указанную ветвь, измерить напряжение холостого хода (ЭДС эквивалентного генератора) и, замкнув накоротко резистор R_6, измерить ток короткого замыкания. Результаты вычисления занести в табл.1.

7. Приняв потенциал в узле **a** равным нулю, измерить потенциал в остальных узлах цепи. Результаты измерений занести в табл. 3.

8. Приняв потенциал узла ***a*** равным нулю, пользуясь значениями E_1, E_2 и данными табл. 3.2, рассчитать потенциалы узлов исследуемой цепи. Результаты расчета занести в табл. 3.3.

Таблица 3

Результаты измерения и вычисления потенциалов узлов

Способ определения	φ_a	φ_b	φ_c	φ_d	φ_e	φ_f
	В	***В***	***В***	***В***	***В***	***В***
Измерено	0					
Вычислено	0					

9. По данным табл. 3 построить потенциальную диаграмму для контура ***abcdefa*** исследуемой цепи (рис. 1).

10. Составить баланс мощностей для исследуемой цепи

11. Составить баланс мощностей при измененном резисторе R_3, предварительно определив величину последнего через падение напряжения на нем, которое необходимо измерить

Форма отчетности:

Результат выполнения работы представляется и оформляется в форме отчета. В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:

1. Цель работы.
2. Схема электрической цепи.
3. Таблицы результатов измерений и расчетов по программе работы.
4. Рабочие формулы.
5. Потенциальная диаграмма.
6. Балансы мощностей.
7. Выводы по работе.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 1.1 раздела 1.

Основная литература

[1,2,3]

Дополнительная литература

[6,8]

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Сформулируйте принципы построения математических моделей электрических цепей.
2. Сформулируйте принцип суперпозиции. Какова его область применения? Почему?
3. Дайте краткую характеристику методам расчета линейных электрических цепей постоянного тока.
4. Охарактеризуйте элементы линейных электрических цепей.
5. Что такое эквивалентный генератор?
6. Как изменятся направления токов в ветвях исследуемой цепи при изменении величины резистора $\boldsymbol{R_3}$?

Лабораторная работа № 4 Исследование амплитудных и фазовых соотношений в последовательной RLC - цепи

Цель работы: исследование режимов цепи при различных соотношениях между реактивными сопротивлениями; получение амплитудно - и фазочастотных характеристик.

Порядок выполнения:

1. Ознакомиться с оборудованием, входящим в состав экспериментальной электрической цепи

Параметры элементов экспериментальной электрической цепи должны характеризоваться следующими величинами: L=100мГ; C=0,22мкФ. Величина добавочного резистора $R_{доб}$ задается преподавателем от 0 до 330Ом.

Элементы с такими параметрами могут быть взяты из набора элементной базы лабораторного стенда. Но, как правило, количественная оценка их параметров требует уточнения. В таком случае необходимо выполнить следующие действия.

1.1. Для экспериментального определения параметров катушки индуктивности собрать цепь, схема которой приведена на рис. 2, включив в нее вольтметр (соответствующие гнезда коннектора). Представить цепь преподавателю для проверки.

1.2. Подключить собранную электрическую цепь к источнику синусоидального тока. Установить входное напряжение U=5В и частоту $f=1$кГц. Измерить активное и реактивное индуктивное сопротивления катушки индуктивности R_L и X_L.

Отключить стенд от сети.

1.3. Рассчитать собственную индуктивность катушки индуктивности по формуле

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}.$$

1.4. Для экспериментального определения емкости конденсатора собрать цепь, схема которой приведена на рис. 3, включив в нее вольтметр (соответствующие гнезда коннектора). Представить цепь преподавателю для проверки.

1.5. Подключить собранную электрическую цепь к источнику синусоидального тока. Установить входное напряжение U=5В и частоту $f=1$кГц. Измерить реактивное емкостное сопротивления конденсатора X_C Отключить стенд от сети.

1.6. Рассчитать емкость конденсатора по формуле: $C = \frac{1}{2\pi f X_C}$.

Примечание. Величину активного сопротивления катушки индуктивности, входящей в состав экспериментальной электрической цепи, R можно измерить и мультиметром.

2. По заданным параметрам электрической цепи рассчитать резонансную частоту, характеристическое сопротивление и добротность резонансного контура.

3. Рассчитать амплитудно-частотные и фазо-частотную характеристики цепи, задаваясь 5-6 значениями частоты так, чтобы резонансная частота находилась примерно посредине этого интервала. Напряжение источника электрической энергии синусоидального тока принять равным 5В ($U = 5B$).

Примечание. Конденсатор считать идеализированным

Результаты расчетов необходимо оформить в виде таблицы 1.

Таблица 1

Теоретические резонансные характеристики

U, В	f, Гц	X_L, Ом	Xc, Ом	X, Ом	$R_{доп}$, Ом	R_L, Ом	Z, Ом	I, А	U_{RL} В	$U_{Rдоп}$, В	U_L, В	Uc, В	φ, град.

4. Собрать схему экспериментальной электрической цепи (рис. 1), включив в нее в качестве измерительных приборов соответствующие гнезда коннектора. Подсоединить к внешним клеммам цепи регулируемый источник синусоидального напряжения и установить его параметры: $U = 5B$, $f = f_0$. Предъявить собранную цепь преподавателю для проверки.

5. Подать напряжение на внешние клеммы экспериментальной электрической цепи, включить виртуальные приборы и по показанию фазометра более точно настроить режим резонанса напряжений, изменяя частоту приложенного напряжения. Сравнить экспериментальную резонансную частоту с расчетной.

Зафиксировать показания виртуальных приборов и занести их в таблицу 2.

6. Регулируя и фиксируя частоты, указанные в таблице 1, определить показания виртуальных электроизмерительных приборов и занести их в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты измерений резонансных характеристик

U, В	f, Гц	X, Ом	$R_{доп}$, Ом	R_L, Ом	Z, Ом	I, А	U_{RL} В	$U_{Rдоп}$, В	Uc, В	φ, град.

7. Сравнить результаты расчета и измерений.

8. По результатам расчета и измерений построить частотные характеристики $R_{доб}(f)$, $X_L(f)$, $X_C(f)$, $X(f)$, $Z(f)$ и $\varphi(f)$.

9. По результатам расчета и измерений построить резонансные характеристики $I(f)$, $U_L(f)$ и $U_C(f)$.

10. Построить в масштабе векторные диаграммы для режимов: $f < f_0$, $f = f_0$ и $f > f_0$.

11. Сформулировать выводы по работе.

Форма отчетности:

Результат выполнения работы представляется и оформляется в форме отчета. В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:

1. Цель работы.
2. Схема эксперимента.
3. Результаты измерения величины активного сопротивления катушки индуктивности.
4. Расчет резонансной частоты, характеристического сопротивления и добротности резонансного контура.
5. Таблицы результатов вычислений и измерений.
6. Рабочие формулы.
7. Частотные характеристики.
8. Резонансные характеристики.
9. Векторные диаграммы.
10. Выводы.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 1.2 раздела 1.

Основная литература

[1,2,3]

Дополнительная литература

[6,8]

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Каковы возможные причины несовпадения результатов расчета и эксперимента?
2. В чем опасность резонанса напряжений в энергетических устройствах?
3. Дайте определение понятиям ***“характеристическое сопротивление контура”*** и ***“добротность контура”.*** Каковы их величины для исследованной Вами цепи?
4. Покажите вид резонансных характеристик, если регулируемым фактором является индуктивность (емкость).

Лабораторная работа № 5 Исследование режимов работы трехфазной электрической цепи синусоидального тока при соединении фаз приемника по схеме «звезда»

Цель работы: изучение симметричных и несимметричных режимов работы трехфазных электрических цепей при соединении фаз приемников по схеме “звезда”.

Порядок выполнения:

1. Собрать симметричную трехфазную трехпроводную электрическую цепь $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$. В качестве фазных нагрузок следует использовать резисторы с одинаковыми активными сопротивлениями.

Представить цепь для проверки преподавателю.

2. Измерить с помощью виртуальных электроизмерительных приборов или мультиметров фазные (линейные) токи, фазные и линейные напряжения, а также напряжение смещения нейтрали. Вычислить сопротивления нагрузок фаз. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 3.1.

3. Установить несимметричную однородную (одинаковый характер фазных нагрузок) нагрузку $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$ и повторить измерения и вычисления п.2. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу1.

Таблица 1

Характеристики и параметры трехфазной трехпроводной электрической цепи

Режимы работы цепи	***ИЗМЕРЕНО***										***Вычислено***		
	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_a	$U_в$	U_c	U_{nN}	I_a	$I_в$	I_c	Z_a	$Z_в$	Z_c
	В							***А***			***Ом***		
Симметричная нагрузка													
Несимметрич. однородная нагрузка													
Несимметрич. неоднородная нагрузка													
Обрыв фазного провода													
Короткое замыкание фазы													

4. Установить несимметричную неоднородную нагрузку, включив в фазу С конденсатор и повторить измерения и вычисления п.2. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.

5. Установить симметричную нагрузку фаз.

6. Отключить один из фазных проводов и повторить измерения и вычисления п.2. Результаты занести в таблицу 1.

7. Восстановить трехфазную трехпроводную цепь.

8. Выполнить короткое замыкание одной из фаз и повторить измерения и вычисления п.2. Результаты занести в таблицу1.

9. По данным таблицы 1 построить векторные диаграммы напряжений и токов для каждого режима работы цепи, указанного в таблице.

10. Подключить идеализированный (не обладающий сопротивлением) нейтральный провод, как показано на рис. 2. Сопротивление нейтрального провода в данном случае отсутствует $\underline{Z}_n = 0$.

11. Установить симметричную нагрузку. Измерить линейные и фазные напряжения, фазные (линейные) токи и ток в нейтральном проводе. Вычислить величины сопротивлений фазных нагрузок. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.

12. Установить несимметричную однородную нагрузку и повторить измерения и вычисления п.11. Результаты занести в таблицу 2.

13. Установить несимметричную неоднородную нагрузку и повторить измерения и вычисления п.11. Результаты занести в таблицу 2.

14. Установить симметричную нагрузку фаз.

15. Отключить один из фазных проводов и повторить измерения и вычисления п.11. Результаты занести в табл. 2.

16. По данным табл. 2 построить векторные диаграммы напряжений и токов для каждого режима работы цепи, указанного в таблице.

Таблица 2

Характеристики и параметры трехфазной четырехпроводной цепи при $Z_N=0$

Режимы работы цепи	***ИЗМЕРЕНО***										***Вычислено***		
	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_a	$U_в$	U_c	I_a	$I_в$	I_c	I_n	Z_a	$Z_в$	Z_c
	В						***А***				***Ом***		
Симметричная нагрузка													
Несимметрич.однородная нагрузка													
Несимметрич. неоднородная нагрузка													
Обрыв фазного провода													

17. Сформулировать выводы по работе.

Форма отчетности:

Результат выполнения работы представляется и оформляется в форме отчета. В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:

1. Цель работы.
2. Схема экспериментальной электрической цепи.
3. Таблицы результатов измерений и вычислений по программе работы.
4. Рабочие формулы.
5. Векторные диаграммы напряжений и токов, выполненные в масштабе по программе работы.
6. Выводы по работе

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 1.3 раздела 1.

Основная литература

[1,2,3]

Дополнительная литература

[6,8]

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Назвать области применения трехпроводных и четырехпроводных трехфазных цепей.
2. Каково назначение нейтрального провода?
3. Каковы основные соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами при различных режимах работы трехфазной цепи.
4. Пояснить порядок построения векторных диаграмм токов и напряжений.
5. Как определить характер фазных нагрузок по векторным диаграммам токов и напряжений?

Лабораторная работа № 6 Исследование однофазного трансформатора

Цель работы: Ознакомиться с устройством и принципом действия однофазного трансформатора. Опытным путем исследовать работу трансформатора на холостом ходу, при коротком замыкании и под нагрузкой. Построить рабочие характеристики.

Порядок выполнения:

1. *Опыт холостого хода*

1. Ознакомиться с оборудованием, использующимся в серии экспериментов по исследованию однофазного трансформатора.

2. Убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

3. Соединить гнезда защитного заземления "⏚" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" автотрансформатора A1 (модуль 318.1).

4. Соединить электрическим шнуром приборную вилку электропитания «220В» автотрансформатора А1 (модуль 318.1) с розеткой однофазной трехпроводной электрической сети питания напряжением 220В (выполняется преподавателем).

5. Соединить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений, изображенной на рис. 1.

6. К вторичной обмотке трансформатора подключить вольтметр.

7. Повернуть регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 (модуль 318.1) в крайнее против часовой стрелки положение.

8. Включить выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

9. Активизировать мультиметры блока Р1 (модуль 508.2), задействованные в эксперименте.

10. Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1(модуль 318.1), установить номинальное напряжение на первичной обмотке трансформатора и выполнить измерение на вторичной обмотке.

11. Отключить выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

12. По формуле _____ рассчитать коэффициент трансформации исследуемого трансформатора.

13. Включить выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

14. Активизировать мультиметры блока Р1(модуль 508.2), задействованные в эксперименте.

15. Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1(модуль 318.1), изменять напряжение *U* на выводах первичной и вторичной обмоток испытуемого однофазного трансформатора в диапазоне 0…220В и занести показания вольтметра Р1.1 (напряжение *U*) и амперметра Р1.2 (ток I_0 первичной обмотки трансформатора), а также ваттметра и варметра измерителя *P2* (модуль 507.2) – активная P_0 и реактивная Q_0 мощности, потребляемые трансформатором в таблицу

16. Отключить выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

17. Используя данные таблицы 1.1, вычислить соответствующие напряжению *U* значения коэффициента мощности по формуле

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{P_0^{\,2} + Q_0^{\,2}}};$$

Занесите полученные результаты в таблицу 1.

18. Используя данные таблицы 1.1, построить характеристики холостого хода $I_0=f(U)$, $P_0=f(U)$, $\cos\varphi_0=f(U)$ однофазного трансформатора.

2. Работа однофазного трансформатора с нагрузкой

1. Убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

2. Соединить гнезда защитного заземления "⏚" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" автотрансформатора А1 (модуль 318.1).

3. Соединить электрическим шнуром приборную вилку электропитания «220В» автотрансформатора А1(модуль 318.1) с розеткой однофазной **трехпроводной** электрической сети питания напряжением 220В (выполняется преподавателем).

4. Соединить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений, изображенной на рис. 1.6.

Разомкнуть выводы вторичной обмотки трансформатора и подключить к ним в качестве нагрузки дополнительный реостат *R2* ($R \approx 1400$ Ом), вольтметр Р3 и амперметр Р4. Полученную схему эксперимента можно представить укрупнено так, как показано на рис. 1.7.

5. Повернуть регулировочную рукоятку автотрансформатора А1(модуль 318.1) в крайнее против часовой стрелки положение.

6. В трехфазной трансформаторной группе А2 (модуль 347.1) переключателем установить желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора, например, 127 В.

7. Установить суммарное сопротивление реостата А13 (модуль 323.3) равным 100 Ом.

8. Рассчитать номинальный ток вторичной обмотки трансформатора по форму

$$I_{2ном} = \frac{S_{ф.ном}}{U_{2ном}}$$

где $S_{ф.ном}$ – номинальная мощность фазы трансформатора, равная 80 ВА; $U_{2ном}$ – установленное на блоке А2 номинальное напряжение вторичной обмотки трансформатора.

9. Используя известный $I_{2ном}$ и заданные значения β, рассчитать I_2 по уравнению $I_2 = \beta I_{2ном}$, записать полученные значения в табл. 1.3.

10. Установить наибольшее сопротивление реостата *R2,* использующегося в качестве нагрузки.

11. Включить выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

12. Активизировать мультиметры блока Р1(модуль 508.2), а также ваттметр и варметр измерителя Р2 (модуль 507.2), задействованные в эксперименте.

13. Уменьшая сопротивление нагрузочного реостата *R2,* устанавливать поочередно табличные значения I_2, снять показания приборов и записать их в табл. 2. При проведении опыта напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора следует поддерживать неизменным $U_{1H}=const$.

14. Отключить выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

15. Для построения рабочих характеристик вычислить по уравнениям:

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{U_1 I_1}; \quad P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2, \quad \text{где} \quad \cos\varphi_2 = 1;$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{U_2 I_2}{P_1} \cdot 100\%; \quad \Delta U_2 = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\%.$$

где U_{20} – напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора при $\beta = 0$. Результаты занести в табл. 2

Таблица 1

U_1, В										
U_2, В										
I_0, мА										
P_0, Вт										
Q_0, Вт										
$\cos\varphi_0$										

Таблица 2

β	Измерено				Вычислено			
	I_1	I_2	U_2	P_1	$\cos\varphi$	P_2	η	ΔU_2
	А	А	В	Вт	___	Вт	%	%
0								
0.25								
0.5								
0.75								
1.0								

16. По данным таблицы 2 построить рабочие характеристики трансформатора: $U_2 = f(\beta)$, $\eta = f(\beta)$, $\cos\varphi_1 = f(\beta)$, $\Delta U_2 = f(\beta)$.

17. Построить внешнюю характеристику $U_2 = f(I_2)$.

18. Сделать выводы по работе

Форма отчетности:

Результат выполнения работы представляется и оформляется в форме отчета. В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Схема экспериментальной установки для выполнения опыта холостого хода трансформатора.
4. Таблица измерений и вычислений результатов опыта холостого хода трансформатора.

5. Рабочие формулы для обработки результатов опыта холостого хода трансформатора.

6. Характеристики холостого хода $I_0=f(U)$, $P_0=f(U)$, $\cos\varphi_0=f(U)$.

7. Схема экспериментальной установки для выполнения опыта по исследованию работы трансформатора с нагрузкой.

8. Таблица измерений и вычислений результатов исследования работы трансформатора с нагрузкой.

9. Рабочие формулы для обработки результатов исследования работы трансформатора с нагрузкой.

10. Рабочие характеристики однофазного трансформатора $U_2 = f(\beta)$, $\eta = f(\beta)$, $\cos\varphi_1 = f(\beta)$, $\Delta U_2 = f(\beta)$.

11. Внешняя характеристика трансформатора $U_2 = f(I_2)$.

12. Выводы.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 2.1. раздела 2.

Основная литература

[1,2,4]

Дополнительная литература

[7]

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Каково назначение трансформатора?
2. Объясните принцип действия трансформатора.
3. Для чего предназначен опыт холостого хода трансформатора?
4. Что называется коэффициентом трансформации?
5. Для чего предназначен опыт короткого замыкания трансформатора?
6. Назовите причины потерь мощности в трансформаторе.
7. Какую мощность измерений ваттметр, включенный в первичную цепь трансформатора, в опыте холостого хода, в опыте короткого замыкания?
8. Каким образом уменьшают потери мощности в стали трансформатора за счет гистерезиса и вихревых токов?
9. Что такое внешняя характеристика трансформатора? Поясните ее вид.

Лабораторная работа № 7 Исследование генератора постоянного тока

Цель работы: Ознакомиться с устройством и принципом действия генератора постоянного тока смешанного возбуждения; приобрести навыки в сборке схемы; экспериментальным путем получить основные характеристики генератора при различных способах возбуждения.

Порядок выполнения:

1. Убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Собрать электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (рис. 1).
3. Соединить гнезда защитного заземления "⏚" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания G1 (модуль 201.2).
4. Соединить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений генератора постоянного тока независимого возбуждения, изображенной на рис. 2.6.
5. Переключатели режима работы источника G2 (модуль 206.1), возбудителя G3 (модуль 209.2) и выключателей A6, A8 (модули 301.1) установить в положение "РУЧН.".
6. Регулировочные рукоятки источника G2 (модуль 206.1) и возбудителя G3 (модуль 209.2) повернуть против часовой стрелки до упора.
7. В трехфазной трансформаторной группе A2 (модуль 347.1) установить номинальное напряжение вторичных обмоток трансформаторов равным 230 В.
8. Установить в каждой фазе реостата A9 (модуль 307.1) сопротивления, равные 8 Ом.
9. Включить тумблеры «СЕТЬ» выключателей A6 и A8 (модули 301.1), блока мультиметров P1(модуль 508.2), указателя частоты вращения P3 (модуль 506.2).
10. Активизировать мультиметры блока P1(модуль 508.2), задействованные в эксперименте.
11. Включить выключатель A8 (модуль 301.1) кнопкой «ВКЛ».
12. Включить источник G1(модуль 201.2). О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

13. Включить выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3 (модуль 209.2), и вращая его регулировочную рукоятку, установить на его выходе напряжение равным 20 В.
14. Включить выключатель А6 (модуль 301.1) кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель М1 должен начать вращаться.
15. Нажать кнопку "ВКЛ." возбудителя G3 (модуль 209.2). Двигатель М1 (модуль 102.1) при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью.
16. Отключить выключатель А8 (модуль 301.1) кнопкой «ОТКЛ».
17. Включить выключатель "СЕТЬ" и нажать кнопку "ВКЛ." источника G2 (модуль 206.1).
18. Плавно и поступательно вращая регулировочную рукоятку источника G2 (модуль 206.1), изменять ток возбуждения I_B генератора G4 (модуль 101.2) в диапазоне 0…0,2 А и занести показания амперметра Р1.1 (ток I_B) и вольтметра Р1.2 (ЭДС E_0 генератора G4) в таблицу 2.1 (восходящая ветвь, обозначенная в табл. 2.1 символом $\longrightarrow$).
19. Плавно и поступательно вращая регулировочную рукоятку источника G2, изменять ток возбуждения I_B генератора G4 (модуль 101.2) в диапазоне 0,2…0 А и занести показания амперметра Р1.1 (ток I_B) и вольтметра Р1.2 (ЭДС E_0 генератора G4) в таблицу 1 (нисходящая ветвь, обозначенная в табл. 2.1 символом $\longleftarrow$).

Таблица 1.

I_B, А									
E_0, В $\longrightarrow$									
E_0, В $\longleftarrow$									

20. По завершении эксперимента у источника G2 (модуль 206.1) повернуть регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажать кнопку "ОТКЛ." и отключить выключатель "СЕТЬ". Отключить выключатель А6 (модуль 301.1) нажатием кнопки "ОТКЛ.". Отключить источник G1 (модуль 201.2) нажатием на кнопку – гриб, и последующим отключением ключа – выключателя. Отключить выключатель "СЕТЬ" возбудителя G3 (модуль 209.2), выключателей А6 и А8 (модули 301.1), блока мультиметров Р1 (модуль 508.2) и указателя частоты вращения Р3 (модуль 506.2). 21. Используя результаты табл. 2.1, построить искомую характеристику холостого хода $E_0=f(I_B)$.
22. Соединить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений генератора постоянного тока с параллельным возбуждением, изображенной на рис. 2.7 (вариант 1).
23. Переключатели режима работы возбудителя G3 (модуль 209.2) и выключателей А6 и А8 (модули 301.1) установить в положение "РУЧН.".
24. Регулировочные рукоятки возбудителя G3 (модуль 209.2) повернуть против часовой стрелки до упора.
25. Регулировочные рукоятки активной нагрузки А10 (модуль 306.1) установить в положние "0".
26. В трехфазной трансформаторной группе А2 (модуль 347.1) установить номинальное напряжение вторичных обмоток трансформаторов равным 230 В.
27. Установить в каждой фазе реостата А9 (модуль 307.1) сопротивление 8 Ом.
28. Установить суммарное сопротивление реостата А13 (модуль 323.3), равным 200 Ом и закоротить его проводником.
29. Включить тумблер «СЕТЬ» выключателей А6 и А8 (модули 301.1), блока мультиметров Р1 (модуль 508.2), указателя частоты вращения Р3 (модуль 506.2).
30. Активизировать мультиметры блока Р1 (модуль 508.2), задействованные в эксперименте.
31. Включить выключатель А8 (модуль 301.1) кнопкой «ВКЛ».
32. Включить источник G1(модуль 201.2). О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
33. Включить выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3 (модуль 209.2), и вращая его регулировочную рукоятку, установить на его выходе напряжение равным 20 В.
34. Включить выключатель А6 (модуль 301.1) кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель М1 (модуль102.1) должен начать вращаться и стрелка указателя частоты Р3 (модуль 506.2) должна отклониться вправо.
35. Нажать кнопку "ВКЛ." возбудителя G3 (модуль 209.2). Двигатель М1 (модуль 102.1) при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью. Частота его вращения *n* должна достичь 1500 об/мин.

36. Отключить выключатель А8 (модуль 301.1) кнопкой «ОТКЛ». В результате генератор постоянного тока G4 (модуль 101.2) должен самовозбудиться.
37. Перемещая регулировочные рукоятки нагрузки А10 (модуль 306.1) по часовой стрелке, изменять ток *I* нагрузки генератора G4 (модуль 101.2) и занести показания амперметра Р1.1(ток *I*) и вольтметра Р1.2 (напряжение *U* якорной обмотки генератораG4) в таблицу 2.2.
38. Перенести закоротку с реостата А13 (модуль 323.3) на активную нагрузку А10 (модуль 306.1)
39. Уменьшая сопротивление реостата А13 (модуль 323.3) до нуля, продолжить заносить показания амперметра Р1.1(ток *I*) и вольтметра Р1.2 (напряжение *U* якорной обмотки генератора G4) в таблицу 2.2.

Таблица 2

I, A										
U, B										

40. Отключить выключатель А6 (модуль 301.1) нажатием кнопки "ОТКЛ.". Двигатель М1 (модуль 102.1) должен остановиться.
41. Нажать кнопку "ОТКЛ." возбудителя G3 (модуль 209.2).
42. Нажать кнопку «ОТКЛ» источника G1 (модуль 201.2) и выключателей А6 и А8 (модули 301.1).
43. Соединить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений генератора постоянного тока с параллельным возбуждением, изображенной на рис. 2.8 (вариант 2).
44. Установить сопротивления реостата возбуждения А11 (модуль 308.1) и реостата А13 (модуль 323.3), равными 0 Ом.
45.Установить в каждой фазе реостата А9 (модуль 307.1) сопротивление 8 Ом.
46. Регулировочные рукоятки активной нагрузки А10 (модуль 306.1) установить в положение "0".
47. Включить выключатель А8 (модуль 301.1) кнопкой «ВКЛ».
48. Нажать кнопку «ВКЛ» на источнике G1 (модуль 201.2).
49. Включить выключатель А6 кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель М1 должен начать вращаться и стрелка указателя частоты Р3 (модуль 506.2) должна отклониться вправо.
50. Нажать кнопку "ВКЛ." возбудителя G3 (модуль 506.2) Двигатель М1 (модуль 102.1) при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью. Частота его вращения *n* должна достичь 1500 мин/мин.
51. Отключить выключатель А8 (модуль 301.1) кнопкой «ОТКЛ». В результате генератор постоянного тока G4 (модуль 101.2) должен самовозбудиться.
52. Установить напряжение *U* якорной обмотки генератора G4 (модуль 101.2), например на уровне 90 В, изменяя сопротивления реостата возбуждения А11 (модуль 308.1) и реостата А13 (модуль 323.3)
53. Перемещая регулировочные рукоятки активной нагрузки А10 (модуль 306.1) и поддерживая путем изменения сопротивления реостата возбуждения А11 (модуль 308.1) и реостата А13 (модуль 323.3) напряжение *U* якорной обмотки неизменным и равным 90В, изменять ток $I_я$ якорной обмотки генератора G4 (модуль 101.2) и занести показания амперметров Р1.1 (ток $I_я$) и Р1.2 (ток I_B) в таблицу 2.3.

Таблица 3

$I_я$, *A*										
I_B, *A*										

54. По завершении эксперимента отключить выключатель А6 (модуль 301.1) нажатием кнопки "ОТКЛ.". Отключить источник G1 (модуль 201.2) нажатием на кнопку – гриб, и последующим отключением ключа – выключателя. Отключить выключатель "СЕТЬ" возбудителя G3 (модуль 506.2), выключателей А6 и А8 (модули 301.1), блока мультиметров Р1 (модуль 508.2) и указателя частоты вращения Р3 (модуль 506.2).
55. Используя данные табл. 2.2 и табл. 2.3, построить:
– внешнюю характеристику $U = f(I)$ при $n = const$, $\boldsymbol{I_B} = const$ (табл. 2);
– регулировочную характеристику $I_B = f(I)$ при $n = const$, $U = const$ (табл. 3).
56. Сделать выводы по работе.

Форма отчетности:

Результат выполнения работы представляется и оформляется в форме отчета. В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:
1. Наименование работы.
2. Цель работы.

3. Схемы экспериментальных установок для исследования генератора постоянного тока.
4. Таблицы результатов измерений, полученных при исследовании генератора постоянного тока.
5. Характеристика холостого хода генератора постоянного тока $E_0=f(I_B)$.
6. Внешняя характеристика генератора постоянного тока $U = f$
7. Регулировочная характеристика генератора постоянного тока $I_B = f$
6. Выводы.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 3.1. раздела 3.

Основная литература
[1,2,4]
Дополнительная литература
[7]

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Назовите основные части машины постоянного тока и укажите их назначение.
2. Каково устройство и назначение коллектора у генераторов постоянного тока?
3. Какие способы возбуждения применяют в машинах постоянного тока?
4. Как устроен генератор с самовозбуждением?
5. Как происходит процесс самовозбуждения генератора постоянного тока?
6. Какими характеристиками определяются свойства генератора постоянного тока?
7. Почему внешние характеристики генератора смешанного возбуждения при согласном и встречном включении обмоток возбуждения отличаются?
8. Почему регулировочная характеристика при увеличении нагрузки имеет возрастающий характер?
9. Напишите уравнение для ЭДС обмотки якоря и напряжения на зажимах генератора?

Лабораторная работа № 8 Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Цель работы: Ознакомиться с устройством и принципом действия трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором; приобрести практические навыки в сборке схемы установки; построить рабочие и механическую характеристики.

Порядок выполнения:

1. Убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Собрать электрическую схему тепловой защиты машины переменного тока (рис. 1), соединив гнезда ТК на блоках М1 (модуль 102.1) и G1 (модуль 201.2) .
3. Соединить гнезда защитного заземления "⏚" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания G1 (модуль 201.2) .
4. Собрать электрическую схему для снятия рабочих характеристик трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (рис. 3.4).
5. Реостат А9 (модуль 307.1) поставить в нулевое положение по всем фазам $R = 0$.
6. Предъявить схему для проверки преподавателю.
7. Переключатели режима работы источника G2 (модуль 206.1) и выключателя А6 (модуль 301.1) установить в положение «РУЧН.».
8. Регулировочную рукоятку источника G2 (модуль 206.1) повернуть до упора против часовой стрелки, а регулировочные рукоятки активной нагрузки А10 (модуль 306.1) – установить 0% от максимального значения.
9. В трехфазной трансформаторной группе А2 (модуль 347.1) установить номинальное первичное напряжение трансформатора 230В, номинальное вторичное напряжение трансформатора 220В.
10. Включить кнопки «СЕТЬ» блоков А6 (модуль 301.1), блок мультиметров Р1 (модуль 508.2) и активировать мультиметры, измеритель мощностей Р2 (модуль 507.2), указатель частоты вращения Р3 (модуль 506.2).
11. Включить источник G1 (модуль 201.2). О наличии напряжений на выходе источника должны сигнализировать светящиеся лампочки.

12. Запустить двигатель М1 (модуль102.1) нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя А6 (модуль 301.1).

13. Нажать кнопку "ВКЛ." источника G2 (модуль 206.1)

14. Вращая регулировочную рукоятку источника G2 (модуль 206.1), установить номинальное напряжение на обмотке возбуждения генератора 220В.

15. Вращая регулировочные рукоятки активной нагрузки А10 (модуль 306.1) – изменять значение активной нагрузки 0% до 100% , с шагом 10%.

Для каждого значения активной нагрузки записывать показания приборов в таблицу 3.4 (опытные данные). Приборы регистрируют следующие величины:

Вольтметр P4 – линейное напряжение U_1 на статорной обмотки двигателя М1.

Амперметр P1.1 – ток I_1 статорной обмотки двигателя М1;

Ваттметр и варметр – соответственно активную P_{11} и реактивную Q_{11} мощности одной фазы двигателя М1;

Указатель частоты вращения – частоту вращения $\mathbf{n_2}$ двигателя М1;

Амперметр P1.2 и вольтметр P1.3 – соответственно ток I_a и напряжение U_a якорной обмотки генератора М2.

15. По завершении эксперимента нажать кнопки «ОТКЛ» выключателя А6 и источника G1.

16. Отключить выключатели «СЕТЬ» блоков А6, Р1, Р2, Р3.

17. Регулировочные рукоятки активной нагрузки А10 установить в положение – 0%.

18. Используя опытные данные таблицы 1, вычислить для каждого значения напряжения U_a , В расчетные величины полезной активной мощности P_2, Вт ,полной потребляемой из сети активной мощности P_1, Вт, полезного механического момента M_2, Н.м, коэффициента мощности $cos\varphi$, скольжения s и коэффициента полезного действия η асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по формулам:

$$P_2 = I_a U_a; \quad P_1 = 3P_{11}; \quad M_2 = 9{,}55\frac{P_2}{n_2}; \quad \cos\varphi = \frac{P_{11}}{\sqrt{P_{11}^{\ 2} + Q_{11}^{\ 2}}}; \quad s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}\cdot 100\%;$$

$\eta = \dfrac{P_2}{P_1}\cdot 100\%,$ где n_1 – частота вращения магнитного поля, равная 1500 об/мин.

Занести полученные результаты в таблицу 1 (расчетные данные).

Таблица 1

P_a, %	0	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Опытные данные										
U_1, В										
I_1, А										
P_{11}, Вт										
Q_{11}, вар										
n_2, об/мин										
I_a, А										
U_a, В										
Расчетные данные										
P_2, Вт										
P_1, Вт										
M_2, Н·м										
cos φ										
s, %										
η, %										

19. Используя данные таблицы 1 , построить в масштабе на одном графике рабочие характеристики $I_1=f(P_2)$, $P_1=f(P_2)$, $n_2=f(P_2)$, $s=f(P_2)$, $\eta=f(P_2)$, $cos\varphi=f(P_2)$, $M_2=f(P_2)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

20. Используя данные таблицы 1, построить рабочий участок механической характеристики $n = f(M)$ асинхронного двигателя.

21. Сделать выводы по работе.

Форма отчетности:

Результат выполнения работы представляется и оформляется в форме отчета. В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Схема экспериментальной установки для исследования асинхронного двигателя.
4. Таблица результатов измерений и вычислений.
5. Рабочие формулы.
6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя $I_1=f(P_2)$, $P_1=f(P_2)$, $n_2=f(P_2)$, $s=f(P_2)$, $\eta=f(P_2)$, $\cos\varphi=f(P_2)$, $M_2=f(P_2)$.
7. Механическая характеристика асинхронного двигателя $n = f(M)$.
8. Выводы.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 4.1. раздела 4.

Основная литература

[1,2,4]

Дополнительная литература

[7]

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Объясните конструкцию короткозамкнутого асинхронного двигателя.
2. Что такое скольжение асинхронного двигателя? Какой диапазон изменения скольжения у асинхронного двигателя?
3. Как осуществляется реверсирование асинхронных двигателей трехфазного тока?
4. Какие характеристики асинхронного двигателя называются рабочими?
5. Какими способами можно регулировать частоту вращения асинхронного двигателя?
6. Изобразите механическую характеристику асинхронного двигателя.
7. От чего зависит вращающий момент асинхронного двигателя?
8. Какие виды потерь имеют место в асинхронных двигателях?

Лабораторная работа № 9 Исследование вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов

Цель работы: ознакомиться с принципом работы, основными характеристиками и применением полупроводниковых диодов: выпрямительного диода, стабилитрона, диода Шоттки и светоизлучающего диода.

Порядок выполнения:

1. Экспериментальное исследование выпрямительного диода

1. Собрать схему для исследования выпрямительного диода VD1 на постоянном токе. Соединить перемычкой гнезда X2 и X6. Для измерения выходного тока между гнездами X1 и X10 включить миллиамперметр на пределе измерения 100 мА

(100), для измерения анодного напряжения между гнездами X3 и X15 включить мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения (рис.*). Включить питание стенда и установить переключатель SA1 в позицию « + ».

2. Снять вольтамперную характеристику выпрямительного диода на постоянном токе сначала для прямой, а затем обратной ветви, установив переключательSA1 сначала в позицию « + », а затем в позицию « - ». Увеличивая входное напряжение с помощью потенциометра RP1 от 0, измерять ток и напряжение на диоде. Результаты измерений занести в табл. 2 и 3 .Выключить электропитание. Установить потенциометр RP1 в нулевое положение.

Форма таблицы 2

,В										
,мА										

Форма таблицы 3

3. По полученным значениям построить вольтамперную характеристику выпрямительного диода.

*2. Экспериментальное исследование диода Шоттки*1. Собрать схему для исследования диода Шоттки VD2 на постоянном токе. Соединить перемычкой гнезда X3 и X7. Выполнить п.п. 3.1.1., 3.1.2. и 3.1.3. для диода Шоттки. Сравнить вольтамперные характеристики выпрямительного диода и диода Шоттки

Форма таблицы 4

,В										
,мА										

Форма таблицы 5

3. Исследование влияния величины напряжения на светоизлучающем диоде на световую эмиссию

1. Собрать схему для исследования светодиода VD3 на постоянном токе. Подключить питание модуля диодов переключателем SA1 в позицию « + » и увеличивая **положительное** входное напряжение от 0 с помощью потенциометра RP1, измерять напряжение на светодиоде и ток светодиода. Установить при этом степень светоизлучения (отсутствует, слабое, среднеесильное). Результаты занести в табл.6.

Форма таблицы 6

		Светоизлучение

4. Экспериментальное исследование стабилитрона

1. Собрать схему для исследования стабилитронаVD4 на постоянном токе. Соединить перемычкой гнезда X5 и X9. Выполнить пункты 3.1.2. для стабилитрона.

Результаты измерений занести в табл. 7.

Выключить электропитание. Установить потенциометр RP1 в нулевое положение.

Форма таблицы 7

,В										
,мА										

2. По полученным значениям построить вольтамперную характеристику стабилитрона, определить напряжение стабилизации и величину дифференциального сопротивления .

3. Собрать схему параметрического стабилизатора напряжения. Включить питание стенда и установить переключатель SA1 в позицию « ».

4. Изменяя величину входного напряжения от 0 с помощью потенциометра RP1 снять зависимость величины выходного напряжения от величины входного напряжения . Результаты занести в табл.6.

Форма таблицы 8

5. Определить коэффициент стабилизации стабилизатора на участке стабилизации:

—.

Форма отчетности:

Результат выполнения работы представляется и оформляется в форме отчета. В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:

1. Наименование работы
2. Цель работы
3. Краткие теоретические сведения об исследуемых полупроводниковых приборах
4. Электрические схемы проведения экспериментов.

5. Таблицы результатов экспериментов
6. Вольтамперные характеристики исследованных полупроводниковых приборов
7. Выводы о свойствах исследованных приборов

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 7.1 раздела 7.

Основная литература

[1, 2]

Дополнительная литература

[5]

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Чем отличаются полупроводники типа p и n?
2. Какими свойствами обладает p-n переход?
3. Объясните вид ВАХ p-n перехода.
4. Поясните вид ВАХ стабилитрона. Какова полярность напряжения в нормальном режиме работы стабилитрона?
5. В чем отличие выпрямительного диода и диода Шоттки?
6. Какими параметрами характеризуется стабилитрон?
7. Как работает параметрический стабилизатор напряжения? Для чего нужен балластный резистор?
8. Как изменится напряжение стабилизатора напряжения при повышении температуры?
9. Что такое коэффициент стабилизации? Какой его физический смысл?
10. От чего зависит яркость свечения светодиода?

Лабораторная работа № 10 Маломощный однофазный выпрямитель

Цель работы: ознакомление с принципом работы и изучение схемотехники однофазного мостового двухполупериодного выпрямителя, измерение его выходных параметров и снятие характеристик.

Порядок выполнения:

1. Ознакомиться с лабораторной установкой. Подготовить к работе модуль «Однофазный выпрямитель» и измерительные приборы (модуль мультиметров на пределе « 1000 » и модуль измерительный).
2. Установить переключатель SA5 в позицию «0». Установить тумблер SA2 в верхнюю позицию, тумблер SA3 - в нижнюю позицию. Включить электропитание стенда и модуля (выключатель SA1). Включить осциллограф.
3. Установить сопротивление нагрузки по указанию преподавателя, и снять осциллограммы входного, выходного напряжений и напряжений на диоде.
4. Произвести измерения:
   - питающего напряжения (действующее значение);
   - выпрямленного напряжения (среднее значение);
   - переменной составляющей выходного напряжения ;
   - амплитуды обратного напряжения на вентиле (по осциллограмме);
   - тока нагрузки ;
   - тока вентиля .
5. Результаты измерений и вычисленных параметров выпрямителя занести в табл.1.

Форма таблицы 1

Параметры однофазного мостового выпрямителя без фильтра

В	В	В	В	мА	мА	—		———		—		q	
						Т	*Э*	*Т*	*Э*	*Т*	*Э*	*Т*	*Э*
Примечание: Коэффициент пульсаций определить по формуле: — —													

6. С помощью переключателя SA5, изменяя сопротивление нагрузки от нуля (холостой ход) до максимальной величины, снять внешние характеристики выпрямителя без фильтра, затем с емкостным, индуктивным и индуктивно-емкостным фильтрами. Включение емкостного

фильтра выполнить тумблером SA3, индуктивного фильтра - тумблером SA2. При этом сравнить эффективность сглаживания емкостного фильтра с различными значениями емкости фильтра (тумблер SA4 в позициях «1» и «2»). Результаты измерений занести в табл.2

7. Снять осциллограммы выходного напряжения при холостом ходе и для одного из значений нагрузки при включенном фильтре (по усмотрению бригады)

Форма таблицы 2

Внешние характеристики однофазного мостового выпрямителя

Нагрузка	C = 0, L = 0				C = 50 мкФ				C =100 мкФ			
	В	А	В	q	В	А	В	q	В	А	В	q
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												

Форма отчетности:

Результат выполнения работы представляется и оформляется в форме отчета. В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения об исследуемых выпрямителях
3. Электрическая схема проведения экспериментов.
4. Таблицы результатов экспериментов.
5. Осциллограммы напряжений.
6. Внешние характеристики выпрямителя.
7. Анализ полученных результатов.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 7.2 раздела 7.

Основная литература

[1, 2]

Дополнительная литература

[5]

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Какие функции в выпрямителях выполняют силовой трансформатор, блок диодов и сглаживающий фильтр? В каких случаях нет необходимости в силовом трансформаторе и сглаживающем фильтре?
2. Изменится ли полярность выходного напряжения выпрямителя при изменении подключения выводов первичной и вторичной обмоток трансформатора?
3. Какой фильтр из исследуемых в лабораторной работе обеспечивает получение наименьшего коэффициента пульсаций и почему?
4. Почему условия работы диодов в выпрямителе с емкостным фильтром считаются более тяжелыми, чем в выпрямителе без фильтра?
5. Какие параметры вентилей ограничивают мощность выпрямителя? Определите максимальную выходную мощность мостового выпрямителя, в котором использованы диоды Д 25-4.
6. Каким требованиям должны удовлетворять диоды в исследуемом Вами выпрямителе?
7. От чего зависит степень сглаживания выходного тока?
8. Выведите приближенное соотношение между действующим значением входного тока и выпрямленным током.

9.2. Методические указания по выполнению контрольных работ

Контрольная работа №1 Анализ и расчет линейных электрических цепей постоянного и переменного тока

Цель работы: закрепление студентами основных разделов курса, а также проверка степени

усвоения теоретического материала дисциплины.

Задание:

Задача 1. Для линейной электрической цепи постоянного тока, схема которой согласно варианту задания определяется из таблицы, по заданным в указанной таблице величинам выполнить следующее.

1.1. Составить на основании законов Кирхгофа систему уравнений для расчета токов в ветвях электрической цепи (математическую модель).

1.2. Определить токи во всех ветвях электрической цепи.

1.3. Определить показание вольтметра.

1.4. Составить баланс мощностей для исходной электрической цепи.

1.5. Построить в масштабе потенциальную диаграмму для внешнего контура

Задача 2. Для однофазной линейной электрической цепи синусоидального тока, схема которой определяется согласно варианту по таблице и по данным, представленным в указанной таблице, выполнить следующее.

2.1. На основании законов Кирхгофа составить математическую модель для определения токов во всех ветвях цепи.

2.2. Определить действующие значения токов в ветвях цепи, воспользовавшись одним из методов расчета линейных электрических цепей.

2.3. Определить действующие значения падений напряжений на каждом элементе электрической цепи.

2.4. Определить показание электромагнитного вольтметра.

2.5. Определить показание электродинамического ваттметра.

2.6. Составить балансы активной, реактивной и полной мощностей.

2.7. Построить в масштабе векторные диаграммы токов и напряжений.

Задача 3. Для трехфазной электрической цепи синусоидального тока по заданным в таблице параметрам нагрузки и линейному напряжению определить следующее.

1. Вычислить фазные и линейные токи.

2. Для четырехпроводной цепи определить ток в нейтральном проводе.

3. Определить активную мощность во всей цепи и в каждой фазе отдельно.

4. Построить в масштабе диаграмму токов и напряжений.

Форма отчетности:

1. Студенты очной формы обучения текстовую часть контрольной работы могут выполнять в виде рукописного текста на белых листах формата А4 или выполнить на компьютере в формате ODF (ГОСТ Р ИСО/ МЭК 2630 – 2010), либо в формате MSOffise 2003. Для студентов заочной формы обучения допускается выполнение контрольных работ в обыкновенной ученической тетради.

2. Буквенные, цифровы

е и графические обозначения, рисунки, характеристики, схемы, диаграммы должны быть выполнены с соблюдением установленных в Единой системой конструкторской документации (ЕСКД) условными графическими обозначениям.

3. Все графические изображения должны быть выполнены с помощью соответствующих чертежных инструментов в рациональном для восприятия масштабе.

4. Буквенные и графические изображения должны соответствовать общепринятой в электротехнике символике.

5. В ходе решения любой из предлагаемых здесь задач не следует изменять однажды принятые направления токов и напряжений на участках электрических цепей, маркировку узлов, сопротивлений и источников электрической энергии, а также прочие обозначения, заданные исходными данными.

6. Расчет каждой искомой величины следует выполнять сначала в общем виде, а затем в полученную таким образом формулу подставить численные значения и привести окончательный результат с указанием единиц измерения.

7. Все основные этапы решения должны быть подробно пояснены расчетными формулами, схемами, графиками, диаграммами.

8. Вычисления должны быть выполнены с точностью до третьей значащей цифры.

9. Конечные результаты задач должны быть выделены из общего текста.

10. Относительная погрешность вычислений не должна превышать 5%.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по разделу 1

Основная литература
[1,2]
Дополнительная литература
[5,7]

Контрольная работа №2 Расчет мощности и выбор типа электродвигательного устройства переменного тока для привода рабочего механизма

Цель работы: Получить навыки расчета мощности электродвигателя для обеспечения высокой производительности, надежности и точности работы производственных механизмов

Задание: по заданному графику нагрузки производственного механизм, частоте вращения, условию пуска двигателя, условию прокладки и материалу питающих проводов рассчитать и выбрать элементы электропривода к рабочему механизму.

Порядок выполнения:

1. Выбор электродвигателя
1.1 Предварительный выбор
1.2. Проверка двигателя на перегрузочную способность
1.3. Построение механической характеристики электродвигателя
2. Выбор проводов
3. Выбор аппаратов управления и защиты
4. Расчет мощности компенсирующего устройства
5. Выбор электрической схемы управления трехфазным асинхронным двигателем
6. Примеры составления алгоритма функционирования
7. Защитное заземление (зануление) двигателя

Форма отчетности:

Контрольная работа должна быть выполнена в виде расчетно-пояснительной записки и чертежей согласно заданию.

Во введении обосновывается особенность электропривода строительно-дорожных машин, кратко приводится перечень основных вопросов, решаемых в контрольной работе, способы и методы их решения.

В тексте контрольной работы объясняется ход решения рассматриваемых вопросов с указанием применяемых методов, формул и ссылок на источники.

При рассмотрении какого-либо вопроса должен быть дан пример расчета, а для остальных аналогичных случаев результаты сводятся в таблицу.

Пояснительная записка контрольной работы должна иметь нумерацию глав, параграфов, таблиц, рисунков и список источников.

Графическая часть работы состоит из четырех листов формата А4, на которых должны быть представлены:

- график нагрузки производственного механизма $M=f(t)$;
- механическая характеристика двигателя $M=f(s)$, $n=f(M)$;
- схема управления электродвигателем;
- схема заземления (зануления) электродвигателя.

Все чертежи и схемы выполняются согласно установленным Единой системой конструкторской документации (ЕСКД) условными графическими обозначениям.

Объем работы – 20-30 страниц рукописного текста или 18 - 22 страницы текстовой части выполненной на компьютере в формате ODF (ГОСТ Р ИСО/ МЭК 2630 – 2010) , либо в формате MSOffise 2003.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по разделам 4. 6

Основная литература
[1,2,4]
Дополнительная литература
[9]

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Структурная схема электропривода.
2. Нагрузочная диаграмма.
3. Основные режимы работы двигателя в электроприводе.
4. Номинальная мощность двигателя.

5. Выбор типа двигателя.
6. Методы расчета мощности двигателя.
7. Выбор мощности двигателя для заданного режима.
8. Механические характеристики двигателей.
9. Перегрузочная способность двигателя.
10. Аппараты управления.
11. Устройство магнитного пускателя.
12. Аппараты защиты.
13. Выбор теплового реле.
14. Выбор предохранителя.
15. Назначение схемы управления.
16. Провода и кабели.
17. Расчет сечения проводов.
18. Защитное заземление.
19. Защитное зануление.

10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Microsoft Imagine Premium (ОС Windows 7 Professional);
2. Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level
3. Kaspersky Endpoint Security для бизнеса - Расширенный Russian Edition. 1000-1499 Node 1 year Educational Renewal License;
4. OpenOffice
5. LibreOffice
6. Adobe Reader

11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Вид занятия	***Наименование аудитории***	***Перечень основного оборудования***	***№ ЛР***
1	**2**	**3**	**4**
Лк	Лаборатория теоретических основ электротехники	Плакаты. Электротехнические изделия. Макеты электрических машин.	-
ЛР	Лаборатория теоретических основ электротехники	Учебно-лабораторные стенды ЭОЭ1-СК	№№ 1 - 8
ЛР	Лаборатория измерительной техники и силовых преобразователей	Учебно-лабораторный стенд ЭИСЭС-1-Н-Р Осциллограф С1-60	№№ 9 -10
кр	Читальный зал №3	Оборудование 15-CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S-SF);принтер HP LaserJet P3005	-
СР	Читальный зал №3	Оборудование 15-CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S-SF);принтер HP LaserJet P3005	-

Приложение 1

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ОК-1	Способность к абстрактному мышлению, анализу, синтезу	**1.** Электрические и магнитные цепи	1.1. Электрические цепи постоянного тока	Экзаменационные вопросы №№ 1…8
			1.2. Электрические цепи переменного тока	Экзаменационные вопросы №№ 9…16
			1.3. Трехфазные электрические цепи	Экзаменационные вопросы №№ 17…20
			1.4. Магнитные цепи	Экзаменационные вопросы №№ 21…23
		2. Трансформаторы	2.1. Трансформаторы	Экзаменационные вопросы №№ 24,25
		3. Машины постоянного тока	3.1. Устройство и принцип действия машин постоянного тока. Принцип действия генератора. Принцип действия двигателя	Экзаменационный вопрос № 26
			3.2. Электродвижущая сила якоря и электромагнитный момент. Магнитная цепь машины постоянного тока. Реакция якоря. Коммутация в машинах постоянного тока. Схемы включения машин постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения.	Экзаменационные вопросы №№ 27…29
		4. Асинхронные машины	4.1. Устройство трехфазной асинхронной машины. Получение вращающегося магнитного поля.	Экзаменационные вопросы №№ 30,31

			Режимы работы трехфазной асинхронной машины. Режим двигателя. Режим генератора. Режим электромагнитного тормоза	
			4.2. Электромагнитный момент асинхронной машины. Зависимость электромагнитного момента от скольжения. Механическая характеристика асинхронного двигателя. Пуск в ход асинхронного двигателя. Использование двигателей с улучшенными пусковыми свойствами	Экзаменационные вопросы №№ 32…34
			4.3. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Тормозные режимы работы асинхронных машин. Коэффициент мощности асинхронного двигателя и его зависимость от нагрузки на валу двигателя.	Экзаменационный вопрос № 35
		5. Синхронные машины	5.1. Устройство и принцип действия синхронных машин. Принцип работы и ЭДС синхронного генератора. Принцип работы синхронного двигателя. Краткая классификация синхронных машин. Схема замещения синхронного генератора.	Экзаменационные вопросы №№ 36…39

			Угловые характеристики синхронного генератора. Основные характеристики синхронного генератора. Параллельная работа синхронных генераторов.	
			5.2. Схема замещения и уравнение электрического равновесия цепи статора синхронного двигателя. Угловая и механическая характеристика синхронного двигателя. Рабочие характеристики синхронного двигателя. Способы пуска в ход синхронного двигателя. Пуск в ход с помощью разгонного двигателя. Асинхронный способ пуска. Частотный пуск. Механическая характеристика. Частотное торможение.	Экзаменационные вопросы №№ 40…42
		6. Основы электропривода	6.1. Общие сведения об электроприводе. Условия, определяющие выбор типа электродвигателя. Управление электроприводами	Экзаменационные вопросы №№ 43…45
		7. Основы электроники	7.1. Классификация полупроводниковых приборов. Полупроводниковые резисторы. Полупроводниковые диоды. Биполярные транзисторы.	Экзаменационные вопросы №№ 46…48

			Полевые транзисторы. Тиристоры	
			7.2. Неуправляемые и управляемые выпрямители	Экзаменационный вопрос № 49
			7.3. Усилители электрических сигналов. Усилители на биполярных транзисторах	Экзаменационный вопрос № 50
			7.4. Импульсная и цифровая техника	Экзаменационный вопрос № 51
ПК-10	Способность разрабатывать технологическую документацию для производства, модернизации, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта наземных транспортно-технологических средств и их технологического и оборудования	**1.** Электрические и магнитные цепи	1.1. Электрические цепи постоянного тока	Экзаменационные вопросы №№ 1…8
			1.2. Электрические цепи переменного тока	Экзаменационные вопросы №№ 9…16
			1.3. Трехфазные электрические цепи	Экзаменационные вопросы №№ 17…20
			1.4. Магнитные цепи	Экзаменационные вопросы №№ 21…23
		2. Трансформаторы	2.1. Трансформаторы	Экзаменационные вопросы №№ 24,25
		3. Машины постоянного тока	3.1. Устройство и принцип действия машин постоянного тока. Принцип действия генератора. Принцип действия двигателя	Экзаменационный вопрос № 26
			3.2. Электродвижущая сила якоря и электромагнитный момент. Магнитная цепь машины постоянного тока. Реакция якоря. Коммутация в машинах постоянного тока. Схемы включения машин постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения.	Экзаменационные вопросы №№ 27…29
		4. Асинхронные машины	4.1. Устройство трехфазной асинхронной машины.	Экзаменационные вопросы №№ 30,31

			Получение вращающегося магнитного поля. Режимы работы трехфазной асинхронной машины. Режим двигателя. Режим генератора. Режим электромагнитного тормоза	
			4.2. Электромагнитный момент асинхронной машины. Зависимость электромагнитного момента от скольжения. Механическая характеристика асинхронного двигателя. Пуск в ход асинхронного двигателя. Использование двигателей с улучшенными пусковыми свойствами	Экзаменационные вопросы №№ 32…34
			4.3. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Тормозные режимы работы асинхронных машин. Коэффициент мощности асинхронного двигателя и его зависимость от нагрузки на валу двигателя.	Экзаменационный вопрос № 35
		5. Синхронные машины	5.1. Устройство и принцип действия синхронных машин. Принцип работы и ЭДС синхронного генератора. Принцип работы синхронного двигателя. Краткая классификация синхронных машин.	Экзаменационные вопросы №№ 36…39

			Схема замещения синхронного генератора. Угловые характеристики синхронного генератора. Основные характеристики синхронного генератора. Параллельная работа синхронных генераторов.	
			5.2. Схема замещения и уравнение электрического равновесия цепи статора синхронного двигателя. Угловая и механическая характеристика синхронного двигателя. Рабочие характеристики синхронного двигателя. Способы пуска в ход синхронного двигателя. Пуск в ход с помощью разгонного двигателя. Асинхронный способ пуска. Частотный пуск. Механическая характеристика. Частотное торможение.	Экзаменационные вопросы №№ 40…42
		6. Основы электропривода	6.1. Общие сведения об электроприводе. Условия, определяющие выбор типа электродвигателя. Управление электроприводами	Экзаменационные вопросы №№ 43…45
		7. Основы электроники	7.1. Классификация полупроводниковых приборов. Полупроводниковые резисторы. Полупроводниковы	Экзаменационные вопросы №№ 46…48

			е диоды. Биполярные транзисторы. Полевые транзисторы. Тиристоры	
			7.2. Неуправляемые и управляемые выпрямители	Экзаменационный вопрос № 49
			7.3. Усилители электрических сигналов. Усилители на биполярных транзисторах	Экзаменационный вопрос № 50
			7.4. Импульсная и цифровая техника	Экзаменационный вопрос № 51
ПСК-2,7	Способность разрабатывать технологическую документацию для производства, модернизации, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта средств механизации и автоматизации подъемно-транспортных, строительных и дорожных работ	**1.** Электрические и магнитные цепи	1.1. Электрические цепи постоянного тока	Экзаменационные вопросы №№ 1…8
			1.2. Электрические цепи переменного тока	Экзаменационные вопросы №№ 9…16
			1.3. Трехфазные электрические цепи	Экзаменационные вопросы №№ 17…20
			1.4. Магнитные цепи	Экзаменационные вопросы №№ 21…23
		2. Трансформаторы	2.1. Трансформаторы	Экзаменационные вопросы №№ 24,25
		3. Машины постоянного тока	3.1. Устройство и принцип действия машин постоянного тока. Принцип действия генератора. Принцип действия двигателя	Экзаменационный вопрос № 26
			3.2. Электродвижущая сила якоря и электромагнитный момент. Магнитная цепь машины постоянного тока. Реакция якоря. Коммутация в машинах постоянного тока. Схемы включения машин постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения.	Экзаменационные вопросы №№ 27…29

		4. Асинхронные машины	4.1. Устройство трехфазной асинхронной машины. Получение вращающегося магнитного поля. Режимы работы трехфазной асинхронной машины. Режим двигателя. Режим генератора. Режим электромагнитного тормоза	Экзаменационные вопросы №№ 30,31
			4.2. Электромагнитный момент асинхронной машины. Зависимость электромагнитного момента от скольжения. Механическая характеристика асинхронного двигателя. Пуск в ход асинхронного двигателя. Использование двигателей с улучшенными пусковыми свойствами	Экзаменационные вопросы №№ 32…34
			4.3. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Тормозные режимы работы асинхронных машин. Коэффициент мощности асинхронного двигателя и его зависимость от нагрузки на валу двигателя.	Экзаменационный вопрос № 35
		5. Синхронные машины	5.1. Устройство и принцип действия синхронных машин. Принцип работы и ЭДС синхронного генератора. Принцип работы	Экзаменационные вопросы №№ 36…39

			синхронного двигателя. Краткая классификация синхронных машин. Схема замещения синхронного генератора. Угловые характеристики синхронного генератора. Основные характеристики синхронного генератора. Параллельная работа синхронных генераторов.	
			5.2. Схема замещения и уравнение электрического равновесия цепи статора синхронного двигателя. Угловая и механическая характеристика синхронного двигателя. Рабочие характеристики синхронного двигателя. Способы пуска в ход синхронного двигателя. Пуск в ход с помощью разгонного двигателя. Асинхронный способ пуска. Частотный пуск. Механическая характеристика. Частотное торможение.	Экзаменационные вопросы №№ 40…42
		6. Основы электропривода	6.1. Общие сведения об электроприводе. Условия, определяющие выбор типа электродвигателя. Управление электроприводами	Экзаменационные вопросы №№ 43…45
		7. Основы электроники	7.1. Классификация полупроводниковы	Экзаменационные вопросы

			х приборов. Полупроводниковые резисторы. Полупроводниковые диоды. Биполярные транзисторы. Полевые транзисторы. Тиристоры	№№ 46…48
			7.2. Неуправляемые и управляемые выпрямители	Экзаменационный вопрос № 49
			7.3. Усилители электрических сигналов. Усилители на биполярных транзисторах	Экзаменационный вопрос № 50
			7.4. Импульсная и цифровая техника	Экзаменационный вопрос № 51

2. Экзаменационные вопросы

№ п/п	Компетенции		ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ	№ и наименование раздела
	Код	Определение		
1	2	3	4	5
1.	ОК-1	Способность к абстрактному мышлению, анализу, синтезу	**1.** Электрическая цепь и ее элементы. Основные понятия и определения для электрической цепи.	**1.** Электрические и магнитные цепи
			2. Закон Ома для участка цепи. Закон Ома для всей цепи	
			3. Первый и второй законы Кирхгофа	
			4. Электрическая цепь с последовательным, параллельным и смешанным соединением элементов	
			5. Источники тока и ЭДС в электрических цепях	
			6. Режимы работы электрической цепи	
			7. Расчет электрической цепи с одним источником питания	
			8. Расчет разветвленной электрической цепи с несколькими источниками питания методом контурных токов	
			9. Способы представления синусоидальных токов, напряжений, ЭДС.	
			10. Действующее и среднее значения переменного тока, напряжения и ЭДС.	
			11. Элементы электрической цепи синусоидального тока:	

			сопротивление (R), индуктивность (L), емкость (C).	
			12. Цепь с последовательным соединением RLC- элементов	
			13. Цепь с параллельным соединением RLC -элементов	
			14. Повышение коэффициента мощности в электрической цепи	
			15. Комплексный (символический) метод расчета цепей синусоидального тока	
			16. Законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме	
			17. Четырехпроводная электрическая цепь: симметричная и несимметричная нагрузка приемника.	
			18 Соединение фаз генератора и приемника по схеме «треугольник»	
			19. Соединение фаз приемника по схеме «треугольник»: симметричная и несимметричная нагрузка	
			20. Соединение фаз генератора и приемника по схеме «звезда с нейтральным проводом»	
			21. Магнитное поле и его параметры. Магнитные цепи	
			22. Закон полного тока. Закон Ома для магнитной цепи	
			23. Ферромагнитные материалы и их свойства	
			24. Устройство и принцип действия трансформаторов	**2.** Трансформаторы
			25. Идеализированный трансформатор. Намагничивающий ток и ток холостого хода	
			26. Устройство и принцип действия машин постоянного тока. Принцип действия генератора. Принцип действия двигателя	**3.** Машины постоянного тока
			27. Электродвижущая сила якоря и электромагнитный момент. Магнитная цепь машины постоянного тока.	
			28. Реакция якоря. Коммутация в машинах постоянного тока.	
			29. Схемы включения машин постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения	
			30. Устройство трехфазной асинхронной машины. Получение вращающегося магнитного поля.	**4.** Асинхронные машины
			31. Режимы работы трехфазной асинхронной машины.	
			32. Электромагнитный момент и	

			асинхронной машины	
			33. Механическая характеристика асинхронного двигателя.	
			34. Пуск в ход асинхронных двигателей	
			35. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.	
			36. Устройство и принцип действия синхронных машин	**5.** Синхронные машины
			37. Краткая классификация синхронных машин. Схема замещения синхронного генератора.	
			38. Угловые характеристики синхронного генератора. Основные характеристики синхронного генератора.	
			39. Параллельная работа синхронных генераторов.	
			40. Угловая и механическая характеристика синхронного двигателя. Рабочие характеристики синхронного двигателя.	
			41. Способы пуска в ход синхронного двигателя.	
			42. Частотное торможение синхронного двигателя	
			43. Общие сведения об электроприводе.	**6.** Основы электропривода
			44. Условия, определяющие выбор типа электродвигателя.	
			45. Управление электроприводами	
			46. Полупроводниковые резисторы, диоды, тиристоры	**7.** Основы электроники
			47. Биполярные транзисторы	
			48. Полевые транзисторы	
			49. Неуправляемые и управляемые выпрямители	
			50. Усилители электрических сигналов на биполярных транзисторах	
			51. Импульсная и цифровая техника	
2	ПК-10	Способность разрабатывать технологическую документацию для производства, модернизации, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта наземных транспортно-технологических средств и их технологического и	**1.** Электрическая цепь и ее элементы. Основные понятия и определения для электрической цепи.	**1.** Электрические и магнитные цепи
			2. Закон Ома для участка цепи. Закон Ома для всей цепи	
			3. Первый и второй законы Кирхгофа	
			4. Электрическая цепь с последовательным, параллельным и смешанным соединением элементов	
			5. Источники тока и ЭДС в электрических цепях	
			6. Режимы работы электрической цепи	
			7. Расчет электрической цепи с одним источником питания	

		оборудования	**8.** Расчет разветвленной электрической цепи с несколькими источниками питания методом контурных токов	
			9. Способы представления синусоидальных токов, напряжений, ЭДС.	
			10. Действующее и среднее значения переменного тока, напряжения и ЭДС	
			11. Элементы электрической цепи синусоидального тока: сопротивление (R), индуктивность (L), емкость (C).	
			12. Цепь с последовательным соединением RLC- элементов	
			13. Цепь с параллельным соединением RLC -элементов	
			14. Повышение коэффициента мощности в электрической цепи	
			15. Комплексный (символический) метод расчета цепей синусоидального тока	
			16. Законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме	
			17. Четырехпроводная электрическая цепь: симметричная и несимметричная нагрузка приемника.	
			18 Соединение фаз генератора и приемника по схеме «треугольник»	
			19. Соединение фаз приемника по схеме «треугольник»: симметричная и несимметричная нагрузка	
			20. Соединение фаз генератора и приемника по схеме «звезда с нейтральным проводом»	
			21. Магнитное поле и его параметры. Магнитные цепи	
			22. Закон полного тока. Закон Ома для магнитной цепи	
			23. Ферромагнитные материалы и их свойства	
			24. Устройство и принцип действия трансформаторов	**2.** Трансформаторы
			25. Идеализированный трансформатор. Намагничивающий ток и ток холостого хода	
			26. Устройство и принцип действия машин постоянного тока. Принцип действия генератора. Принцип действия двигателя	**3.** Машины постоянного тока
			27. Электродвижущая сила якоря и электромагнитный момент. Магнитная цепь машины	

			постоянного тока.	
			28. Реакция якоря. Коммутация в машинах постоянного тока.	
			29. Схемы включения машин постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения	
			30. Устройство трехфазной асинхронной машины. Получение вращающегося магнитного поля.	**4.** Асинхронные машины
			31. Режимы работы трехфазной асинхронной машины.	
			32. Электромагнитный момент и асинхронной машины	
			33. Механическая характеристика асинхронного двигателя.	
			34. Пуск в ход асинхронных двигателей	
			35. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей	
			36. Устройство и принцип действия синхронных машин	**5.** Синхронные машины
			37. Краткая классификация синхронных машин. Схема замещения синхронного генератора.	
			38. Угловые характеристики синхронного генератора. Основные характеристики синхронного генератора	
			39. Параллельная работа синхронных генераторов.	
			40. Угловая и механическая характеристика синхронного двигателя. Рабочие характеристики синхронного двигателя.	
			41. Способы пуска в ход синхронного двигателя.	
			42. Частотное торможение синхронного двигателя	
			43. Общие сведения об электроприводе.	**6.** Основы электропривода
			44. Условия, определяющие выбор типа электродвигателя	
			45. Управление электроприводами	
			46. Полупроводниковые резисторы, диоды, тиристоры	**7.** Основы электроники
			47. Биполярные транзисторы	
			48. Полевые транзисторы	
			49. Неуправляемые и управляемые выпрямители	
			50. Усилители электрических сигналов на биполярных транзисторах	
			51. Импульсная и цифровая техника	
3	**ПСК-2,7**	Способность разрабатывать технологическую	**1.** Электрическая цепь и ее элементы. Основные понятия и определения для электрической цепи.	**1.** Электрические и магнитные цепи

		документацию для производства, модернизации, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта средств механизации и автоматизации подъемно-транспортных, строительных и дорожных работ	**2.** Закон Ома для участка цепи. Закон Ома для всей цепи	
			3. Первый и второй законы Кирхгофа	
			4. Электрическая цепь с последовательным, параллельным и смешанным соединением элементов	
			5. Источники тока и ЭДС в электрических цепях	
			6. Режимы работы электрической цепи	
			7. Расчет электрической цепи с одним источником питания	
			8. Расчет разветвленной электрической цепи с несколькими источниками питания методом контурных токов	
			9. Способы представления синусоидальных токов, напряжений, ЭДС.	
			10. Действующее и среднее значения переменного тока, напряжения и ЭДС.	
			11. Элементы электрической цепи синусоидального тока: сопротивление (R), индуктивность (L), емкость (C).	
			12. Цепь с последовательным соединением RLC- элементов	
			13. Цепь с параллельным соединением RLC -элементов	
			14. Повышение коэффициента мощности в электрической цепи	
			15. Комплексный (символический) метод расчета цепей синусоидального тока	
			16. Законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме	
			17. Четырехпроводная электрическая цепь: симметричная и несимметричная нагрузка приемника.	
			18 Соединение фаз генератора и приемника по схеме «треугольник»	
			19. Соединение фаз приемника по схеме «треугольник»: симметричная и несимметричная нагрузка	
			20. Соединение фаз генератора и приемника по схеме «звезда с нейтральным проводом»	
			21. Магнитное поле и его параметры. Магнитные цепи	
			22. Закон полного тока. Закон Ома для магнитной цепи	
			23. Ферромагнитные материалы и их свойства	

			24. Устройство и принцип действия трансформаторов	**2.** Трансформаторы
			25. Идеализированный трансформатор. Намагничивающий ток и ток холостого хода	
			26. Устройство и принцип действия машин постоянного тока. Принцип действия генератора. Принцип действия двигателя	**3.** Машины постоянного тока
			27. Электродвижущая сила якоря и электромагнитный момент. Магнитная цепь машины постоянного тока.	
			28. Реакция якоря. Коммутация в машинах постоянного тока.	
			29. Схемы включения машин постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения	
			30. Устройство трехфазной асинхронной машины. Получение вращающегося магнитного поля.	**4.** Асинхронные машины
			31. Режимы работы трехфазной асинхронной машины.	
			32. Электромагнитный момент и асинхронной машины	
			33. Механическая характеристика асинхронного двигателя.	
			34. Пуск в ход асинхронных двигателей	
			35. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.	
			36. Устройство и принцип действия синхронных машин	**5.** Синхронные машины
			37. Краткая классификация синхронных машин. Схема замещения синхронного генератора.	
			38. Угловые характеристики синхронного генератора. Основные характеристики синхронного генератора.	
			39. Параллельная работа синхронных генераторов.	
			40. Угловая и механическая характеристика синхронного двигателя. Рабочие характеристики синхронного двигателя.	
			41. Способы пуска в ход синхронного двигателя.	
			42. Частотное торможение синхронного двигателя	
			43. Общие сведения об электроприводе.	**6.** Основы электропривода
			44. Условия, определяющие выбор типа электродвигателя.	
			45. Управление электроприводами	
			46. Полупроводниковые резисторы,	**7.** Основы

			диоды, тиристоры	электроники
			47. Биполярные транзисторы	
			48. Полевые транзисторы	
			49. Неуправляемые и управляемые выпрямители	
			50. Усилители электрических сигналов на биполярных транзисторах	
			51. Импульсная и цифровая техника	

3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
Знать ОК-1: – основные методы анализа и расчета линейных и нелинейных электрических и магнитных цепей; ПК-10*:* – основные методы анализа и расчета линейных и нелинейных электрических и магнитных цепей; ПСК-2,7: – параметры, конструкцию, характеристики основных типов электрических машин и электроприводов **Уметь** ОК-1: – составлять математические модели для определения параметров электрических цепей; ПК-10: – рассчитывать электрические цепи по заданным параметрам; ПСК-2,7: – рассчитывать электрические цепи по заданным характеристикам; **Владеть** ОК-1: – навыками экспериментального определения характеристик и параметров электрических машин и электронных	**отлично**	Оценка «отлично» выставляется в случае, если обучающийся глубоко и прочно усвоил программный материал и демонстрирует: - всестороннее знание программного материала; - умение правильного применения основных положений программного материала; - владеет всеми навыками, полученными в ходе изучения программного материала.
	хорошо	Оценка «хорошо» выставляется в случае, если обучающийся демонстрирует: - недостаточно полное знание программного материала; - применение с несущественными ошибками основных положений программного материала
	удовлетворительно	Оценка «удовлетворительно» выставляется в случае, если обучающийся демонстрирует частичное знание программного материала; неоднократно допускал ошибки в ответе

приборов и их компьютерного исследования по математическим моделям ПК-10: – навыками экспериментального определения характеристик и параметров электрических машин и электронных приборов; ПСК-2,7: – навыками экспериментального определения характеристик и параметров электрических машин и электронных приборов и их компьютерного исследования по математическим моделям	**неудовлетворительно**	Оценка «неудовлетворительно» выставляется в случае, если уровень владения программным материалом не отвечает требованиям; все вышеуказанные разделы не усвоены.

4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности

Дисциплина Электротехника, электроника и электропривод направлена на формирование знаний законов электротехники, электротехнической терминологии и символики; знание свойств и физических процессов, происходящих в электрических машинах, элементной базы электроники, применяемой в преобразовательных устройствах для питания электроприводов подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования; на получение теоретических знаний и практических навыков для их дальнейшего использования в практической деятельности.

Изучение дисциплины Электротехника, электроника и электропривод предусматривает:

- лекции,
- лабораторные работы;
- контрольные работы;
- самостоятельную работу;
- экзамен.

В ходе освоения раздела 1 «Электрические и магнитные цепи» студенты должны уяснить основные методы анализа и расчета линейных и нелинейных электрических и магнитных цепей.

В ходе освоения раздела 2 «Трансформаторы» студенты должны знать назначение, конструкцию, принцип действия трансформаторов.

В ходе освоения раздела 3 «Машины постоянного тока» студенты должны изучить конструкцию и принцип действия генератора и двигателя постоянного тока, знать их характеристики и схемы включения.

В ходе освоения раздела 4 «Асинхронные машины» студенты должны уяснить устройство, принцип работы, режимы работы асинхронных машин; знать способы пуска асинхронных двигателей и способы регулирования их частоты вращения; знать рабочие характеристики асинхронных двигателей и их влияние на работу асинхронных двигателей в электроприводах.

В ходе изучения раздела 5 «Синхронные машины» студенты должны освоить устройство и принцип действия синхронных генераторов и синхронных двигателей; знать условия параллельной работы синхронных генераторов и особенности использования синхронных двигателей.

В ходе освоения раздела 6 «Основы электропривода» студенты должны знать основные сведения об электроприводах и условиях, определяющих выбор типа электродвигателя, а также получают информацию об условиях управления электроприводами.

В ходе освоения раздела 7 «Основы электроники» студенты должны научиться ориентироваться в основных электронных устройствах, применяемых в преобразователях для питания электроприводов, знать их элементную базу, конструкцию, принципы работы.

Необходимо овладеть навыками и умениями применения изученных методов для их дальнейшего использования в практической деятельности, применения и реализации тех или иных проектов в конкретных ситуациях.

В процессе изучения дисциплины рекомендуется на первом этапе обратить внимание на основные законы физики, математический понятийный аппарат.

Овладение ключевыми понятиями является основой для успешного усвоения работы всех функциональных устройств, машин и оборудования в области электротехники и электроники.

При подготовке к экзамену рекомендуется особое внимание уделить следующим вопросам:

1. Электрическая цепь и ее элементы. Основные понятия и определения для электрической цепи
2. Закон Ома для участка цепи. Закон Ома для всей цепи
3. Первый и второй законы Кирхгофа
4. Электрическая цепь с последовательным, параллельным и смешанным соединением элементов
5. Источники тока и ЭДС в электрических цепях
6. Режимы работы электрической цепи
7. Расчет электрической цепи с одним источником питания
8. Расчет разветвленной электрической цепи с несколькими источниками питания методом контурных токов
9. Способы представления синусоидальных токов, напряжений, ЭДС
10. Действующее и среднее значения переменного тока, напряжения и ЭДС
11. Элементы электрической цепи синусоидального тока: сопротивление (R), индуктивность (L), емкость (C).
12. Цепь с последовательным соединением RLC- элементов
13. Цепь с параллельным соединением RLC -элементов
14. Повышение коэффициента мощности в электрической цепи
15. . Комплексный (символический) метод расчета цепей синусоидального тока
16. Законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме
17. Четырехпроводная электрическая цепь: симметричная и несимметричная нагрузка приемника.

18 Соединение фаз генератора и приемника по схеме «треугольник»

19. Соединение фаз приемника по схеме «треугольник»: симметричная и несимметричная нагрузка
20. Соединение фаз генератора и приемника по схеме «звезда с нейтральным проводом»
21. Магнитное поле и его параметры. Магнитные цепи
22. Закон полного тока. Закон Ома для магнитной цепи
23. Ферромагнитные материалы и их свойства
24. Устройство и принцип действия трансформаторов
25. Идеализированный трансформатор. Намагничивающий ток и ток холостого хода
26. Устройство и принцип действия машин постоянного тока. Принцип действия генератора. Принцип действия двигателя
27. Электродвижущая сила якоря и электромагнитный момент. Магнитная цепь машины постоянного тока.
28. Реакция якоря. Коммутация в машинах постоянного тока.
29. Схемы включения машин постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения
30. Устройство трехфазной асинхронной машины. Получение вращающегося магнитного поля.
31. Режимы работы трехфазной асинхронной машины
32. Электромагнитный момент и асинхронной машины
33. Механическая характеристика асинхронного двигателя.
34. Пуск в ход асинхронных двигателей
35. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.
36. Устройство и принцип действия синхронных машин
37. Краткая классификация синхронных машин. Схема замещения синхронного генератора.

38. Угловые характеристики синхронного генератора. Основные характеристики синхронного генератора.

39. Параллельная работа синхронных генераторов.

40. Угловая и механическая характеристика синхронного двигателя. Рабочие характеристики синхронного двигателя.

41. Способы пуска в ход синхронного двигателя.

42. Частотное торможение синхронного двигателя

43. Общие сведения об электроприводе.

44. Условия, определяющие выбор типа электродвигателя.

45. Управление электроприводами

46. Полупроводниковые резисторы, диоды, тиристоры

47. Биполярные транзисторы

48. Полевые транзисторы

49. Неуправляемые и управляемые выпрямители

50. Усилители электрических сигналов на биполярных транзисторах

51. Импульсная и цифровая техника

В процессе проведения лабораторных работ происходит закрепление знаний, формирование умений и навыков реализации представления об электрических и магнитных цепях, трансформаторах, синхронных, асинхронных машин, машин постоянного тока, основах электропривода и основах электроники.

Самостоятельную работу необходимо начинать с изучения теоретического материала.

В процессе консультации с преподавателем необходимо выяснить все непонятные, вызывающие сомнения вопросы.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой по данной дисциплине литературы.

Предусмотрено проведение аудиторных занятий в интерактивной форме (в виде лекции-дискуссии, лекции-беседы, лекции с разбором конкретных ситуаций, просмотр и обсуждение видеоматериалов) в сочетании с внеаудиторной работой.

Приложение 2

АННОТАЦИЯ
рабочей программы дисциплины

Электротехника, электроника и электропривод

1. **Цель и задачи дисциплины**

Целью изучения дисциплины является: **ф**ормирование знаний законов электротехники, электротехнической терминологии и символики; знание свойств и физических процессов, происходящих в электрических машинах; элементной базы электроники, применяемой в преобразовательных устройствах для питания электроприводов подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования.

Задачей изучения дисциплины является: обеспечить теоретическую и практическую подготовку обучающихся в области электротехники и электроники для их совместного участия в составе коллектива исполнителей по техническому обеспечению разработки и эксплуатации электрических частей и механизмов в подъемно-транспортных, строительных, дорожных машинах и оборудовании.

2. **Структура дисциплины**

2.1 Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: Лк-34 час.; ЛР-34 час.; СР-40 час.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 144 часа, 4 зачетных единицы

2.2 Основные разделы дисциплины:

1 - Электрические и магнитные цепи
2 - Трансформаторы
3 - Машины постоянного тока
4 - Асинхронные машины
5 - Синхронные машины
6 - Основы электропривода
7 - Основы электроники

3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

ОК-1 Способность к абстрактному мышлению, анализу, синтезу

ПК-10 Способность разрабатывать технологическую документацию для производства, модернизации, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта наземных транспортно-технологических средств и их технологического и оборудования

ПСК-2,7 Способностью разрабатывать технологическую документацию для производства, модернизации, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта средств механизации и автоматизации подъемно-транспортных, строительных и дорожных работ

3. **Вид промежуточной аттестации**: экзамен

Приложение 3

Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе
на 20___-20___ учебный год

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:
_____
___
_____
___

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:
_____
_____
_____

Протокол заседания кафедры №____ от «___» _____ 20 ____ г.,
(разработчик)

Заведующий кафедрой _____ _____
(подпись) *(Ф.И.О.)*

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства от 11.08.2016г. № 1022

для набора 2015 года: и учебными планами ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «03» июля 2018г. № 413; для заочной формы обучения от «03» июля 2018г. № 413

Астапенко Н.А. ст.преподаватель кафедры ЭиЭ _____

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры ЭиЭ

от «___» __декабря___ 2018 г., протокол №_____

Заведующий кафедрой ЭиЭ _____ Ю.Н.Булатов

СОГЛАСОВАНО:

И.о. заведующего кафедрой СДМ _____ К.Н.Фигура

Директор библиотеки _____ Т.Ф. Сотник

Рабочая программа одобрена методической комиссией ФЭиА

от «___» __декабря_____ 2018 г., протокол №_____

Председатель методической комиссии факультета _____ А.Д.Ульянов

СОГЛАСОВАНО:

Начальник
учебно-методического управления _____ Г.П. Нежевец

Регистрационный №_____