

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт ядерной энергии и промышленности

Ю.И. Рясков, Н.М. Шайтор

Э Л Е К Т Р И Ч Е С К И Е М А Ш И Н Ы

Учебно-методическое пособие

Севастополь
СевГУ
2018

УДК 621.31
ББК 31.261.62
Р997

Р е ц е н з е н т:

В.Г. Слюсаренко - канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры
«Возобновляемые источники энергии и Электрические системы и сети»
Института ядерной энергии и промышленности СевГУ

Рясков Ю.И.

Р997 Электрические машины: учеб.-метод. пособие / Ю.И. Рясков,
Н.М. Шайтор. – Севастополь: СевГУ, 2018. – 293 с.

Представлены содержание дисциплины и виды учебной работы, рабочая программы и структура дисциплины «Электрические машины»: темы лекций и практических занятий, задания для самостоятельной работы студентов, вопросы итогового контроля знаний студентов очной и заочной формы обучения, краткий конспект лекций, тезаурус по электрическим машинам.

УДК 621.31
ББК 31.261.62

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» Института ядерной энергии и промышленности ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», протокол № 12/17 от 04 октября 2017 г.

© Рясков Ю.И., Шайтор Н.М., 2018
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2018

1. ИНФОРМАЦИЯ О ДИСЦИПЛИНЕ

1.1. Предисловие

Дисциплина «Электрические машины» изучается студентами на 3-м курсе в объеме 288 часов, предусмотренных государственными образовательными стандартами.

Дисциплина включает в себя следующие разделы (части):

- Общие основы функционирования и устройства электрических машин;
- Трансформаторы;
- Общие вопросы теории и устройства синхронных и асинхронных машин;
- Синхронные машины;
- Асинхронные машины;
- Машины постоянного тока.

Целью изучения дисциплины является формирование у будущего инженера такого уровня профессиональной подготовленности и квалификации в области электрических машин, который соответствует требованиям государственного образовательного стандарта по соответствующей специальности.

Задачами изучения дисциплины является привитие будущему выпускнику определенного, предусмотренного государственным стандартом и учебной программой, комплекса знаний и умений в области электрических машин, позволяющих ему решать практические и эксплуатационные задачи.

В результате изучения дисциплины будущий выпускник должен:

Иметь представление:

- о физических процессах и законах, связанных с электромеханическим и электромагнитным преобразованием энергии;
- о существующих видах, типах и модификациях электрических машин, их особенностях и областях применения;
- об основных требованиях к электрическим машинам, условиях их работы, основных характеристиках и параметрах электрических машин;
- об общем текущем состоянии и перспективах развития электромашиностроения в России и за рубежом.

Знать:

- основные соотношения и закономерности, лежащие в основе электромеханического и электромагнитного преобразования энергии;
- устройство и принцип действия трансформаторов; асинхронных и синхронных машин, машин постоянного тока, а также созданных на их основе специальных электрических машин;
- конструктивные исполнения и стандартные режимы работы электрических машин;

- эксплуатационные требования к электрическим двигателям, генераторам, электромеханическим преобразователям и основные показатели, характеризующие уровень их изготовления и эффективность работы;
- основы проектирования и выбора электрических машин.

Уметь:

- планировать и разрабатывать методы и способы проведения работ по техническому обслуживанию и экспериментальному исследованию электрических машин;
- внедрять достижения науки и техники, передовой отечественный и зарубежный опыт в области выбора и эксплуатации электрических машин;
- практически проводить обслуживание электрических машин во время их эксплуатации, испытаний или ремонта.

Владеть методами анализа вариантов и прогнозирования последствий принятия решений, связанных с проектированием, выбором, эксплуатацией и испытаниями электрических машин.

Место дисциплины в учебном процессе

Дисциплина «Электрические машины» является одной из важнейших общепрофессиональных дисциплин, для успешного освоения которой требуется применение знаний по ряду естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин и, в первую очередь, по таким, как: «Математика», «Физика», «Теоретические основы электротехники», «Химия»; «Информатика»; «Информационные технологии»; «Теоретическая механика»; «Теоретические основы электротехники»; «Электротехническое и конструкционное материаловедение»; «Общая энергетика»; «Информационно-измерительная техника»; «Силовая электроника»; «Прикладная механика»; «Инженерная графика» и др.

Одновременно знания и умения по курсу «Электрические машины» являются основой для успешного освоения других профессиональных дисциплин, таких как «Электрические станции и подстанции»;

«Электроэнергетические системы и сети»;

«Электроснабжение»;

«Электрический привод»;

«Электрические и электронные аппараты»;

«Вспомогательное оборудование нетрадиционной и возобновляемой энергетики»;

«Электромагнитные переходные процессы»;

«Электромеханические переходные процессы»;

«Основы эксплуатации электрооборудования»;

«Электрооборудование атомных электростанций»;

«Энергосберегающие режимы и технологии»;

«Приёмники и потребители электроэнергетических систем электроснабжения»;

«Электрооборудование источников энергии электрических сетей и промышленных предприятий»;

«Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах».

1.2. Содержание дисциплины и виды учебной работы

Шифр	Содержание дисциплины	Объем, час
Б.3.Б.4	Электрические машины: общие вопросы электромеханического преобразования энергии: физические законы, лежащие в основе их работы: трансформаторы: асинхронные и синхронные машины: машины постоянного тока; специальные электрические машины: конструктивные исполнения, параметры и режимы работы электрических машин, основные характеристики электрических двигателей, генераторов и преобразователей: эксплуатационные требования к ним, тенденции их развития.	288

Перечень видов практических занятий и контроля:

- контрольные работы (для очной и заочной форм обучения);
- практические занятия;
- лабораторные работы;
- зачет, экзамен.

2. РАБОЧИЕ УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. Рабочая программа

Разработана на кафедре «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» в соответствии со следующими нормативными документами:

– Порядок организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры, утвержденный Приказом Минобрнауки РФ от 19.12.2013 г. № 1367.

– Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (квалификация Бакалавр), утвержденный Приказом Минобрнауки РФ от 03 сентября 2015 г. № 955.

– Примерная основная образовательная программа по направлению подготовки 140.400 «Электроэнергетика и электротехника», утвержденная 06.04.2010г. учебно-методическим объединением вузов по образованию в области энергетики и электротехники ГОУ ВПО МЭИ (ТУ), (носит рекомендательный характер;

– Положение о порядке разработки и утверждения основных образовательных программ в ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», утвержденное ректором ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» от 12 января 2015 г. № 02-08/17.

Впервые утверждена и введена в действие на заседании кафедры Электрические системы и сети от «___»_____20__г., протокол №____.

Переутверждена и введена в действие с изменениями на заседании кафедры Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети от «___»_____20__ г., протокол №_____.

Разработчик рабочей программы: Рясков Ю.И., кандидат технических наук, доцент

2.1.1. Планируемые результаты обучения по дисциплине, её объем и место в структуре образовательной программы

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Цель изучения дисциплины «Электрические машины» - сформировать у студентов профессиональные и профессионально-специализированные компетенции, направленные на овладение физическими принципами работы, видами конструкции, технологией изготовления, методами расчёта и проектирования, характеристиками, основами использования, эксплуатацией и испытаниями электрических машин общепромышленного применения.

Задачами дисциплины являются:

- получение практических навыков эксплуатации, и проектирования электрических машин в составе объектов электроэнергетики;
- знание материалов, применяемые при производстве турбо-, гидрогенераторов и электрических двигателей;
- умение предотвращать аварии и выход из строя электрических машин;
- умение расследования аварий объектов электроэнергетики;
- проверять при приёме на работу профессиональные знания персонала;
- принимать и обосновывать конкретные технические решения при конструировании электроэнергетического оборудования.

По результатам освоения дисциплины обучаемый должен обладать следующими профильными компетенциями:
общепрофессиональными:

способностью осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий (ОПК-1);

для проектно-конструкторской деятельности:

способностью принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования (ПК-3);

для производственно-технологической деятельности:

готовностью обеспечивать требуемые режимы и заданные параметры технологического процесса по заданной методике (ПК-7);

для сервисно-эксплуатационной деятельности:

готовностью к участию в выполнении ремонтов оборудования по заданной методике (ПК-16).

Таблица 2.1 – Планируемые результаты обучения по дисциплине

Код и уровень формируемой компетенции по ООП ВО	Владения	Умения	Знания
ОПК-1	В (ОПК-1): <i>владеть:</i> - приёмами поиска, систематизации, хранения, обработки и анализа информации из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий в области электрических машин.	У (ОПК-1): <i>уметь:</i> - искать, систематизировать, хранить, обрабатывать информацию из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий в области электрических машин.	З (ОПК-1): <i>Знать:</i> - приёмы поиска, систематизации, хранения, обработки и анализа информации из различных источников и баз данных, знать представление ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий в области электрических машин
ПК-3	В (ПК-3): <i>владеть:</i> - способностью принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования	У (ПК-3): <i>уметь:</i> - обосновывать технические решения, сравнивать различные варианты при разработке объектов профессиональной деятельности, включающих различные типы электрических машин	З (ПК-3): <i>Знать:</i> - основные методы расчёта простых конструкций электро-энергетических и электротехнических объектов, включающих различные типы электрических машин
ПК-7	В (ПК-7): <i>владеть:</i> - готовностью обеспечивать требуемые режимы и заданные параметры технологического процесса по заданной методике	У (ПК-7): <i>уметь:</i> - обеспечивать требуемые режимы и заданные параметры технологического процесса по заданной методике при использовании электрических машин	З (ПК-7): <i>Знать:</i> - режимы использования и параметры при использовании электрических машин в различных технологических процессах
ПК-16	В (ПК-16): <i>владеть:</i> - готовностью к участию в выполнении ремонтов оборудования по заданной методике	У (ПК-16): <i>уметь:</i> - проверять техническое состояние, определять остаточный ресурс электрических машин, организовывать профилактические осмотры и текущие ремонты .	З (ПК-16): <i>Знать:</i> - методы проверки технического состояния и остаточного ресурса электрических машин, формы организации профилактических осмотров и приёмы текущего ремонта.

2.1.2 Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к базовой части профессионального цикла основной образовательной программы подготовки бакалавров по профилям: Электрические станции; Электроэнергетические системы и сети; Электроснабжение; Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений; Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии.

Дисциплина базируется на следующих дисциплинах:

Высшая математика; Физика; Химия; Информатика; Информационные технологии; Теоретическая механика; Теоретические основы электротехники; Электротехническое и конструкционное материаловедение; Общая энергетика;; Информационно-измерительная техника; Силовая электроника; Прикладная механика; Инженерная графика.

Знания, полученные при освоении дисциплины, необходимы:

для изучения последующих естественно-научных, профессиональных дисциплин данного учебного плана и для всех вышеперечисленных профилей подготовки:

Электрические станции и подстанции;

Электроэнергетические системы и сети;

Электроснабжение;

Электрический привод;

Электрические и электронные аппараты;

Вспомогательное оборудование нетрадиционной и возобновляемой энергетики;

Электромагнитные переходные процессы;

Электромеханические переходные процессы;

Основы эксплуатации электрооборудования;

Электрооборудование атомных электростанций;

Энергосберегающие режимы и технологии;

Приёмники и потребители электроэнергетических систем электроснабжения;

Электрооборудование источников энергии электрических сетей и промышленных предприятий;

Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах.

для выполнения бакалаврской выпускной квалификационной работы;

для прохождения профессиональной практики;

для последующего освоения программ магистерской подготовки.

2.1.3. Объем дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов и видов учебных занятий

Таблица 2.2 – Распределение объема дисциплины по видам работ

Курс	Семестр	Общий объем, ЗЕ (ч)	Контактная работа, ч			Самостоятельная работа, ч	Реферат, РГЗ, контр. работа, коллоквиум	Курсовой проект (работа)	Зачет (семестр)	Экзамен (семестр)
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия					
Очная форма обучения										
3	5	4 (144)	36	22	14	72	РГР1,2; КР1,2	–	Диф.зачет	–
3	6	4 (144)	36	22	14	72	РГР3; КР3,4	КП	–	Экз
Заочная форма обучения										
4	7	4 (144)	6	–	6	132	РГР1,2; КР1,2	–	Диф.зачет	–
4	8	4 (144)	6	–	6	132	РГР3; КР3,4	КП	–	Экз

2.2. Содержание и структура учебной дисциплины «Электрические машины»

2.2.1. Содержание учебной дисциплины

Содержание дисциплины включает следующие разделы и темы:

Раздел 1. Законы электромеханики.

Тема 1.1. Электрическая машина как электромеханический преобразователь.

Раздел 2. Трансформаторы.

Тема 2.1. Однофазные трансформаторы.

Тема 2.2. Многофазные трансформаторы.

Раздел 3. Синхронные машины.

Тема 3.1. Устройство и принцип действия синхронных генераторов.

Тема 3.2. Параллельная работа и устойчивость синхронных генераторов.

Тема 3.3. Переходные процессы и несимметричные режимы синхронных генераторов.

Тема 3.4. Синхронные двигатели и синхронные компенсаторы.

Раздел 4. Асинхронные машины.

Тема 4.1. Принцип действия и устройство АД.

Тема 4.2. Пуск и регулирование частоты вращения АД.

Тема 4.3. Переходные процессы и работа АД при ненормальных условиях.

Раздел 5. Машины постоянного тока.**Тема 5.1.** Принцип действия МПТ.**Тема 5.2.** Генераторы постоянного тока.**Тема 5.3.** Двигатели постоянного тока.**2.2.2. Структура учебной дисциплины**

Таблица 2.3 – Структура учебной дисциплины

Названия содержатель- ных разделов и тем учебной дисциплины	Количество часов											
	Очная						Заочная					
	Объем в ЗЕ (ча- сах)	в том числе					все- го	в том числе				
		лек ·	пр ·	лаб ·	инд ·	СР С		лек ·	пр ·	лаб ·	инд ·	СР С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Семестр 5...												
Раздел 1. Законы электромеханики												
Тема 1.1	8	4	–	–	–	4	8	–	–	–	–	8
Всего по разделу 1	8	4	–	–	–	4	8	–	–	–	–	8
Раздел 2. Трансформаторы												
Тема 2.1	24	6	4	2	–	12	24	1	–	–	–	23
Тема 2.2	32	8	4	4	–	16	32	1	–	2	–	29
Всего по разделу 2	56	14	8	6	–	28	56	2	–	2	–	52
Раздел 3. Синхронные машины												
Тема 2.1	12	4	2	–	–	6	12	1	–	–	–	11
Тема 2.2	24	4	4	4	–	12	24	1	–	–	–	23
Тема 2.3	20	6	4	–	–	10	20	1	–	2	–	17
Тема 2.4	24	4	4	4	–	12	24	1	–	–	–	23
Всего по разделу 3	80	18	14	8	–	40	80	4	–	2	–	74
Всего за семестр	4 (144)	36	22	14	–	72	4 (144)	6	–	4	–	134
Семестр 6...												
Раздел 4. Асинхронные машины ...												
Тема 4.1	16	6	2	–	–	8	16	1	–	–	–	15
Тема 4.2	36	10	4	4	–	18	36	1	–	–	–	35
Тема 4.3	40	8	8	4	–	20	40	1	–	2	–	37
Всего по разделу 4	92	24	14	8	–	46	92	3	–	2	–	87
Раздел 5. Машины постоянного тока ...												
Тема 5.1	8	4	–	–	–	4	8	1	–	–	–	7
Тема 5.2	20	4	2	4	–	10	20	1	–	–	–	19
Тема 5.3	16	4	2	2	–	8	16	1	–	2	–	13
Всего по разделу 5	44	12	4	6	–	22	44	3	–	2	–	39

Названия содержатель- ных разделов и тем учебной дисциплины	Количество часов											
	Очная						Заочная					
	Объем в ЗЕ (ча- сах)	в том числе					все- го	в том числе				
		лек ·	пр ·	лаб ·	инд ·	СР С		лек ·	пр ·	лаб ·	инд ·	СР С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Курсовой проект	2 (36)	–	4	–	–	32	36	–	–	–	–	36
Всего за семестр	4 (144)	36	22	14	–	72	4 (144)	6		4		134
Подготовка и сдача экзамена	1 (36)	–	–	–	–	–	1 (36)	–	–	–	–	–
Всего часов по дисциплине	8 (288)	72	44	28	–	144	8 (288)	12	–	8	–	268

2.2.3 Распределение контактной работы

Распределение контактной работы по видам занятий приведено в табл. 2.4 - 2.6.

Таблица 2.4 – Лекции, их содержание и объем в часах

Номер темы	Номер лекции	Наименование темы. Содержание лекции.	Очная ФО		Заочная ФО	
			Объем	Семестр	Объем	Семестр
1	2	3	4	5	6	7
T1.1	Л1	Вводная лекция по дисциплине. Порядок прохождения курса “Электрические машины”. Краткая история развития ЭМ. Классификация электрических машин.	2	5	–	5
T1.1	Л2	Законы электромеханики. Электрическая машина как электромеханический преобразователь. Гармоники в магнитное поле в воздушном зазоре машины. Обобщенный электромеханический преобразователь.	2	5	–	5
T1.1	Л3	ЭДС в обмотках электрических машин. Магнитодвижущие силы обмоток. Электромагнитный момент. Потери и коэффициент полезного действия. Подход к проектированию электрических машин.	2	5	–	5

1	2	3	4	5	6	7
T2.1	Л4	Принцип действия трансформатора. Режим холостого хода трансформатора. Нагрузочный режим трансформатора. Приведенный трансформатор. Векторная диаграмма трансформатора при нагрузке.	2	5	1	5
T2.2	Л5	Трёхфазные трансформаторы Преобразование трехфазного тока. Способы соединения обмоток трехфазных Трансформаторов. Схемы и группы соединений обмоток трансформаторов. Определение параметров схемы замещения трансформатора опытным путем. Определение параметров схемы замещения расчетным путем. Внешняя характеристика трансформатора. Коэффициент полезного действия трансформатора.	2	5	—	5
T2.2	Л6	Параллельная работа трансформаторов Условия параллельной работы. Условие одинаковости групп соединений обмоток. Условие равенства коэффициентов трансформации. Условие равенства напряжений короткого замыкания	2	5	1	5
T2.2	Л7	Многообмоточные трансформаторы Трехобмоточные трансформаторы. Двухобмоточные трансформаторы с расщепленной обмоткой.	2	5	—	5
T2.2	Л8	Переходные процессы в трансформаторах ПП при подключении трансформатора к сети. Переходные процессы в трансформаторе при коротком замыкании. ПП в трансформаторах при перенапряжениях. Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов.	2	5	1	5
T3.1	Л9	Обмотки статора машин переменного тока Способы выполнения обмоток. Классификация обмоток. Принцип образования трёхфазной обмотки. Однослойные обмотки. Двухслойные обмотки	2	5	—	5
T3.1	Л10	Устройство и принцип действия синхронных генераторов Назначение и принцип действия синхронной машины. Устройство синхронной машины. Особенности конструкции синхронных машин большой мощности	2	5	1	5
T3.1	Л11	Реакция якоря синхронного генератора Магнитное поле обмотки возбуждения. Продольная и поперечная реакция якоря. Магнитные поля и ЭДС продольной и поперечной реакции якоря	2	5	—	5

1	2	3	4	5	6	7
ТЗ.1	Л12	Векторные диаграммы и характеристики СГ Векторные диаграммы неявнополюсных синхронных генераторов. Векторные диаграммы синхронных явнополюсных генераторов. Характеристики синхронных генераторов	2	5	1	5
ТЗ.2	Л13	Параллельная работа СГ с мощной сетью Включение на параллельную работу синхронных генераторов. Синхронные режимы параллельной работы синхронных машин.	2	5	1	5
ТЗ.2	Л14	Устойчивость параллельной работы СГ с мощной сетью Общие положения об устойчивости систем. Статическая устойчивость работы генератора с сетью. Динамическая устойчивость	2	5	—	5
ТЗ.3	Л15	Несимметричные режимы работы СГ Несимметричная нагрузка трехфазных генераторов. Несимметричные короткие замыкания	2	5	—	5
ТЗ.3	Л16	Переходные процессы в синхронных машинах. Трехфазное короткое замыкание на выводах машины. Нахождение параметров синхронной машины в ПП	2	5	—	5
ТЗ.3	Л17	Асинхронный режим СГ Асинхронный режим работы невозбужденной синхронной машины. Асинхронный режим возбужденной синхронной машины	2	5	—	5
ТЗ.4	Л18	Синхронные двигатели и синхронные компенсаторы. Синхронные двигатели. Способы пуска синхронных двигателей. Синхронные компенсаторы.	2	5	—	5
ТЗ.4	Л19	Специальные синхронные машины. Индукторные машины. Синхронные машины с постоянными магнитами. Гистерезисные двигатели. Шаговые двигатели	2	6	—	6
Т4.1	Л20	Устройство и принцип действия АД Назначение и области применения асинхронных машин. Устройство трёхфазного АД. Принцип действия АД	2	6	1	6

1	2	3	4	5	6	7
T4.1	Л21	Работа АД при неподвижном роторе Холостой ход асинхронной машины при $n = 0$. Короткое замыкание асинхронной машины. Заторможенная асинхронная машина при нагрузке	2	6	—	6
T4.1	Л22	Работа АД при вращающемся роторе Основные явления, происходящие в асинхронной машине при вращении ротора. Уравнение э.д.с. ротора и ток ротора. Скорость вращения н.с. ротора. Векторная диаграмма и эквивалентная схема асинхронного двигателя.	2	6	—	6
T4.1	Л23	Вращающий момент АД Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя. Вращающие моменты асинхронной машины. Электромагнитный момент асинхронной машины. Зависимость момента $M_{эм}$ от скольжения	2	6	1	6
T4.1	Л24	Высшие гармоники вращающего момента АД. Пространственные гармоники вращающего момента АД. Асинхронные моменты. Синхронные моменты. Реактивные моменты	2	6	—	6
T4.2	Л25	Пусковые и рабочие характеристики Основные характеристики пуска АД. Прямой пуск. Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при пониженном напряжении. Рабочие характеристики двигателя.	2	6	1	6
T4.2	Л26	Регулирование частоты вращения АД Регулирование угловой скорости изменением частоты f_1 . Регулирование угловой скорости изменением числа пар полюсов. Регулирование угловой скорости изменением подводимого напряжения. Регулирование угловой скорости включением в цепь ротора добавочного резистора	2	6	—	6
T4.3	Л27	Работа АД при ненормальных условиях Работа трехфазного асинхронного двигателя при напряжении, отличном от номинального. Работа трехфазного асинхронного двигателя при частоте, отличной от номинальной. Работа трехфазного асинхронного двигателя при несимметричных режимах. Работа трехфазного асинхронного двигателя при несинусоидальном питающем напряжении	2	6	—	6
T4.3	Л28	Переходные режимы работы АД Переходные процессы в асинхронных двигателях. Включение асинхронной машины на сеть. Отключение асинхронной машины от сети	2	6	—	6

1	2	3	4	5	6	7
T4.3	Л29	Асинхронные двигатели специального назначения. Двухклеточный асинхронный двигатель. Глубокопазный асинхронный двигатель. Асинхронные машины с массивным ротором.	2	6	—	6
T5.1	Л30	Устройство и принцип действия МПТ Принцип действия машин постоянного тока. Устройство машины постоянного тока.	2	6	1	6
T5.1	Л31	Магнитная цепь и реакция якоря МПТ Виды реакции якоря в машинах постоянного тока. Реакция якоря в генераторе и в двигателе	2	6	1	6
T5.1	Л32	Коммутация тока в МПТ Явление коммутации тока в машинах постоянного тока. Причины искрения под щётками. Щеточный контакт и его характеристики. Уравнение коммутационного процесса. Виды коммутации.	2	6	—	6
T5.2	Л33	Генераторы постоянного тока Классификация генераторов постоянного тока. Основные величины, характеризующие работу генераторов постоянного тока. Характеристики генераторов постоянного тока	2	6	1	6
T5.3	Л34	Двигатели постоянного тока Принцип саморегулирования двигателей постоянного тока. Характеристики двигателей постоянного тока. Способы пуска, регулирования частоты вращения и реверса двигателей постоянного.	2	6	—	6
T5.3	Л35	Способы пуска и регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока Способы пуска ДПТ. Способы регулирования частоты вращения и реверса двигателей постоянного тока.	2	6	—	6
T5.3	Л36	Специальные типы машин постоянного тока Генератор с расщепленными полюсами. Униполярные генераторы и двигатели. Вентильный двигатель	2	6	—	6
		Общий лекционный объем дисциплины	72	5, 6	12	5,6

Таблица 2.5 – Лабораторные занятия, их содержание и объем в часах

Номер темы	Номер занятия	Содержание занятий	Очная ФО		Заочная ФО	
			Объем	Семестр	Объем	Семестр
	1	2	3	4	5	6
T2.1	Лз-1	Наладка режимов работы трансформатора	2	5	—	5
T2.2	Лз-2	Исследование трансформатора	2	5	2	5
T2.2	Лз-2	Исследование трансформатора	2	5	—	5
T3.1	Лз-3	Исследование автономного синхронного генератора	2	5	2	5
T3.1	Лз-3	Исследование автономного синхронного генератора	2	5	—	5
T3.2	Лз-4	Исследование параллельной работы СГ с мощной сетью	2	5	2	5
T3.2	Лз-4	Исследование параллельной работы СГ с мощной сетью	2	5	—	5
T4.2	Лз-5	Исследование асинхронного двигателя	2	6	2	6
T4.2	Лз-5	Исследование асинхронного двигателя	2	6	—	6
T5.2	Лз-6	Исследование генератора независимого возбуждения	2	6	—	6
T5.2	Лз-7	Исследование генераторов параллельного и смешанного возбуждения	2	6	2	6
T5.2	Лз-7	Исследование генераторов параллельного и смешанного возбуждения	2	6	—	6
T5.3	Лз-8	Исследование электродвигателя постоянного тока	2	6	2	6
T5.3	Лз-8	Исследование электродвигателя постоянного тока	2	6	—	6
		Всего часов по дисциплине	28	5. 6	12	5, 6

Таблица 2.6 – Практические (или семинарские) занятия, их содержание и объем в часах

Номер темы	Номер занятия	Содержание занятий	Очная ФО		Заочная ФО	
			Объем	Семестр	Объем	Семестр
	1	2	3	4	5	6
T2.2	РГР-1	Расчет однофазного трансформатора	4	5	—	5
T2.2	Пз-1	Устройство и системы обслуживания трансформаторов	4	5	—	5
T2.2	Пз-2	Решение задач по трансформаторам	4	5	—	5
T2.2	Пз-3	Рабочие свойства трансформаторов	4	5	—	5
T2.2	РГР-2	Расчет и построение схемы обмотки статора СГ	4	5	—	5
T2.2	Пз-4	Устройство и системы обслуживания СГ	2	5	—	5
T2.2	РГР-3	Расчет характеристик синхронного генератора	2	6	—	6
T2.2	РГР-3	Расчет характеристик синхронного генератора	2	6	—	6
T2.2	Пз-5	Расчёт параметров и режимов использования СГ	2	6	—	6
T2.2	Пз-5	Расчёт параметров и режимов использования СГ	2	6	—	6
T2.2	КП-1	Расчет трёхфазного трансформатора (курсовой проект)	4	6	—	6
T2.2	КП-2	Расчет трёхфазного трансформатора (курсовой проект)	4	6	—	6
T3.2	Пз-6	Устройство АД	2	6	—	6
T3.2	Пз-7	Расчёт параметров и режимов использования АД	2	6	—	6
T3.2	Пз-8	Изучение устройства и принципа действия МПТ	2	6	—	6
		Всего часов по дисциплине	44	5, 6	—	5, 6

Таблица 2.7 – Курсовой проект - 6 семестр. Общая трудоемкость составляет 1 зачетную единицу, (36 часов)

№ п/п	Раздел дисциплины. Форма промежуточной аттестации (по семестрам)	Всего часов на раздел	Семестр	Виды учебной работы, включая самостоятельную, и трудоемкость в часах				Формы текущего контроля по разделам
				Лк	Пр	Лаб	Сам	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Выдача задания на курсовой проект. Расчет электрических величин силового трёхфазного трансформатора.		6		1		4	Обоснование принятых решений проверка расчётов
2.	Предварительный расчет силового трёхфазного трансформатора		6		1		4	Обоснование принятых решений проверка расчётов
3.	Окончательный расчет силового трёхфазного трансформатора		6		1		4	Обоснование принятых решений проверка расчётов
4.	Тепловой расчет силового трёхфазного трансформатора. Проектирование системы охлаждения, корпуса трансформатора		6		1		4	Обоснование принятых решений проверка расчётов
5.	Выполнение чертежа общего вида спроектированного трансформатора		6				4	Проверка чертежа в тонких линиях
6.	Выполнение расчётно-пояснительной записки проекта		6				6	Проверка расчётно-пояснительной записки
7.	Подготовка к защите проекта		6				6	Защита проекта
	Итого	36	6		4		32	

2.2.4. Распределение самостоятельной работы студентов

Таблица 2.8 – График недельной загрузки СРС студента ОФО (5 семестр)

№ недели	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	С	Итого
Подготовка к лекциям	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		18
Подготовка к лабораторным занятиям		2		2		2		2		2		2		2		2		2		10
Работа над индивидуальными заданиями (РГР-1, 2)			3		3			3	3	3	3		3	3	3		3			30
Выполнение курсового проекта																				
Подготовка к текущему контролю							1	1							1	1				4
Подготовка к промежуточной аттестации (диф.зачет)																		10		
Итого	1	3	4	3	4	3	2	7	4	6	4	3	4	3	5	4	4	3	10	72

Таблица 2.9 – График недельной загрузки СРС студента ОФО (6 семестр)

№ недели	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	С	Итого
Подготовка к лекциям			1			1			1			1			1					5
Подготовка к лабораторным занятиям				1				1				1		1		1				5
Работа над индивидуальными заданиями (РГР-3)			2		2			2		2										8
Выполнение курсового проекта																				32
Подготовка к текущему контролю							1									1				2
Подготовка к промежуточной аттестации (экзамен)																		20		
Итого	1		3	1	2	1	1	3	1	2		2		1	1	2			20	72

Таблица 2.10 – Распределение СРС студента ЗФО (5 семестр)

Вид работ	Объем, ч
Изучение теоретического материала	82
Подготовка к лабораторным (практическим) занятиям	12
Выполнение индивидуального задания (РГР-1, 2)	30
Выполнение КП	-
Подготовка к промежуточной аттестации по дисциплине (диф.зачет)	10
Итого	134

Таблица 2.11 – Распределение СРС студента ЗФО (6 семестр)

Вид работ	Объем, ч
Изучение теоретического материала	51
Подготовка к лабораторным (практическим) занятиям	12
Выполнение индивидуального задания (РГР-3)	15
Выполнение КП	36
Подготовка к промежуточной аттестации по дисциплине (экзамен)	20
Итого	134

2.2.5. Перечень учебно-методического обеспечения
для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине
«Электрические машины»

Таблица 2.12 – Перечень контрольных вопросов для лабораторных работ

Наименование занятия	Контрольные вопросы
Лз-1 Наладка режимов работы трансформатора	1. Из каких элементов состоит активная часть трансформатора? 2. В чём состоит принцип действия трансформатора? 3. В чём состоит особенность трёхфазного трансформатора? 4. Что такое группа соединения обмоток и как она обозначается? 5. Как определить коэффициент трансформации трансформатора?
Лз-2 Исследование трансформатора	1. Цель и порядок выполнения работы. 2. Принцип действия трансформатора. 3. Почему изменяется ток в первичной обмотке при изменении тока во вторичной обмотке? 4. Написать и пояснить уравнения трансформатора. 5. Схема замещения трансформатора. 6. Как нагрузить трансформатор? 7. Внешняя характеристика трансформатора.
Лз-3 Исследование автономного синхронного генератора	1. Цель и порядок выполнения работы. 2. Принцип действия синхронного генератора. 3. Основные части синхронного генератора и их назначение. 4. С какой целью снимают характеристику холостого хода. 5. Что показывают внешние характеристики генератора? 6. Что показывают регулировочные характеристики генератора? 7. Почему характеристика короткого замыкания является прямолинейной?
Лз-4 Исследование параллельной работы СГ с мощной сетью	1. Цель и порядок выполнения работы. 2. Какие условия необходимо выполнить при включении синхронного генератора на параллельную работу? 3. К чему приводит включение синхронного генератора на параллельную работу при нарушении условий включения? 4. Как проверить выполнение условий включения? 5. Как увеличить (уменьшить) активную нагрузку синхронного генератора? 6. Как перевести синхронный генератор в режим двигателя и обратно? 7. Что выражает, и как снимаются у-образные характеристики синхронного генератора?

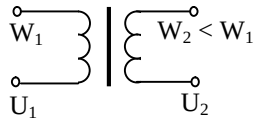
Лз-5 Исследование асинхронного двигателя	1. Цель и порядок выполнения работы. 2. В чём состоит принцип действия асинхронного двигателя? 3. Как расположены зажимы в коробке выводов двигателя? 4. Во сколько раз и почему пусковой ток асинхронного двигателя больше номинального тока? 5. Для чего применяются разные способы пуска двигателей? 6. Что выражают, какой имеют вид и от чего зависят рабочие характеристики асинхронного двигателя? 7. В чём состоит саморегулирование асинхронного двигателя? 8. Как влияет на работу двигателя изменение напряжения?
Лз-7 Исследование генератора постоянного тока	1. Цель и порядок выполнения работы. 2. Какие обмотки имеет генератор смешанного возбуждения, каково их назначение и как они могут быть включены? 3. В чём состоят условия самовозбуждения генератора постоянного тока? 4. Чем отличаются характеристики холостого хода генератора с самовозбуждением и с независимым возбуждением? 5. Какие причины вызывают снижение напряжения в генераторах параллельного и смешанного возбуждения ? 6. Чем объясняется нелинейность внешней характеристики генератора смешанного возбуждения? Чем определяется величина тока короткого замыкания генератора при различных способах возбуждения?
Лз-8 Исследование двигателя постоянного тока	1. Цель и порядок выполнения работы. 2. В чём состоит приготовление двигателя к пуску? 3. Какова роль последовательной обмотки в двигателе смешанного возбуждения и как проверить её согласованность с параллельной обмоткой? 4. Чем определяется пусковой ток и пусковой момент? 5. Каковы достоинства и недостатки прямого пуска? 6. Как нагрузить двигатель постоянного тока и какова физическая сущность этого процесса? 7. Что выражают и при каких условиях снимаются рабочие характеристики постоянного тока?

Тесты по разделу «Трансформаторы»

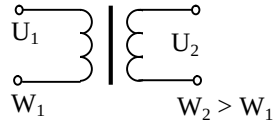
1. Показать схему повышающего трансформатора.

Ответ -

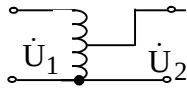
1.



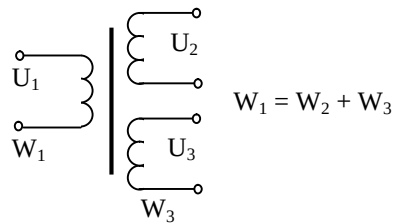
2.



3.



4.



2. Номинальная мощность трансформатора определяется формулой:

Ответ

1. $P_{1H} = U_{1H} I_{1H} \cos \varphi_{1H}$. кВт.

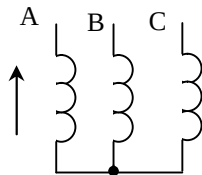
2. $P_{2H} = U_{2H} I_{2H} \cos \varphi_{2H}$. кВт.

3. $S_{1H} = U_{1H} I_{1H}$. кВт.

4. $S_{2H} = U_{2H} I_{2H}$. кВт.

3. Определить номер группы трехфазного трансформатора.

Ответ

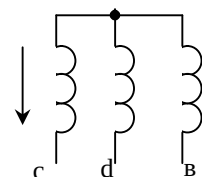


1. Y / Y – 2.

2. Y / Y – 4.

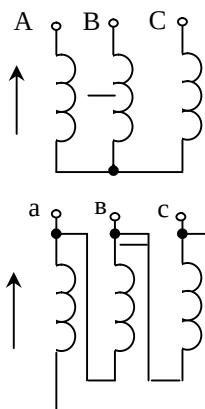
3. Y / Y – 8.

4. Y / Y – 10.



4. Определить номер группы трехфазного трансформатора.

Ответ



1. Y/Δ – 9.
2. Y/Δ – 11.
3. Y/Δ – 3.
4. Y/Δ – 7.

5. Для чего сердечник трансформатора выполняется шихтованным?

Ответ

1. Для уменьшения потерь на гистерезис.
2. Для уменьшения потерь на гистерезис и вихревые токи.
3. Для уменьшения потерь на вихревые токи.
4. Для уменьшения веса.

6. Как изменится режим работы трансформатора, если листы сердечника собрать не внахлест, а встык (с воздушным зазором)?

Ответ

1. Возрастут потери на гистерезис.
2. Возрастут потери на вихревые токи.
3. Возрастет ток холостого хода.
4. Уменьшится вторичное напряжение.

7. На сердечник трансформатора намотали добавочную обмотку $W_{доб.} = 10$ витков. В опыте холостого хода при $U_{1н} = 220$ В., $U_{2н} = 110$ В. На этой обмотке оказалось $U_{доб.} = 10$ В. Чему равно число витков обмоток трансформатора?

Ответ

1. $W_1 = 220$; $W_2 = 110$.
2. $W_1 = 22$; $W_2 = 11$.
3. $W_1 = 440$; $W_2 = 220$.
4. $W_1 = 200$; $W_2 = 100$.

8. С помощью какого опыта определяют потери в стали и параметры контура намагничивания трансформатора?

Ответ

1. Опыта короткого замыкания.
2. Опыта холостого хода.
3. Испытания под нагрузкой.

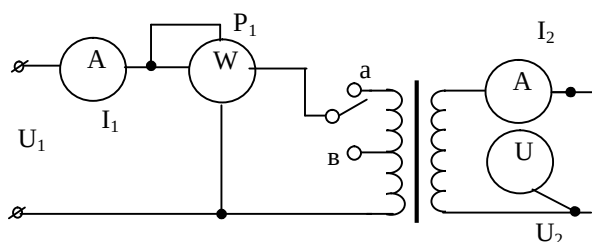
9. Как изменяется ток холостого хода I_0 и амплитуда индукции B_m , если уменьшить сечение сердечника трансформатора?

Ответ

- | | |
|------------------------|-----------------------|
| 1. I_0 – увеличится, | B_m – не изменится. |
| 2. I_0 – увеличится, | B_m – увеличится. |
| 3. I_0 – уменьшится, | B_m – не изменится. |
| 4. I_0 – уменьшится, | B_m – уменьшится. |

10. Как изменятся показания приборов, если уменьшить W_1 трансформатора с помощью переключателя? Какой из ответов неправильный?

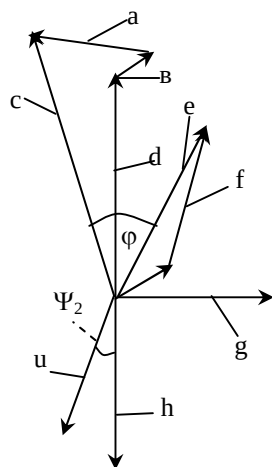
Ответ



1. I_1 - возрастет.
2. I_2 - не изменится.
3. P_1 - уменьшится.
4. U_2 - увеличится.

11. При расшифровке векторной диаграммы допущена ошибка. В каком из ответов?

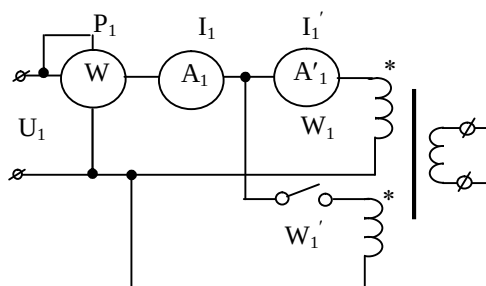
Ответ



1. (a) - $\dot{I}_1 X_1$; (b) - $\dot{I}_1 R_1$; (c) - U_1 .
2. (d) - $1 - E_1$; (e) - $\dot{I}_1$; (f) - $\dot{I}_0$.
3. (d) - $\dot{\Phi}_0$; (h) - $\dot{E}_1$; (u) - $\dot{I}_2$.

12. Как изменятся показания приборов, если при $W' = W_1$ включить рубильник? Какой из ответов неправильный?

Ответ



1. P_1 – увеличится в 2 раза.
2. I_1 - увеличится в 2 раза.
3. I_1' - не изменится.
4. I_1' - уменьшится в 2 раза.

13. Для изготовления магнитопроводов трансформаторов на 50 Гц применяются обычно листы электротехнической стали толщиной:

Ответ

1. 0,05 мм.
2. 0,1 мм.
3. 0,5 мм.
4. 1,0 мм.

14. До какой примерно величины можно увеличивать первичное напряжение трансформатора, чтобы ток холостого хода его не стал больше номинального тока первичной обмотки?

Ответ

1. $1,25 U_{1н}$.
2. $1,5 U_{1н}$.
3. $2,0 U_{1н}$.
4. $3,0 U_{1н}$.

15. Как изменится ток холостого хода трансформатора, если частота приложенного напряжения по каким-то причинам уменьшилась?

Ответ

1. Уменьшится примерно пропорционально частоте.
2. Останется неизменным.
3. Возрастет примерно обратно пропорционально частоте.
4. Возрастет примерно обратно-пропорционально квадрату частоты.

16. Каковы причины изменения напряжения на зажимах трансформатора при изменении нагрузки? Какой из ответов неправильный?

Ответ

1. Падение напряжения в сопротивлениях цепи первичной обмотки.
2. Падение напряжения в сопротивлениях цепи вторичной обмотки.
3. Характер нагрузки трансформатора.
4. Падение напряжения в сопротивлениях нагрузки.

17. Для э.д.с. обмоток трансформатора справедливы выражения:

Ответ

$$1. E_1 = 4,44f_1 W_1 K_{w1} \Phi_{\max}; \quad K_{w1} \cong 1,15.$$

$$2. E_2 = 4,44f_1 W_2 \Phi; \quad \Phi = \frac{\Phi_{\max}}{\sqrt{2}}.$$

$$3. E_1 = 4,44f_1 W_1 K_{w1} \Phi_{\max}; \quad K_{w1} \cong 1,0.$$

$$4. E_2 = 4,44f_1 W_2 K_{w1} \Phi_{\text{ср}}.$$

18. С помощью какого опыта определяют потери в меди и параметры обмоток трансформатора?

Ответ

1. Опыта холостого хода.
2. Опыта короткого замыкания.
3. Испытания под нагрузкой.

19. Определить R_K и X_K трансформатора, если известны $P_{\text{медн}} = 60$ Вт, $U_K = 10$ В, $I_{\text{кн}} = 10$ А.

Ответ

- | | |
|--------------------|------------------|
| 1. $R_K = 1$ Ом, | $X_K = 1,0$ Ом. |
| 2. $R_K = 0,6$ Ом, | $X_K = -0,8$ Ом. |
| 3. $R_K = 3,6$ Ом, | $X_K = 0,64$ Ом. |
| 4. $R_K = 6$ Ом, | $X_K = 8$ Ом. |

20. Определить R_0 и X_0 трансформатора, если в опыте холостого хода получены данные: $P_0 = 600$ Вт; $U_0 = 220$ В; $I_{10} = 10$ А.

Ответ

- | | |
|-------------------|----------------|
| 1. $R_0 = 6$ Ом, | $X_0 = 21$ Ом. |
| 2. $R_0 = 3$ Ом, | $X_0 = 30$ Ом. |
| 3. $R_0 = 12$ Ом, | $X_0 = 60$ Ом. |
| 4. $R_0 = 22$ Ом, | $X_0 = 84$ Ом. |

21 Каковы соотношения фазных и линейных значений напряжений в трехфазных трансформаторах.

Ответ

- | | |
|--|---|
| 1. $U_{\Delta\Delta} = U_{\phi\Delta}$, | $U_{\Delta Y} = \sqrt{3}U_{\phi Y}$. |
| 2. $U_{\Delta\Delta} = \sqrt{3}U_{\phi\Delta}$, | $U_{\Delta Y} = U_{\phi Y}$. |
| 3. $U_{\Delta\Delta} = \sqrt{3}U_{\Delta Y}$, | $U_{\Delta Y} = \sqrt{3}U_{\phi\Delta}$. |

22. Каковы соотношения фазных и линейных значений токов в трехфазных трансформаторах?

Ответ

- | | |
|--|---|
| 1. $I_{\Delta\Delta} = \sqrt{3}I_{\phi\Delta}$, | $I_{\Delta Y} = I_{\phi Y}$. |
| 2. $I_{\Delta\Delta} = I_{\phi\Delta}$, | $I_{\Delta Y} = \sqrt{3}I_{\phi Y}$. |
| 3. $I_{\Delta\Delta} = \sqrt{3}I_{\Delta Y}$, | $I_{\Delta Y} = \sqrt{3}I_{\phi\Delta}$. |

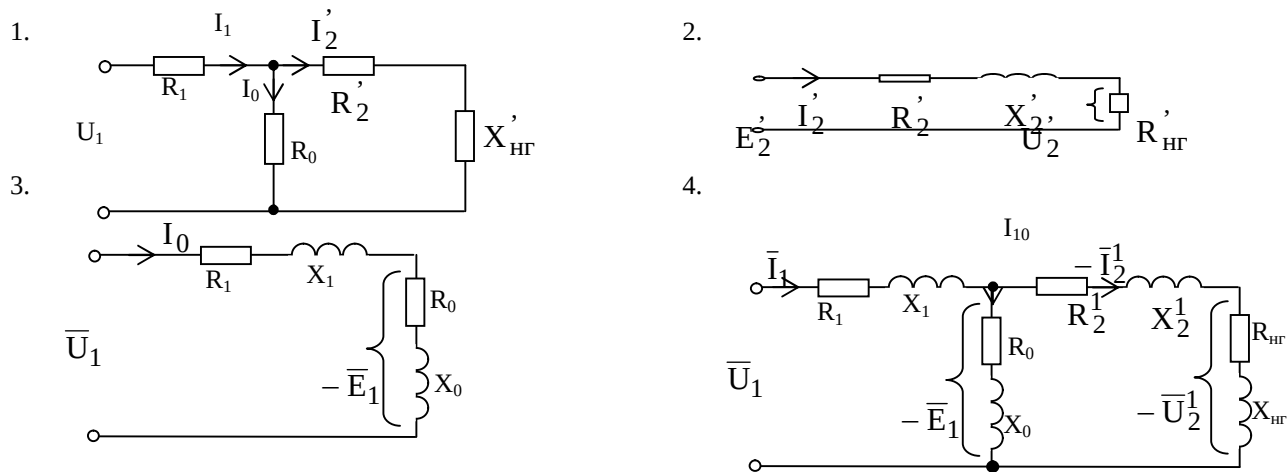
23. Что такое «Напряжение короткого замыкания трансформатора»?

Ответ

1. Это первичное напряжение, при котором короткое замыкание в цепи вторичной обмотки произошло.
2. Это напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора, при котором в цепи вторичной обмотки произошло короткое замыкание.
3. Это напряжение на зажимах первичной обмотки, при котором ток в цепи первичной обмотки равен номинальному, когда вторичная обмотка замкнута накоротко.
4. Это напряжение на зажимах первичной обмотки, при котором ток в цепи вторичной обмотки примерно в 25-30 раз превышает значение номинального тока.

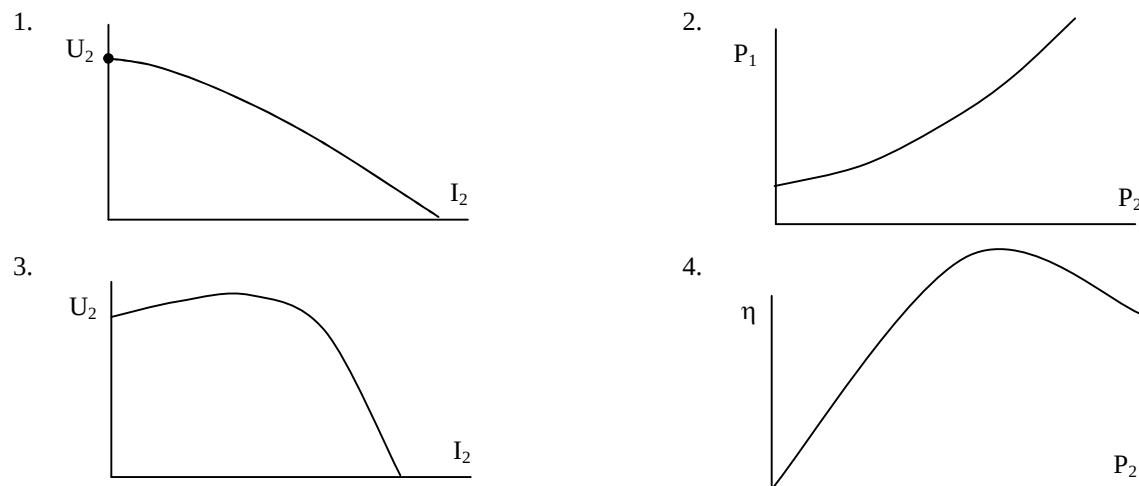
24. Покажите схему замещения приведенного трансформатора.

Ответ



25. Покажите внешнюю характеристику трансформатора при активно-емкостной нагрузке.

Ответ



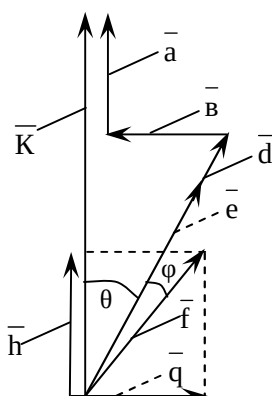
26. Что произойдет, если при включении на параллельную работу у одного из трансформаторов напряжение короткого замыкания $u_k\%$ меньше, чем у другого?

Ответ

1. В режиме без нагрузки и под нагрузкой по цепям обмоток пойдут уравнивающие токи.
2. В режиме без нагрузки уравнивающих токов не будет, а под нагрузкой трансформатор, у которого u_k больше, будет перегружен.
3. В режиме без нагрузки уравнивающих токов не будет, а под нагрузкой трансформатор, у которого u_k меньше, будет перегружен.
4. Нагрузка будет распространяться пропорционально значениям напряжения короткого замыкания.

Тесты по разделу «Синхронные генераторы»

1. Элементы векторной диаграммы синхронного генератора правильно указаны в ответе:



Ответ

1. $\vec{v} = j\dot{I}dX_d$; $\vec{e} = \dot{U}$; $\vec{f} = \dot{I}$.
2. $\vec{d} = j\dot{I}X_\delta$; $\vec{h} = \dot{I}q$; $\vec{e} = \dot{U}$.
3. $\vec{K} = \dot{E}_0$; $\vec{v} = j\dot{I}_qX_q$; $\vec{h} = \dot{I}_q$.
4. $\vec{d} = \dot{I}R_a$; $\vec{f} = \dot{I}q$; $\vec{K} = \dot{E}_0$.

2. Для увеличения нагрузки одиночного синхронного генератора необходимо выполнить любое из действий?

Ответ

- а) увеличить сопротивление в цепи якоря;
- б) уменьшить сопротивление в цепи якоря;
- в) увеличить ток возбуждения;
- г) уменьшить ток возбуждения;
- д) увеличить момент первичного двигателя?

1) б, в, д.

2) а, в, д.

3) б, г, д.

4) а, г, д.

3. Чему равна активная мощность трехфазного синхронного генератора?

Ответ

1. $P = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi$.
2. $P = \sqrt{3} U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi$.
3. $P = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi$.
4. $P = 3 U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi$.

4. Как действует реакция якоря синхронного генератора при индуктивной нагрузке?

Ответ

1. Намагничивает машину.
2. Искажает форму поля, не изменяя величины магнитного потока.
3. Уменьшает величину тока короткого замыкания.
4. Размагничивает машину.

5. Как изменятся показания вольтметра, амперметра и ваттметра синхронного генератора, работающего на активную нагрузку, если увеличить ток возбуждения?

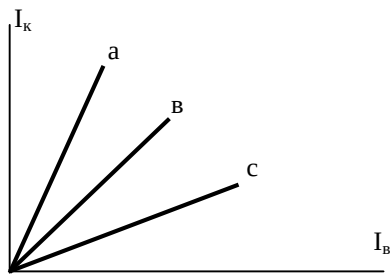
Ответ

1. U - возрастет, I_a - уменьшится, P - не изменится.
2. U - возрастет, I_a - возрастет, P - не изменится.

3. U - уменьшится, I_a - возрастет, P – уменьшится.
 4. U - возрастет, I_a - возрастет, P – возрастет.

6. На рисунке представлены характеристики короткого замыкания одного и того же синхронного генератора. Какая из них соответствует трехфазному короткому замыканию?

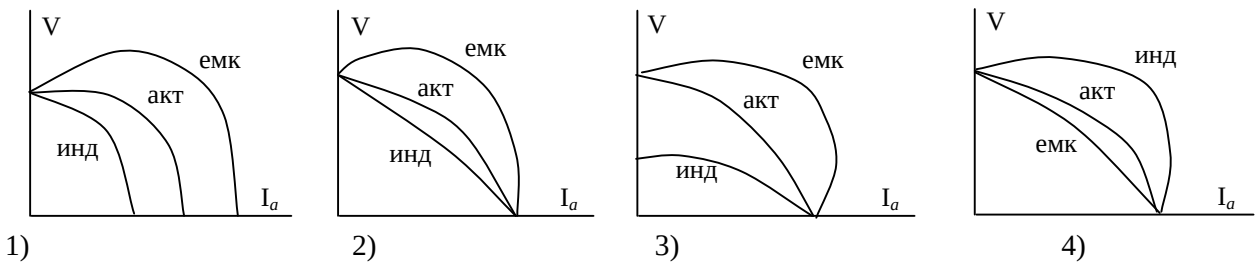
Ответ



- 1) характеристика а;
 2) характеристика в;
 3) характеристика с.

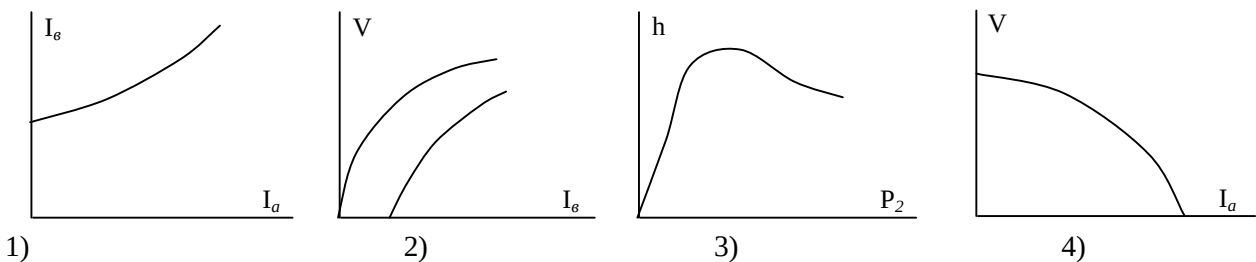
7. Как выглядят внешние характеристики синхронного генератора при различных типах нагрузки?

Ответ



8. На каком рисунке показана внешняя характеристика синхронного генератора?

Ответ



9. От чего зависит коэффициент мощности автономного синхронного генератора?

Ответ

1. От величины тока возбуждения I_g .
2. От соотношения активного R_a и индуктивного X_d сопротивлений обмотки статора.
3. От величины I_g и от соотношения R_a и X_d .
4. От характера нагрузки.

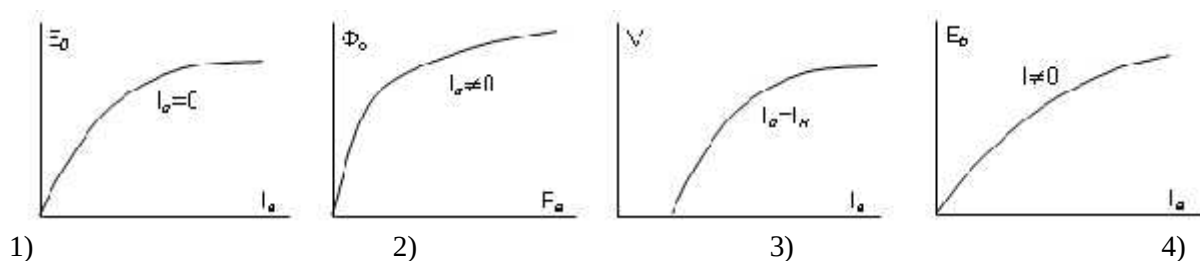
10. Какие причины вызывают изменение напряжения синхронного генератора при увеличении нагрузки?

Ответ

1. Падение напряжения в сопротивлениях обмотки статора и нагрузки.
2. Реакция якоря и падение напряжения в сопротивлениях X_c ; R_a .
3. Реакция якоря, падение напряжения в сопротивлениях статора и нагрузки.
4. Реакция якоря.

11. Показать характеристику холостого хода.

Ответ

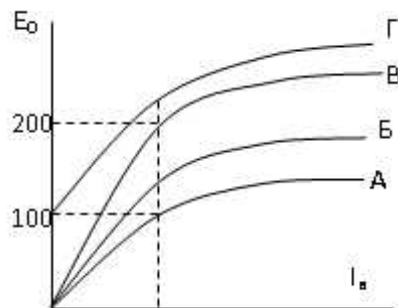


12. Как изменится характеристика холостого хода синхронного генератора по сравнению с видом А, если ее снимать при скорости, увеличенной вдвое?

Ответ

Характеристика холостого хода будет иметь вид:

1. Г. 2. В. 3. Б.



13. От каких величин зависит частота тока синхронного генератора?

Ответ

1. $f = \frac{n}{60}$.
2. $f = \frac{60n}{p}$.
3. $f = \frac{2\pi n}{p}$.
4. $f = \frac{pn}{60}$.

4. Синхронный генератор называется синхронным потому, что у него:

Ответ

1. Синхронно вращаются ротор и поле статора.
2. Синхронно вращаются поле ротора и поле статора.
3. Поле статора вращается с синхронной скоростью.
4. Перед включением в сеть нужно осуществить синхронизацию.

15. Определить электромагнитную мощность трехфазного синхронного генератора, работающего параллельно с мощной сетью при следующих данных: $E_G = 250 \text{ В}$; $U_G = U_c = 200 \text{ В}$; $X_c = 0,003 \text{ Ом}$; $\varphi = 30^\circ$

Ответ

1. 2000 кВт.
2. 2500 кВт.
3. 3000 кВт.
4. 4000 кВт.

16. Формула электромагнитной мощности синхронного генератора при параллельной работе с мощной сетью имеет вид:

Ответ

1. $P = \frac{mE^2}{X_c} \sin \Theta$.
2. $P = \frac{mEU}{X_c} \sin 2\Theta$.
3. $P = \frac{mU^2}{1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)$.
4. $P = \frac{mEU}{X_c} \sin \Theta$.

17. Как правильно нагрузить синхронный генератор, работающий параллельно с мощной сетью?

Ответ

1. Увеличить $M_{вр}$ первичного двигателя, уменьшить I_b .
2. Увеличить $M_{вр}$ первичного двигателя, увеличить I_b .
3. Включить $R_{доб}$ в цепь якоря.
4. Уменьшить $M_{вр}$ первичного двигателя, увеличить I_b .

18. Принцип саморегулирования синхронного генератора при параллельной с мощной сетью состоит в том, что автоматически поддерживается:

Ответ

1. $\cos \varphi = \text{const}$ при $I_b = \text{var}$
2. $P = \text{const}$ при $I_b = \text{var}$
3. $I_a = \text{const}$ при $P_a = \text{var}$
4. $n_c = \text{const}$ при $P_a = \text{var}$

19. Синхронный генератор работает параллельно с мощной сетью, имеет нагрузку и $\cos \varphi = 1$. Что произойдет, если $M_{вр}$ первичного двигателя уменьшить?

Ответ

1. P – уменьшится при $I_a = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$.
2. P – уменьшится при $I_a = \text{const}$, $\cos \varphi$ - уменьшится.
3. P – уменьшится при I_a уменьшится, $\cos \varphi$ - уменьшится.
4. P – уменьшится при I_a возрастает, $\cos \varphi$ - уменьшится.

20. Синхронный генератор работает параллельно с мощной сетью, имеет нагрузку и $\cos \varphi = 1$. Что произойдет, если $M_{вр}$ первичного двигателя увеличить?

Ответ

1. $P \uparrow$; $I_a \uparrow$; $\cos \varphi \downarrow$ при $\varphi < 0$.
2. $P \uparrow$; $I_a \uparrow$; $\cos \varphi \downarrow$ при $\varphi > 0$.

3. $P \uparrow$; $I_a \downarrow$; $\cos\varphi \downarrow$ при $\varphi < 0$.
 4. $P \uparrow$; $I_a \downarrow$; $\cos\varphi \downarrow$ при $\varphi > 0$.

21. Синхронный генератор работает параллельно с мощной сетью, имеет нагрузку, перевозбужден. Что произойдет, если ток возбуждения синхронного генератора увеличить?

Ответ

1. $I_a \uparrow$; $P_a \downarrow$; $\cos\varphi = \text{const}$.
 2. $I_a \uparrow$; $P_a = \text{const}$; $\cos\varphi \downarrow$.
 3. $I_a \downarrow$; $P_a = \text{const}$; $\cos\varphi \uparrow$.
 4. $I_a \downarrow$; $P_a \uparrow$; $\cos\varphi = \text{const}$.

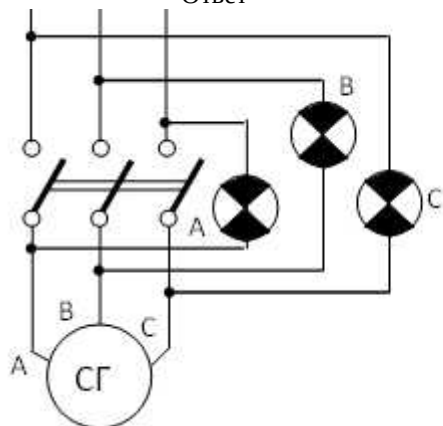
22. Синхронный генератор работает параллельно с мощной сетью, имеет нагрузку, недовозбужден. Что произойдет, если ток возбуждения синхронного генератора увеличить?

Ответ

1. $I_a \uparrow$; $P_a = \text{const}$; $\cos\varphi \downarrow$.
 2. $I_a \downarrow$; $P_a \uparrow$; $\cos\varphi \uparrow$.
 3. $I_a \uparrow$; $P_a \uparrow$; $\cos\varphi \downarrow$.
 4. $I_a \downarrow$; $P_a = \text{const}$; $\cos\varphi \uparrow$.

23. Включить синхронный генератор на параллельную работу нужно в момент, когда погаснут:

Ответ



1. Все лампы.
 2. Лампа А.
 3. Лампа В.
 4. Лампа С.

24. Какие измерительные приборы обязательно нужны для проверки условий включения синхронного генератора на параллельную работу?

Ответ

1. Вольтметр, синхроскоп.
 2. Вольтметр, частотомер.
 3. Вольтметр, частотомер, синхроскоп.
 4. Вольтметр, фазометр, частотомер.

25. Для включения синхронного генератора на параллельную работу необходимо: а) $V_{\Gamma} = V_{\text{сети}}$, б) $E_{\Gamma} = E_{\text{сети}}$, в) $\ddot{a}_{\Gamma} = \ddot{a}_{\text{сети}}$, г) одинаковое чередование фаз, д) совпадение номеров фаз, е) V_{Γ} - в противофазе с $V_{\text{сети}}$, ж) E_{Γ} - в противофазе с $E_{\text{сети}}$?

Ответ

1. а, в, д, е.
2. а, в, г, е.
3. б, в, д, ж.
4. б, в, г, ж.

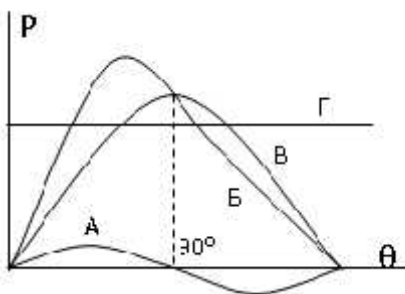
26. Как перевести синхронную машину из генераторного режима в двигательный при параллельной работе с мощной сетью?

Ответ

1. Увеличить ток возбуждения синхронного генератора.
2. Уменьшить вращающий момент первичного двигателя.
3. Переключить концы двух фаз обмотки статора.
4. Уменьшить ток возбуждения синхронного генератора.

27. Показать угловую характеристику явнополюсного синхронного генератора из числа приведенных.

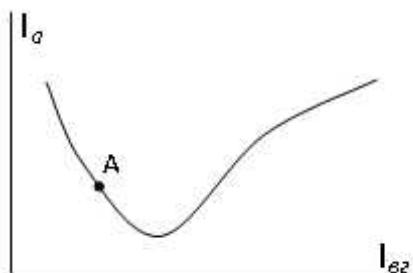
Ответ



1. А.
2. Г.
3. С.
4. В.

28. Какой режим характерен для СГ, работающего в точке «А» V-образной характеристики?

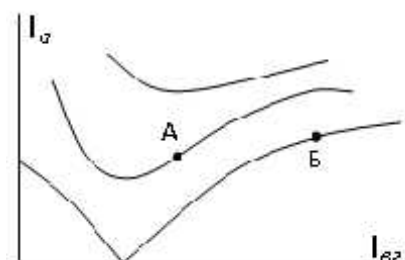
Ответ



1. $\varphi > 0$; $\rho = 0$.
2. $\varphi < 0$; $\rho \neq 0$.
3. $\varphi = 0$; $\rho \neq 0$.
4. $\varphi > 0$; $\rho \neq 0$.

29. Для перевода режима синхронного генератора из точки Б в точку А не обходимо:

Ответ



1. Увеличить мощности первичного двигателя $P_{\text{дв}}$.
2. Уменьшить $I_{\phi 2}$.
3. Увеличить $P_{\text{дв}}$ и уменьшить $I_{\phi 2}$.
4. Уменьшить $P_{\text{дв}}$ и $I_{\phi 2}$.

Тесты по разделу «Асинхронные двигатели»

1. Почему асинхронный двигатель (АД) называют асинхронным?

Ответ

1. Скорость ротора n не равна скорости поля статора n_1 .
2. Скорость поля ротора n_2 равна скорости поля статора n_1 .
3. $n \neq 0$.
4. $n_2 \neq 0$.

2. Чему равны скорость ротора n и скольжение s асинхронной машины в режиме двигателя?

Ответ

1. $n > 0$; $-\infty < S < 0$.
2. $n < 0$; $+\infty > S > 1$.
3. $n > 0$; $0 < S < 1$.
4. $n = 0$; $S = 1$.

3. В каком режиме работает асинхронная машина, если скорость ротора $n < 0$, а скольжение $1 < S < \infty$?

Ответ

1. Трансформатора.
2. Асинхронного генератора.
3. Электромагнитного тормоза.
4. Асинхронного двигателя.

4. Чем характерна работа асинхронной машины в режиме генератора?

Ответ

1. $n > 0$; $1 > S > 0$.
2. $n > 0$; $-\infty < S < 0$.
3. $n < 0$; $1 < S < \infty$.
4. $n = n_1$; $S = 0$.

5. Покажите формулу мощности трехфазного асинхронного электродвигателя.

Ответ

1. $P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi_{\text{л}}$.
2. $P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi_{\text{л}}$.
3. $P = 3U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi_{\text{л}}$.
4. $P = \sqrt{3}U_{\text{ф}}I_{\text{ф}} \cos \varphi_{\text{ф}}$.

6. Минимальное сопротивление изоляции электрических машин, находящихся в эксплуатации?

Ответ

1. 2 Мом.
2. 100 кОм.
3. 500 кОм.
4. 0,2 Мом.

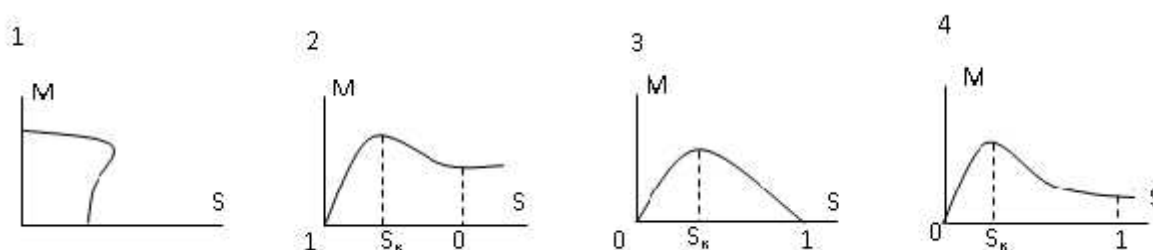
7. Как увеличить нагрузку асинхронного двигателя?

Ответ

1. Увеличить момент сопротивления на валу.
2. Увеличить вращающий момент первичного двигателя.
3. Увеличить ток возбуждения.
4. Уменьшить активное сопротивление цепи статора.

8. Как выглядит зависимость $M = f(S)$ нормального асинхронного двигателя?

Ответ



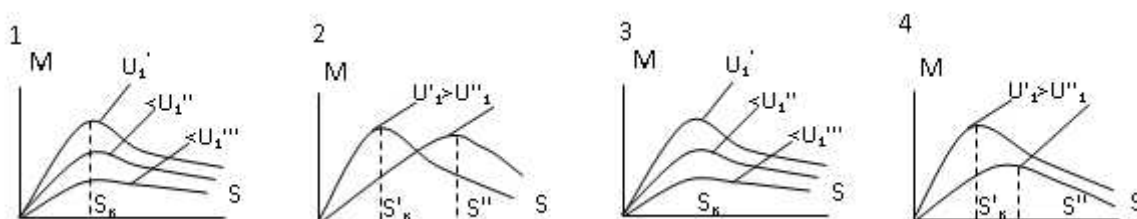
9. Почему у нормальных короткозамкнутых асинхронных двигателей пусковой момент меньше максимального?

Ответ

1. При большом скольжении резко возрастает индуктивное сопротивление.
2. При большом скольжении уменьшается активное сопротивление обмотки ротора.
3. Возрастает э.д.с. обмотки ротора.
4. Потому, что возрастает ток ротора.

10. Как зависит максимальный момент асинхронного двигателя от величины U_1 ?

Ответ



11. Как режим асинхронного двигателя, если уменьшить f_1 при $U_1 = \text{const}$?

Ответ

- | | | |
|------------------------------|--------------------|-------------------------|
| 1. $\Phi_m \uparrow$; | $I_o \uparrow$; | $n \downarrow$. |
| 2. $\Phi_m = \text{const}$; | $I_o \downarrow$; | $n = \text{const}$. |
| 3. $\Phi_m \downarrow$; | $I_o \uparrow$; | $n \downarrow$. |
| 4. $\Phi_m = \text{const}$; | $I_o \downarrow$; | $n \neq \text{const}$. |

12. Чему равна кратность пускового тока короткозамкнутого асинхронного двигателя при прямом пуске?

Ответ

1. $(2 \div 3) I_n$.

2. $(4 \div 7) I_n$.
3. $(8 \div 12) I_n$.
4. $(15 \div 20) I_n$.

13. Почему у нормального асинхронного двигателя пусковой ток значительно больше номинального?

Ответ

1. При $S = 1$ резко возрастает э.д.с. обмотки ротора E_2 .
2. При $S = 1$ резко уменьшаются сопротивления обмотки ротора R_2, X_2' .
3. При $S = 1$ резко возрастает э.д.с. обмотки статора E_1 .
4. При $S = 1$ э.д.с. $E_1 = 0$ и $(U_1 - E_1)$ возрастает.

14. Чему равно число полюсов $2p_2$ короткозамкнутого ротора с обмоткой типа «беличья клетка»?

Ответ

1. Всегда равно $2p_2 = 4$.
2. Равно числу пазов z данного ротора.
3. Устанавливается при изготовлении и не зависит от $2p_1$ обмотки статора.
4. Определяется числом полюсов обмотки статора, в котором данный ротор установлен.

15. Что такое скольжение асинхронного двигателя?

Ответ

1. $s = n_1 - n$.
2. $s = \frac{n_1 - n}{n_1}$.
3. $s = \frac{n_1 + n}{2n_1}$.
4. $s = \frac{n_1 - n}{n}$.

16. Чему равна частота в обмотке ротора при номинальных значениях скорости и скольжения?

Ответ

1. $f_2 = f_1 s_n$.
2. $f_2 = f_1 (1 - s_n)$.
3. $f_2 = f_1$.
4. $f_2 = f_1 (1 + s)$.

17. Какие моменты сопротивления преодолевает асинхронный двигатель в установившемся режиме при номинальной нагрузке?

Ответ

1. Момент сил трения в подшипниках, динамический момент $M_{дин}$, полезный момент $M_{пол}$.
2. $M_{пол} + M_o$ (момент холостого хода).
3. $M_o + M_{пол} + M_{дин}$.
4. $M_{пол} + M_{дин}$.

18. Чем отличается трехфазная обмотка статора асинхронного двигателя с удлинненным шагом по сравнению с обмоткой диаметрального шага?

Ответ

1. E_1 больше, расход меди меньше, синусоидальность м.д.с. лучше.
2. $E_1 = \text{const}$, расход меди меньше, синусоидальность м.д.с. лучше.
3. E_1 меньше, расход меди больше, синусоидальность м.д.с. лучше.
4. E_1 больше, расход меди больше, синусоидальность м.д.с. лучше.

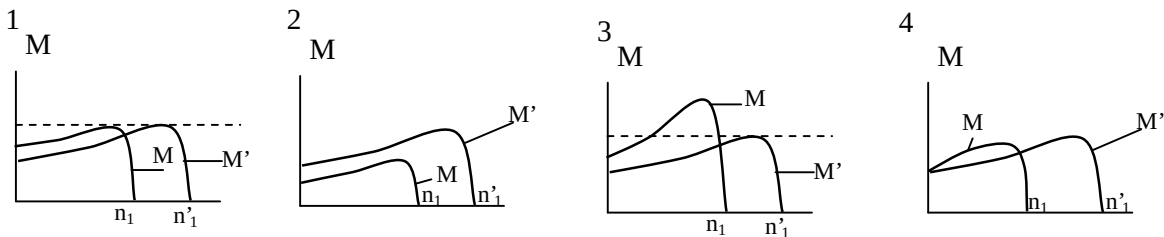
19. Как изменится режим асинхронного двигателя, если увеличить воздушный зазор?

Ответ

1. $\Phi_m = \text{const}$; $I_o \uparrow$; $n = \text{const.}$
2. $\Phi_m \uparrow$; $I_o = \text{const}$; $n = \text{const.}$
3. $\Phi_m = \text{const}$; $I_o = \text{const}$; $n \downarrow$.
4. $\Phi_m \uparrow$; $I_o \uparrow$; $n \uparrow$.

20. Как изменится характеристика $M=f(n)$ асинхронного двигателя, если при $U_1 = \text{const}$ увеличить частоту в два раза ($f'_1 = 2f_1$)?

Ответ



21. Показать формулу вращающего момента асинхронного двигателя?

Ответ

$$1. M = \frac{pm_2 U_1^2 \frac{R'_2}{S}}{2\pi f_1 \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{S} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]}.$$

$$2. M = \frac{pm_1 U_1^2 \frac{R'_2}{S}}{2\pi f_1 \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{S} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]}.$$

$$3. M = \frac{I_1^2 R_2}{2\pi f_1}.$$

$$4. M = I_a \Phi_m \cdot n.$$

22. В чем преимущества пуска АД переключением «звезда-треугольник» по сравнению с прямым пуском?

Ответ

1. Пусковой линейный ток больше в три раза.
2. Пусковой линейный ток меньше в $\sqrt{3}$ раз.
3. Пусковой момент меньше в три раза.
4. Пусковой линейный ток меньше в три раза.

23. Физическая сущность сокращения шага β и коэффициента сокращения шага K_β обмотки статора асинхронного двигателя?

Ответ

1. $\beta = y + \tau$; $K_\beta = \sin \beta 90^\circ$.
2. $\beta = \frac{y}{\tau}$; $K_\beta = \frac{E_y}{E_\tau}$.
3. $\beta = \frac{v-1}{v}$; $K_\beta = \sin \beta v 90^\circ$.
4. $\beta = \frac{\tau}{y}$; $K_\beta = \frac{E_\tau - E_y}{E_\tau}$.

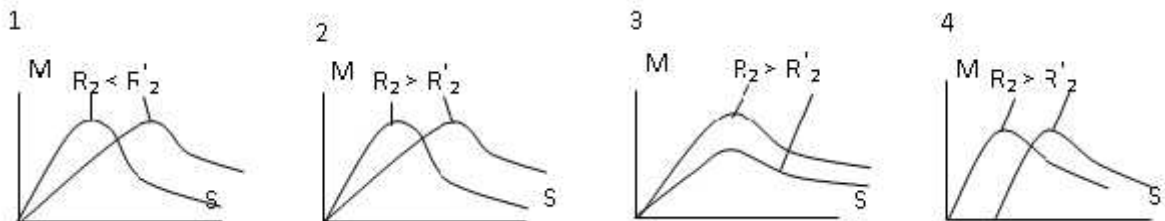
24. В чем состоит сущность саморегулирования асинхронного двигателя?

Ответ

1. $M_c \uparrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow E_1 \downarrow \rightarrow (U - E_1) \uparrow \rightarrow I \uparrow \rightarrow M_{вр} \uparrow$.
2. $I_{вт} \uparrow \rightarrow \Phi \uparrow \rightarrow E \uparrow \rightarrow U \uparrow \rightarrow I \uparrow \rightarrow P \uparrow \rightarrow M_T \uparrow$.
3. $M_c \uparrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow S \uparrow \rightarrow E_2 \uparrow \rightarrow I_2 \uparrow \rightarrow M_{вр} \uparrow$.
4. $M_c \uparrow \rightarrow n \uparrow \rightarrow \Theta \uparrow \rightarrow \Delta E \uparrow \rightarrow I_q \uparrow \rightarrow P \uparrow \rightarrow M_T \uparrow$.

25. Как зависит максимальный момент асинхронного двигателя от величины сопротивления ротора?

Ответ



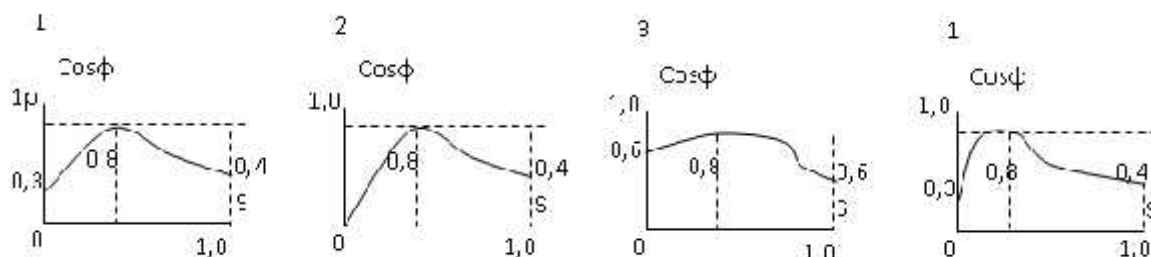
26. В чем отличие реостатного пуска (пр) асинхронного двигателя с фазным ротором от прямого пуска (ппр)?

Ответ

1. $I_{пр} < I_{ппр}$; $M_{пр} = M_{ппр}$.
2. $I_{пр} = I_{ппр}$; $M_{пр} > M_{ппр}$.
3. $I_{пр} > I_{ппр}$; $M_{пр} > M_{ппр}$.
4. $I_{пр} < I_{ппр}$; $M_{пр} > M_{ппр}$.

27. Как выглядит зависимость $\cos \varphi = f(S)$ нормального асинхронного двигателя?

Ответ



28. Почему возрастает пусковой момент асинхронного двигателя при включении реостата в цепь ротора?

Ответ

1. За счет увеличения I_1 и I_2 .
2. За счет увеличения активной составляющей тока I_2 .
3. За счет увеличения индуктивной составляющей тока I_2 .
4. За счет уменьшения пускового тока.

Тесты по разделу «Машины постоянного тока»

1. Что такое электрический генератор?

Ответ

1. Машина, преобразующая тепловую энергию в механическую.
2. Машина, преобразующая механическую энергию в электрическую.
3. Машина, преобразующая химическую энергию в электрическую.
4. Машина, преобразующая световую энергию в электрическую.

2. На каких законах основан принцип действия машин постоянного тока?

Ответ

1. На законе полного тока, законе Джоуля-Ленца.
2. На законе всемирного тяготения, на 1-ом законе Ньютона.
3. На законе электромагнитных сил и законе электромагнитной индукции.
4. На законах Кирхгофа, Ома.

3. Как выразить аналитически закон электромагнитной индукции?

Ответ

1. $E = U + I_a R_a$.
2. $e = B \cdot \ell \cdot U \sin(\vec{B} \wedge \vec{U})$; $e = -w \frac{d\Phi}{dt}$.
3. $e = B \cdot \ell \cdot U \cos(\vec{B} \wedge \vec{U})$.
4. $B = \frac{\Phi}{S}$.

4. Как выразить аналитически закон электромагнитных сил?

Ответ

1. $F = ma$.

$$2. F = B \cdot \ell \cdot I \cdot \sin(\vec{B} \wedge \vec{I}).$$

$$3. f = \vec{B} \cdot \ell \cdot i.$$

$$4. f = B \cdot \ell \cdot i \cos(\vec{B} \wedge \vec{U}).$$

5. Каковы условия, определяющие работу электрической машины в режиме генератора?

Ответ

1. Ток совпадает по направлению с э.д.с.
2. Электромагнитный момент является вращающим моментом.
3. $U_c > E_r$.
4. Ток течет в якоре навстречу э.д.с.

6. Какова основная роль коллектора в генераторе?

Ответ

1. Для изменения направления э.д.с. в секции обмотки якоря.
2. Для соединения вращающихся частей с неподвижными.
3. Переменный ток секций преобразуется в постоянный внешней цепи.
4. Для подачи напряжения на обмотку возбуждения.

7. Какова роль коллектора в двигателе? Какой ответ наиболее верный и полный?

Ответ

1. Для преобразования постоянного тока сети в переменный.
2. Переключает направление тока в секции с целью поддержания постоянства направления действия вращающего момента.
3. Для выпрямления э.д.с. и тока.
4. Для электрического соединения неподвижных частей с вращающимися.

8. Какова роль главных полюсов в электрической машине? Показать наиболее полный ответ.

Ответ

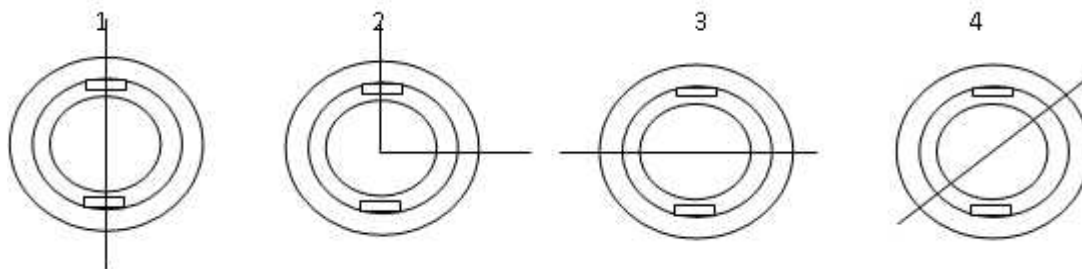
1. Для компенсации реакции якоря.
2. Для поддержания постоянства магнитного потока.
3. Для создания основного магнитного потока.
4. Для удержания на сердечниках обмоток возбуждения.

9. Какова норма сопротивления изоляции машины, находящейся в эксплуатации?

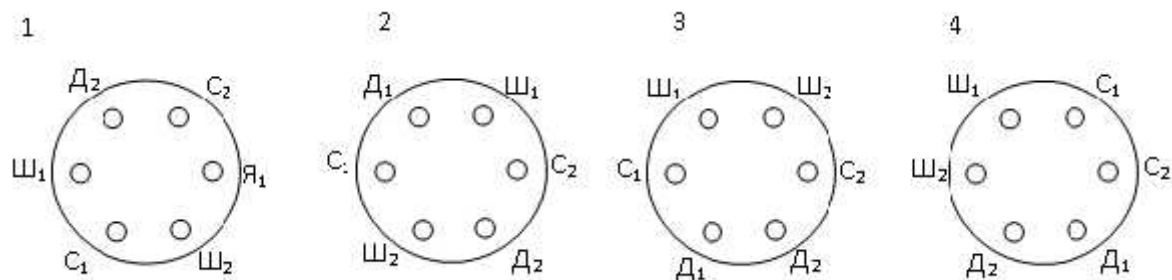
Ответ

1. 1 МОм
2. 0,1 МОм
3. 0,03 МОм
4. 0,5 МОм

10. Где проходит геометрическая нейтраль?



11. Как маркируются зажимы клеммной платы?



12. В каком соотношении находятся величины воздушных зазоров под главными и добавочными полюсами?

Ответ

1. Под главными зазор больше, чем под добавочными.
2. Под добавочными больше, чем под главными.
3. Зазоры одинаковые под всеми полюсами.
4. Одинаковы под одноименными полюсами.

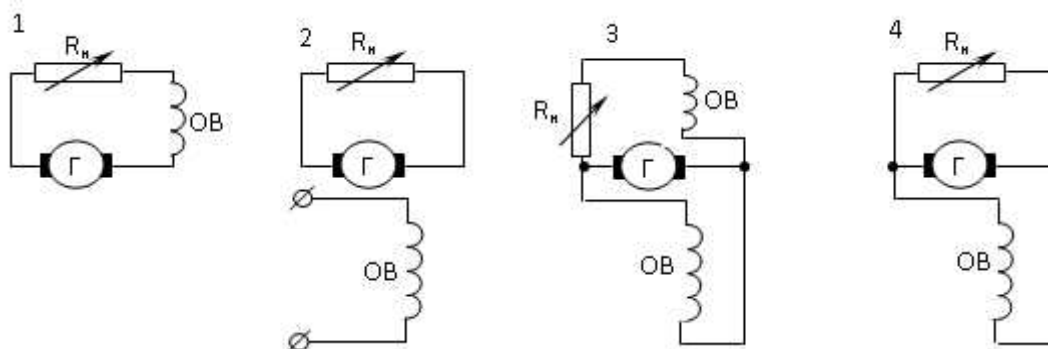
13. Для чего сердечники якорей выполняются шихтованными?

Ответ

1. Для уменьшения потерь на гистерезис.
2. Для облегчения технологии производства.
3. Для снижения потерь в переходных процессах.
4. для уменьшения потерь на вихревые токи.

14. Показать схему генератора независимого возбуждения.

Ответ



15. Каким образом принято отражать рабочие свойства электрических машин?

Ответ

1. Величиной допустимой мощности.
2. Величиной допустимого тока нагрузки.
3. Величиной максимального перегрева.
4. Характеристиками машины.

16. Каково направление тока и ЭДС в якоре генератора?

Ответ

1. Направление тока и э.д.с. всегда согласно.
2. Направление тока и э.д.с. всегда встречно.
3. Направление меняется во время работы.
4. Направление зависит от характера нагрузки.

17. Каково примерно соотношение величины тока в якоре и обмотке возбуждения?

Ответ

1. $I_a = 100\text{A}$. $i_a = 50\text{A}$.
2. $I_a = 100\text{A}$. $i_a = 3\text{A}$.
3. $I_a = 100\text{A}$. $i_a = 15\text{A}$.
4. $I_a = 100\text{A}$. $i_a = 0,03\text{A}$.

18. Как проверить согласованность включения обмоток возбуждения двигателя смешанного возбуждения?

Ответ

1. Шунтированием серийной обмотки ненагруженного электродвигателя.
2. Шунтированием шунтовой обмотки.
3. Методом пуска электродвигателя при 2-х включенных обмотках и затем – при одной серийной («метод толчка»).
4. Методом максимального напряжения.

19. Как нагрузить генератор?

Ответ

1. Увеличить сопротивление нагрузки.
2. Уменьшить частоту вращения.
3. Уменьшить ток обмотки возбуждения.
4. Уменьшить сопротивление нагрузки.

20. Как проверить величину нагрузки генератора?

Ответ

1. По вольтметру на зажимах якоря генератора.
2. По амперметру в цепи обмотки возбуждения.
3. По напряжению на регулировочном сопротивлении цепи обмотки возбуждения.
4. По амперметру в цепи якоря генератора.

21. Каково чередование главных и добавочных полюсов в генераторе?

Ответ

1. За N главным – N добавочный по напряжению вращения.

2. За N главным – N главный по напряжению вращения.
3. За S главным – S добавочный.
4. За S добавочным – N главный.

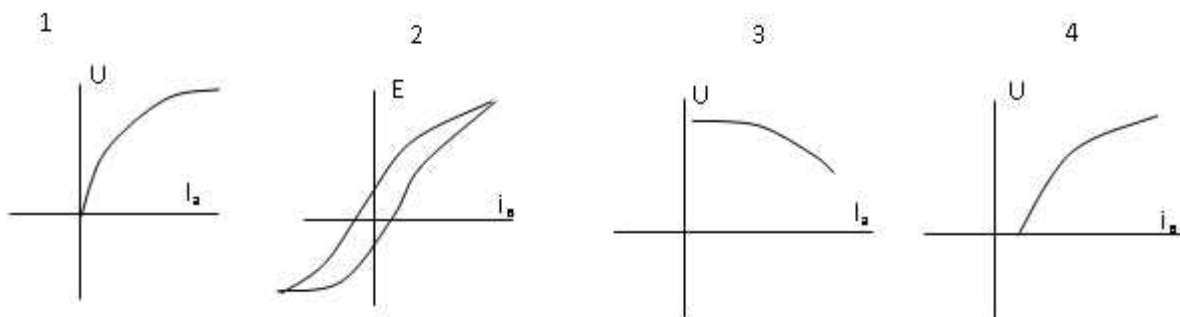
22. Уравнение равновесия э.д.с. в генераторе?

Ответ

1. $U = E + I_a R_a$.
2. $E = U - I_a R_a$.
3. $E = U + I_a R_a$.
4. $U = I_a R_a - E$.

23. Условия для снятия характеристики холостого хода генератора, ее вид?

Ответ



$n = \text{Const};$

$I_a = \text{var};$

$n = \text{Const};$

$I_a = 0;$

$n = \text{Const};$

$i_B = \text{Const};$

$n = \text{Const};$

$I_a \neq 0.$

24. Что выражает и при каких условиях снимается нагрузочная характеристика генератора?

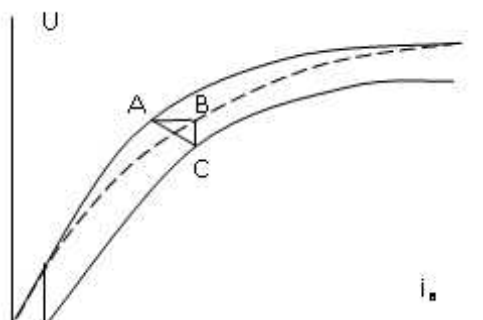
Ответ

1. $U = f(i_B); \quad n = \text{const}; \quad I_a = \text{const}.$
2. $E = f(i_B); \quad n = \text{const}; \quad I_a = \text{const}.$
3. $U = f(I_a); \quad n = \text{const}; \quad r_B = \text{const}.$
4. $E = f(I_a); \quad n = \text{const}; \quad i_B = \text{const}.$

5. Что выражают стороны характеристического треугольника ABC?

Ответ

1. $AB - I_a R_a; \quad BC - \text{м.д.с.РЯ}.$
2. $AC - I_a R_a; \quad AB - \text{м.д.с.РЯ}.$
3. $AC - \text{м.д.с.РЯ}; \quad BC - I_a R_a.$
4. $BC - I_a R_a; \quad AB - \text{м.д.с.РЯ}.$



26. Как влияет реакция якоря на основной магнитный поток при различном насыщении магнитной цепи?

Ответ

1. При ненасыщенной и перенасыщенной магнитной цепи искажает форму распределения индукции, не меняя величины потока.
2. При ненасыщенной цепи резко меняет величину магнитного потока.
3. При перенасыщенной магнитной цепи резко меняет величину магнитного потока.
4. На магнитный поток влияния не оказывает.

27. Что выражает и при каких условиях снимается внешняя характеристика?

Ответ

1. $U = f(i_B)$; $n = \text{const}$; $I_a = \text{const}$.
2. $U = f(I_a)$; $r_B = \text{const}$; $n = \text{const}$.
3. $I_a = f(U)$; $n = \text{const}$; $i_B = \text{const}$.
4. $U = f(n)$; $i_B = \text{const}$; $I_a = \text{const}$.

28. Что выражает и при каких условиях снимается регулировочная характеристика?

Ответ

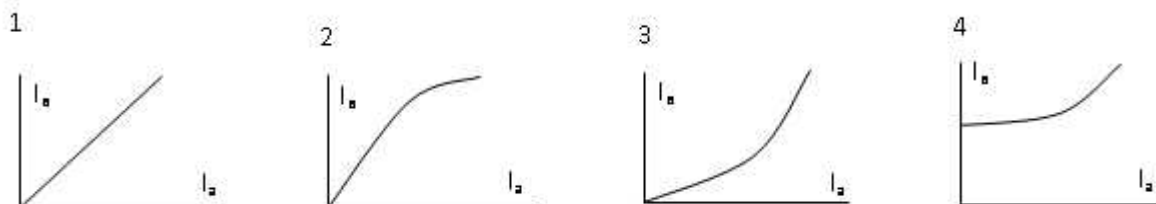
1. $U = f(i_B)$; $n = \text{const}$; $I_a = \text{const}$.
2. $I_a = f(U)$; $n = \text{const}$; $i_B = \text{const}$.
3. $U = f(n)$; $i_B = \text{const}$; $I_a = \text{const}$.
4. $i_B = f(I_a)$; $U = \text{const}$; $n = \text{const}$.

29. Как изменится напряжение на зажимах нагруженного компаундного генератора постоянного тока, если зашунтировать серийную обмотку?

Ответ

1. Уменьшится.
2. Увеличится.
3. Не изменится.
4. Станет равно номинальному.

30. Какой вид имеет регулировочная характеристика генератора постоянного тока?



Ответ

31. Как действует продольная реакция якоря в генераторе при сдвиге щеток по вращению?

Ответ

1. Подмагничивает генератор.
2. Под набегающим краем подмагничивает, под сбегающим размагничивает.
3. Размагничивает машину.
4. Под набегающим краем размагничивает, под сбегающим подмагничивает.

32. Что выражает внешняя характеристика генератора постоянного тока?

Ответ

1. $U = f(I_a)$.
2. $E = f(I_B)$.
3. $I_a = f(n)$.
4. $\Phi = f(I_B)$.

33. При каких условиях снимается регулировочная характеристика генератора постоянного тока?

Ответ

1. $E = \text{const}$; $I_a = \text{const}$.
2. $n = \text{const}$; $U = \text{const}$.
3. $I_a = \text{const}$; $I_B = \text{const}$.
4. $n = \text{const}$; $I_a = \text{const}$.

34. Причины изменения напряжения на зажимах шунтового генератора постоянного тока при изменении нагрузки?

Ответ

1. Падение напряжения $I_a R_a$, действие реакции якоря.
2. Падение напряжения $I_a R_a$, действие реакции якоря, изменение I_B .
3. Падение напряжения $-I_a R_a$, действие реакции якоря, изменение I_B , насыщение магнитной цепи.
4. $I_a R_a$, Р.Я., насыщение магнитной цепи.

35. Условия самовозбуждения генераторов постоянного тока?

Ответ

1. Наличие $\Phi_{\text{ост}}$; согласованность $\Phi_{\text{ост}}$ и $\Phi_{\text{ов}}$; $n = n_H$.
2. Наличие $\Phi_{\text{ост}}$; согласованность $\Phi_{\text{ост}}$ и $\Phi_{\text{ов}}$; $R_B > R_{B \text{ критич}}$.
3. Наличие $\Phi_{\text{ост}}$; встречное направление $\Phi_{\text{ост}}$ и $\Phi_{\text{ов}}$ $n = n_H$.
4. Наличие $\Phi_{\text{ост}}$; согласованность $\Phi_{\text{ост}}$ и $\Phi_{\text{ов}}$; $R_B < R_{B \text{ критич}}$. $n > n_{\text{кр}}$.

36. Как определяется ток нагрузки генератора, работающего параллельно с другими генераторами?

Ответ

1. $I_a = \frac{U}{R_a}$.
2. $I_a = \frac{E_a - U}{R_a}$.

$$3. \quad I_a = \frac{E_a}{R_B}.$$

$$4. \quad I_a = I_{\text{наг}} - I_B.$$

37. В каких квадрантах координатных осей можно снять характеристику холостого хода генератора с самовозбуждением?

Ответ

1. В первом и третьем.
2. В первом и четвертом.
3. В первом.
4. В третьем.

38. Какова величина установившегося тока короткого замыкания шунтового генератора?

Ответ

1. $I_{\text{а.к.з.}} = 2I_{\text{а.н.}}$
2. $I_{\text{а.к.з.}} \gg I_{\text{а.н.}}$
3. $I_{\text{а.к.з.}} \ll I_{\text{а.н.}}$
4. $I_{\text{а.к.з.}} = 5I_{\text{н.}}$

39. Сравните величину установившегося тока короткого замыкания шунтового и противокомпаундного генераторов.

Ответ

1. $I_{\text{к.з. ПКГ}} = I_{\text{к.з. ШГ.}}$
2. $I_{\text{к.з. ПКГ}} < I_{\text{к.з. ШГ.}}$
3. $I_{\text{к.з. ПКГ}} > I_{\text{к.з. ШГ.}}$
4. $I_{\text{к.з. ПКГ}} = 2I_{\text{к.з. ШГ.}}$

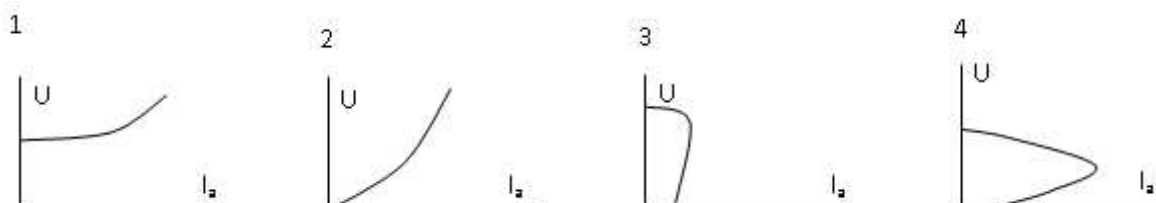
40. Какова роль серийной обмотки в компаундных генераторах постоянного тока?

Ответ

1. Увеличивает напряжение.
2. Уменьшает напряжение.
3. Оставляет напряжение неизменным.
4. Компенсирует падение напряжения в цепи обмотки якоря и размагничивающее действие реакции якоря.

41. Какой вид имеет внешняя характеристика противокомпаундного генератора?

Ответ



42. Какие генераторы могут работать параллельно без уравнильного провода?

Ответ

1. Шунтовой и шунтовой.
2. Шунтовой и серийный.
3. Компаундный и компаундный.
4. Компаундный и противосмпаундный.

43. Какова роль уравнильного провода при параллельной работе генераторов?

Ответ

1. Поддержание $U = \text{const.}$
2. Поддержание $E = \text{const.}$
3. Равномерное распределение нагрузки.
4. Обеспечение устойчивой параллельной работы.

44. Как возбудить шунтовой генератор?

Ответ

1. Изменять сопротивление нагрузки.
2. Снижать частоту вращения.
3. Уменьшить сопротивление в цепи обмотки возбуждения.
4. Увеличить сопротивление в цепи обмотки возбуждения.

45. Каковы условия включения генераторов на постоянную работу?

Ответ

1. Равенство токов нагрузки.
2. Равенство скоростей и мощностей.
3. Одинаковая полярность, равенство э.д.с. и напряжение сети.
4. Равенство токов в обмотках возбуждения.

46. В каком режиме работают шунтовые генераторы при включении их в параллель и несоблюдении полярности?

Ответ

1. В двигательном режиме.
2. В режиме холостого хода.
3. В режиме короткого замыкания.
4. В режиме торможения.

47. Для чего необходима параллельная работа генераторов постоянного тока? Каков ответ наиболее полный и точный?

Ответ

1. Для увеличения срока службы потребителей.
2. Для удобства управления генераторами.
3. Для увеличения срока службы генераторов.
4. Для повышения надежности системы с повышением экономичности.

48. Как проверить выполнение условий включения генераторов в параллель? Каков ответ неверен?

Ответ

1. Вольтметром магнитоэлектрической системы на шинах станции.
2. Амперметром, магнитоэлектрической системы в цепи нагрузки.
3. По амперметру электромагнитной системы в цепи нагрузки.

49. Как правильно перевести нагрузку с одного генератора на другой?

Ответ

1. Менять величину тока возбуждения одного генератора.
2. Менять частоту вращения одного генератора.
3. Одновременно увеличивать ток возбуждения нагружаемого генератора и уменьшить ток возбуждения разгружаемого генератора.
4. Увеличить ток возбуждения обоих генераторов.

50. Когда генератор может перейти в режим двигателя?

Ответ

1. Если генератор перегружен.
2. При значительном увеличении тока в обмотке возбуждения.
3. Если увеличить скорость первичного двигателя.
4. Если э.д.с. генератора стала меньше напряжения сети.

51. Как нагрузить генератор, включенный в параллель?

Ответ

1. Уменьшить его скорость.
2. Уменьшить его ток возбуждения.
3. Уменьшить сопротивление нагрузки.
4. Увеличить ток возбуждения.

52. При каких условиях нагрузка между параллельно работающими генераторами распределится пропорционально их мощностям?

Ответ

1. При $I_{вг1} = I_{вг2}$.
2. При $n_{г1} = n_{г2}$.
3. При совпадении их относительных внешних характеристик.
4. При равенстве $R_{аг1} = R_{аг2}$.

53. Как определяется ток в обмотке возбуждения генератора, работающего параллельно с другими генераторами?

Ответ

1. $I_B = \frac{U}{R_B}$.
2. $I_B = \frac{E_a - U}{R_B}$.
3. $I_B = \frac{U - E_a}{R_B}$.
4. $I_B = \frac{U + E_a}{R_B}$.

54. Как определяется напряжение на зажимах нагруженного генератора?

Ответ

1. $U = E_a + I_a R_a$.
2. $U = E_a - I_a R_B$.

3. $U = E_a - I_a R_a.$

4. $U = E_a + I_B R_B.$

55. Чему равен ток нагрузки параллельно работающим шунтовых генераторов?

Ответ

1. $I_{\text{наг}} = I_{\text{нг1}} - I_{\text{нг2}}.$

2. $I_{\text{наг}} = I_{\text{аг1}} + I_{\text{аг2}}.$

3. $I_{\text{наг}} = I_{\text{нг1}} - I_{\text{вг1}} + I_{\text{нг2}} + I_{\text{вг2}}.$

4. $I_{\text{наг}} = I_{\text{аг1}} - I_{\text{вг1}} + I_{\text{аг2}} - I_{\text{вг2}}.$

56. Чему равна полная электрическая мощность, потребляемая двигателем из сети?

Ответ

1. $P_{\text{эл}} = EI_a.$

2. $P_{\text{эл}} = UI_a.$

3. $P_{\text{эл}} = U(I_a + I_B).$

4. $P_{\text{эл}} = UI_B.$

57. Как определить тепловые потери в обмотке якоря?

Ответ

1. $P_{\text{ма}} = I_B^2 R_a.$

2. $P_{\text{ма}} = I_a^2 R_a.$

3. $P_{\text{ма}} = UI_B.$

4. $P_{\text{ма}} = EI_a.$

58. Как определить потери в обмотке возбуждения?

Ответ

1. $P_B = ER_B.$

2. $P_B = (E - U)R_B.$

3. $P_B = UR_B.$

4. $P_B = I_B^2 R_B.$

59. Чему равна механическая мощность двигателя?

Ответ

1. $P_{\text{мех}} = M_{\text{эм}} \Omega = EI_a.$

2. $P_{\text{мех}} = J \frac{d\Omega}{dt} \Omega.$

3. $P_{\text{мех}} = P_{\text{эл}} - P_{\text{хх}}.$

4. $P_{\text{мех}} = P_{\text{полез}} - P_{\text{хх}}.$

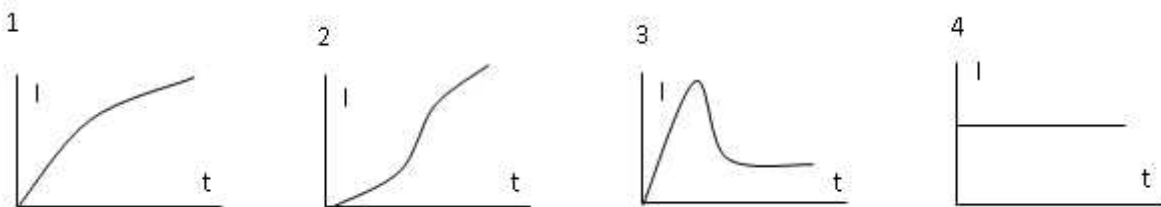
60. Чему равен электромагнитный момент, развиваемый на валу электродвигателя постоянного тока?

Ответ

1. $M_{\text{эм}} = M_{\text{мех}} - M_{\text{хх}}.$
2. $M_{\text{эм}} = \frac{pN}{2\pi a} I_a \Phi.$
3. $M_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{эл}}}{\Omega}.$
4. $M_{\text{эм}} = J \frac{d\Omega}{dt}.$

61. Как меняется ток в якоре электродвигателя при прямом пуске?

Ответ



62. Как правильно осуществляется пуск электродвигателя с помощью пускового реостата?

Ответ

1. Быстро вращать рукоятку реостата против часовой стрелки.
2. Медленно вращать рукоятку реостата по часовой стрелке.
3. Медленно вращать рукоятку реостата против часовой стрелки.
4. Резко повернуть рукоятку реостата по часовой стрелки.

63. Как нагрузить электродвигатель?

Ответ

1. Увеличить сопротивление в цепи якоря.
2. Увеличить сопротивление в цепи возбуждения.
3. Увеличить момент сопротивления на валу.
4. Увеличить электромагнитный момент.

64. Какой вид имеет уравнение равновесия моментов электродвигателя в общем случае?

Ответ

1. $M_{\text{эм}} = M_0 + M_2.$
2. $M_{\text{эм}} = M_0 + M_2 \pm M_J.$
3. $M_{\text{эм}} = M_2 \pm M_J.$
4. $M_{\text{эм}} = M_0 \pm M_J.$

65. Чем обусловлен момент холостого хода?

Ответ

1. Механическими потерями и потерями в стали.
2. Потерями в стали и в меди.

3. потерями на вентиляцию.
4. Потерями на гистерезис.

66. Когда возникает на валу машины динамический момент? Какой ответ неверен?

Ответ

1. При достижении установившейся скорости.
2. При изменении тока якоря.
3. При всяком изменении скорости.
4. При изменении сопротивления в цепи обмотки возбуждения.

67. Как определяется величина динамического момента?

Ответ

1. $M_{\text{дин}} = \frac{P_{\text{эл}}}{\omega}$.
2. $M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}$.
3. $M_{\text{дин}} = M_o + M_2$.
4. $M_{\text{дин}} = \frac{P_{\text{эл}}}{n}$.

68. Чему равен пусковой ток электродвигателя?

Ответ

1. $I_{\text{п}} = \frac{E}{R_a}$.
2. $I_{\text{п}} = \frac{E}{R_b}$.
3. $I_{\text{п}} = \frac{E - U}{R_a}$.
4. $I_{\text{п}} = \frac{U}{R_a + \Sigma R_{\text{п}}}$.

69. Какова величина пускового тока электродвигателя при прямом пуске?

Ответ

1. $I_{\text{п}} = (2 \div 3)I_{\text{н}}$.
2. $I_{\text{п}} = (20 \div 30)I_{\text{н}}$.
3. $I_{\text{п}} = (80 \div 100)I_{\text{н}}$.
4. $I_{\text{п}} = (8 \div 15)I_{\text{н}}$.

70. Чему равна величина тока при работе нагруженного электродвигателя?

Ответ

1. $I_a = \frac{E_a}{R_a}.$
2. $I_a = \frac{U - E_a}{R_a}.$
3. $I_a = \frac{U + E_a}{R_a}.$
4. $I_a = \frac{E_a - U}{R_a}.$

71. Уравнение равновесия ЭДС в электродвигателе постоянного тока?

Ответ

1. $U = E - I_a R_a.$
2. $U + E = I_a R_a.$
3. $U + E = -I_a R_a.$
4. $U = E + I_a R_a.$

72. Формула электромагнитной мощности электродвигателя?

Ответ

1. $P_{эм} = UI_B.$
2. $P_{эм} = EI_a = M_{эм} \Omega.$
3. $P_{эм} = E(I_a + I_B).$
4. $P_{эм} = UI_a.$

73. Формула электромагнитного момента, развиваемого в машине постоянного тока?

Ответ

1. $M_{эм} = C_M I_a \Phi; \quad M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\Omega}.$
2. $M_{эм} = C_e n \Phi.$
3. $M_{эм} = \frac{P_o}{\omega}.$
4. $M_{эм} = \frac{D}{2} B I \ell.$

74. Величина тока в обмотке возбуждения двигателя?

Ответ

1. $I_B = \frac{U}{R_B}.$
2. $I_B = \frac{E}{R_B}.$

$$3. \quad I_B = \frac{U}{R_a}.$$

$$4. \quad I_B = I_{\text{сети}} + I_a.$$

75. Как произвести реверс электродвигателя постоянного тока?

Ответ

1. Изменить направление тока в якоре и в обмотке возбуждения.
2. Изменить направление тока в серийной обмотке.
3. Изменить направление тока в обмотке добавочных полюсов.
4. Изменить направление тока либо в якоре, либо в обмотке возбуждения.
- 5.

76. Какова роль противо ЭДС в двигателе при изменении момента сопротивления на валу?

Ответ

1. Увеличивать напряжение.
2. Увеличивать ток возбуждения.
3. Увеличение электромагнитного момента.
4. Автоматический регулятор мощности, получаемой двигателем из сети.

77. Как можно регулировать скорость электродвигателя?

Ответ

1. Изменением момента сопротивления.
2. Изменением момента холостого хода.
3. Изменением сопротивления в цепи якоря, в цепи обмотки возбуждения.
4. Изменением тока в якоре.

78. Формула для определения скорости электродвигателя?

Ответ

$$1. \quad n = \frac{I_a \Sigma R_a}{C_e \Phi}.$$

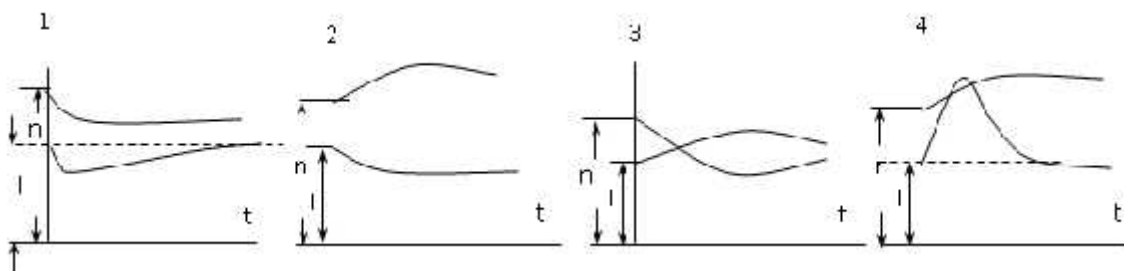
$$2. \quad n = \frac{U - I_a (R_a + R_{\text{доб}})}{C_e \Phi}.$$

$$3. \quad n = \frac{U}{C_M \Phi}.$$

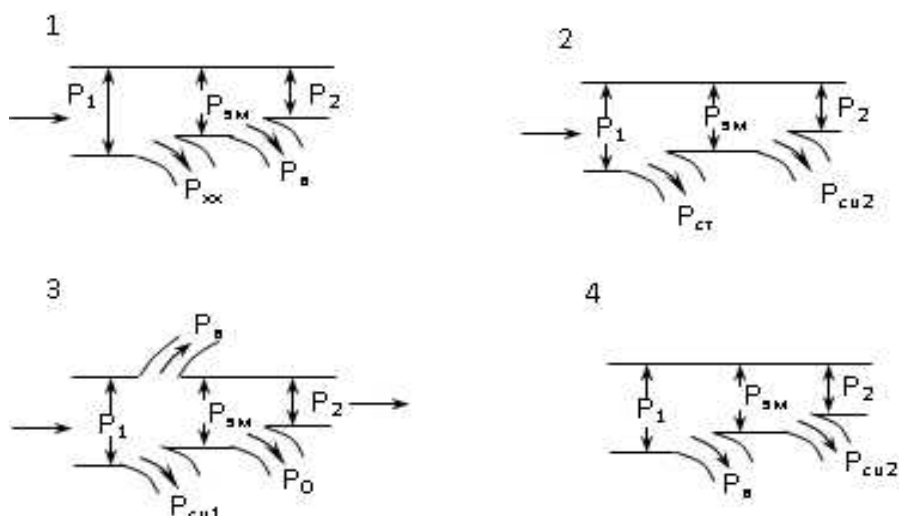
$$4. \quad n = \frac{U}{C_e \Phi}.$$

79. Покажите графики изменения скорости и тока при увеличении сопротивления в цепи якоря шунтового электродвигателя.

Ответ

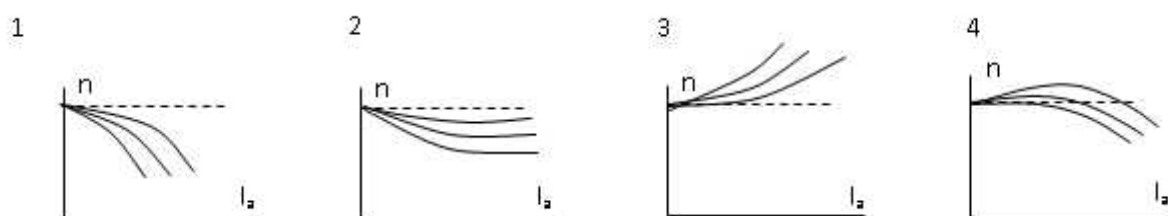


80. Какой вид имеет энергетическая диаграмма электродвигателя?



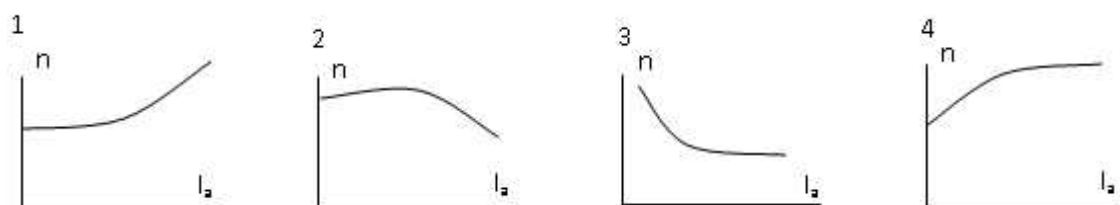
81. Какой вид имеют скоростные характеристики шунтового двигателя?

Ответ



82. Какой вид имеют скоростные характеристики серийного двигателя?

Ответ



83. Условия устойчивости работы двигателя с приводным механизмом?

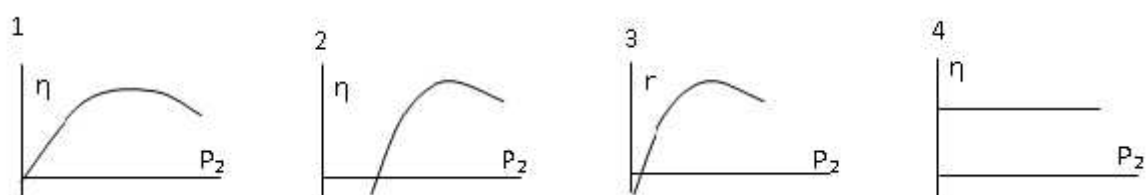
Ответ

$$1. \frac{dM_c}{d\omega} \ll \frac{dM_{эм}}{d\omega}, \quad 2. \frac{dM_{эм}}{d\omega} = \frac{dM_c}{d\omega},$$

$$3. \frac{dM_c}{d\omega} < \frac{dM_{эм}}{d\omega}, \quad 4. \frac{dM_{эм}}{d\omega} < \frac{dM_c}{d\omega}.$$

84. Покажите график КПД электродвигателя.

Ответ



85. Как изменится скорость двигателя, если увеличить магнитный поток?

Ответ

1. Не изменится.
2. Возрастет.
3. Уменьшится.
4. Возникнет колебательный процесс.

Методические рекомендации по самостоятельному изучению теоретического материала

Самостоятельная работа студентов по изучению отдельных тем дисциплины включает поиск учебных пособий по данному материалу, проработку и анализ теоретического материала, контроль знаний по данной теме с помощью нижеперечисленных вопросов и заданий.

Наименование темы	Контрольные вопросы
Введение, классификация электрических машин. Применение электрических машин в сельском хозяйстве. Краткие сведения по истории развития электромашиностроения и роли отечественных ученых в этом процессе. Современное состояние электромашиностроения в России. Отечественные и международные стандарты на электрические машины. Номинальные данные электрических машин и трансформаторов. Основные физические законы, на которых основаны принципы действия электрических машин	1. Классифицируйте электрические машины по назначению, по роду тока и принципу действия, по мощности и частоте вращения? 2. Приведите основные этапы развития электротехники в XIX в.? 3. Что такое номинальная мощность? 4. Сформулируйте законы Кирхгофа?
Трансформаторы. Устройство и принцип действия трансформаторов. Трансформаторы стержневые и броневые, трехфазные стержневые и групповые. Электротехническая сталь для магнитопроводов. Потери в стали и способы их снижения. Холоднокатанная сталь. Сборка магнитопровода. Обмотки трансформаторов. Понятие о конструкции обмоток трансформаторов. Системы охлаждения трансформаторов. Изоляционные материалы. Маркировка и ряд типоразмеров трансформаторов. Однофазный трансформатор. Холостой ход трансформатора. ЭДС обмоток трансформатора. Коэффициент трансформации. Намагничивающий ток и ток холостого хода. Приведенный трансформатор. Векторные уравнения трансформатора. Уравнения магнитодвижущих сил и токов трансформатора. Т-образная схема замещения. Параметры приведенного трансформатора. Упрощенная схема замещения. Векторные диаграммы для Т-образной и упрощенной схемы замещения. Энергетический баланс трансформатора. Опытное определение параметров схемы замещения на основании опытов холостого хода и короткого замыкания. Напря-	1. Что такое трансформатор? 2. Что называется коэффициентом трансформации? 3. Что такое стержень и ярмо трансформатора? 4. В чем разница между концентрическими и чередующимися обмотками? 5. Какие бывают способы охлаждения трансформаторов ? 6. Запишите уравнение для холостого хода трансформатора? 7. Что происходит с магнитным потоком при переходе от режима холостого хода к режиму нагрузки трансформатора? 8. Чем определяется величина и форма тока холостого хода? 9. Запишите комплексные уравнения для первичной и вторичной обмоток трансформатора? 10. Опишите векторные диаграммы обмоток при активно-индуктивной

жение короткого замыкания, потери короткого замыкания. Эксплуатационные показатели трансформаторов. Изменение вторичного напряжения трансформатора в зависимости от степени его загрузки и характера нагрузки, внешняя характеристика трансформатора. КПД трансформатора, эксплуатационный КПД. Схемы и группы соединения трансформатора. Соединение обмоток трехфазного трансформатора в звезду, треугольник, зигзаг. Особенности трансформатора со схемой соединения звезда-зигзаг с нулевым проводом. Группы соединения, рекомендуемые ГОСТом. Параллельная работа трансформаторов: условия включения, распределение нагрузки. Работа трехфазных трансформаторов при несимметричной нагрузке. Распределение нагрузки в первичной обмотке, искажение симметрии напряжений. Понятие о сопротивлении нулевой последовательности. Явления при намагничивании трансформаторов. Форма намагничивающего тока, магнитного потока и ЭДС при различных схемах соединения обмоток. Временные высшие гармоники магнитного потока и намагничивающего тока. Переходные процессы при включении ненагруженного трансформатора в сеть и при внезапных коротких замыканиях. Нагрев трансформатора. Трехобмоточные трансформаторы. Автотрансформаторы. Трансформаторы выпрямительных установок. Сварочные трансформаторы.	нагрузке трансформатора? 11. Приведите схему замещения трансформатора? 12. Как определяются параметры схемы замещения? 13. Что такое относительное изменение напряжения? 14. Что называют внешней характеристикой трансформатора? 15. Что называют КПД трансформатора? 16. Какие схемы соединения обмоток трансформатора существуют? 17. В зависимости от какого параметра трансформаторы делят на группы? 18. Приведите векторные диаграммы напряжений при параллельной работе трансформатора? 19. Приведите два необходимых условия для включения трансформаторов на параллельную работу? 20. Приведите общие методы анализа несимметричных режимов? 21. Что такое сварочные трансформаторы? 22. Запишите уравнения переходных процессов при включении трансформатора в сеть? 23. Что такое автотрансформаторы?
Общие вопросы теории машин переменного тока Образование вращающегося магнитного поля. Частота вращения основной волны поля и высших гармонических составляющих. Принцип работы и устройства машин переменного тока. Принципы выполнения обмоток. ЭДС обмоток машин переменного тока. Методы улучшения формы ЭДС. Понятие о магнитодвижущей силе (МДС) обмоток. Схемы обмоток машин переменного тока.	1. Что представляет собой пульсирующее поле? 2. Что представляет собой круговое вращающееся поле при трехфазной обмотке и двухфазной обмотке? 3. Однослойные и двухслойные обмотки трансформаторов переменного тока? 4. Что такое магнитное напряжение в воздушном зазоре?
Синхронные машины Назначение, типы и устройство синхронных машин. Явнополюсные и неявнополюсные синхронные машины. Принцип действия синхронного генератора. Реакция якоря синхронного генератора при активной, индуктивной и емкостной нагрузках. Общий случай нагрузки. Реакция якоря явнополюсной синхронной машины. Теория двух реакций. Векторные диаграммы синхронного генератора. Магнитные потоки и ЭДС синхронного генератора. Уравнения равновесия ЭДС. Векторные диаграммы неявнополюсного и явнополюсного синхронного генераторов. Параметры синхронного генератора. Характеристики	1. Каково назначение синхронных машин? 2. Опишите принцип действия синхронных машин? 3. Приведите основные конструктивные элементы синхронных машин и синхронных машин большой мощности? 4. Чем определяется ЭДС в обмотке якоря? 5. Что такое магнитное поле возбуждения? 6. Что называется реакцией якоря?

синхронного генератора: холостого хода, короткого замыкания, нагрузочная, внешние и регулировочные. Отношение короткого замыкания. Параллельная работа синхронных генераторов с сетью большой мощности. Способы синхронизации. Электромагнитная мощность, угловая характеристика, регулирование активной и реактивной мощности. у-образные характеристики синхронного генератора. Несимметричные установившиеся режимы работы синхронного генератора. Понятие о сопротивлениях прямой, обратной и нулевой последовательностей. Асимметричные установившиеся короткие замыкания синхронного генератора. Понятие о переходном процессе при внезапном коротком замыкании, физические явления. Аналитическое и графическое выражение токов синхронной машины при внезапном коротком замыкании. Сверхпереходные и переходные сопротивления синхронной машины. Последствия внезапного короткого замыкания. Понятие о статической и динамической устойчивости работы синхронных машин. Трехфазный синхронный двигатель. Принцип действия, преимущества и недостатки по сравнению с асинхронным двигателем. Электромагнитная мощность и момент двигателя. Уравнения равновесия ЭДС. Работа синхронного двигателя при изменении тока возбуждения и тормозного момента. у-образные характеристики. Асинхронный пуск синхронного двигателя. Синхронный компенсатор.	7. Определите отличия в диаграммах явнополусной и неявнополусной машинах? 8. Охарактеризуйте внешние и регулировочные характеристики генератора? 9. Как определяются индуктивные сопротивления? 10. Что такое отношение короткого замыкания? 11. Что требуется для регулирования нагрузки генератора? 12. Объясните режим недовозбуждения, перевозбуждения? 13. Что такое у-образная характеристика генератора? 14. Активная мощность синхронной машины? 15. Электромагнитный момент синхронной машины? 16. Назовите условия статической устойчивости? 17. Каким образом ток влияет на устойчивость? 18. Что такое синхронный двигатель? 19. Принципы построения векторных диаграмм для синхронных двигателей? 20. Что такое синхронный компенсатор?
Асинхронные машины Конструкция асинхронного двигателя. Принцип работы. Серии асинхронных двигателей, номинальные данные, закрытое и защищенное исполнение. Асинхронная машина при неподвижном роторе: с разомкнутым ротором, в режиме фазорегулятора, в режиме индукционного регулятора. Асинхронная машина при вращающемся роторе: рабочий процесс асинхронного двигателя. Пространственная диаграмма МДС. Уравнение МДС и токов. Приведение вращающейся асинхронной машины к неподвижному состоянию. Т-образная и Г-образная схемы замещения. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя. Общее выражение момента асинхронной машины. Механическая характеристика асинхронной машины. Расчетная формула момента асинхронной машины, формула Клосса. Рабочие характеристики асинхронного двигателя. Моменты высших гармонических составляющих магнитного поля. Круговая диаграмма асинхронной машины: обоснование и методы ее построения. Анализ свойств асинхронной машины с помощью круговой диаграммы.	1. Каково назначение асинхронных машин? 2. Опишите принцип действия асинхронных машин? 3. Запишите уравнение при холостом ходе для каждой фазы обмотки статора? 4. Что такое фазорегулятор, индукционный регулятор? 5. Запишите ЭДС и ток в обмотке ротора? 6. Опишите энергетические диаграммы асинхронных машин. 7. Приведите Т-образную схему замещения и векторную диаграмму? 8. Запишите зависимость электромагнитного момента от скольжения? 9. Приведите формулу Клосса? 10. Что называют рабочими характеристиками асинхронного двигателя? 11. Опишите основные принципы

Пуск трехфазных асинхронных двигателей, способы пуска. Асинхронные двигатели с улучшенными пусковыми свойствами. Способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей изменением числа пар полюсов, частоты и скольжения. Работа асинхронных двигателей при условиях, отличных от номинальных: при напряжении и частоте отличных от номинальных, при несимметрии напряжения, при несимметрии обмотки ротора.. Асинхронные машины в режиме противовключения и динамического торможения. Понятие о переходных процессах в асинхронных двигателях.	построения круговых диаграмм? 12. Основные требования при пуске двигателя? 13. Перечислите способы пуска двигателя? 14. Типы двигателей? 15. Формула определения частоты вращения двигателя? 16. Закон Костенко, закон управления при постоянстве магнитного потока? 17. Опишите магнитные потери в стали от высших гармоник? 18. Особенности генераторного режима работы? 19. Особенности режима электромагнитного торможения? 20. Области применения однофазных двигателей? 21. Принцип действия и устройство однофазного двигателя? 22. Что такое асинхронный преобразователь частоты?
---	---

ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ, ВЫНОСИМЫХ НА ЭКЗАМЕН ПО ДИСЦИПЛИНЕ ”ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ” ЗА 6 СЕМЕСТР ДЛЯ СТУДЕНТОВ ОЧНОГО И ЗАОЧНОГО ОБУЧЕНИЯ

Теоретические вопросы

1. Реакция якоря синхронного генератора (СГ).
2. Векторная диаграмма неявнополюсного СГ.
3. Векторная диаграмма явнополюсного СГ.
4. Основные характеристики СГ.
5. Параллельная работа СГ с мощной сетью.
6. Статическая устойчивость параллельной работы СГ с мощной сетью.
7. Динамическая устойчивость параллельной работы СГ с мощной сетью.
8. Несимметричные режимы работы СГ.
9. Переходный процесс внезапного короткого замыкания СГ.
10. Синхронные двигатели и способы их пуска.
11. Синхронные компенсаторы.
12. Синхронные машины специального назначения.
13. Асинхронный режим синхронного генератора.
14. Устройство асинхронного двигателя (АД).
15. Принцип действия АД.
16. Работа АД при неподвижном роторе.

17. Работа АД при вращающемся роторе.
18. Уравнения ЭДС и напряжений, схема замещения АД.
19. Векторная диаграмма приведенного АД.
20. Вращающий момент АД, основные формулы и их анализ.
21. Энергетическая диаграмма АД, кпд и его анализ.
22. Механическая характеристика АД и её анализ.
23. Устойчивость работы АД под нагрузкой.
24. Способы пуска АД, их достоинства и недостатки.
25. Рабочие характеристики АД и их анализ.
26. Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов.
27. Регулирование частоты вращения изменением напряжения и частоты.
28. Регулирование частоты вращения изменением скольжения.
29. АД с фазным ротором.
30. Двухклеточный АД.
31. Глубокопазный АД.
32. Работа АД при ненормальных условиях.
33. Переходные режимы работы АД.
34. Устройство и принцип действия машин постоянного тока (МПТ).
35. Физическая сущность реакции якоря в МПТ.
36. Физическая сущность процесса коммутации тока в обмотке якоря МПТ.
37. Причины искрения под щетками и меры борьбы с ними.
38. Методы и схемы возбуждения генераторов постоянного тока, условия самовозбуждения.
39. Характеристики генератора постоянного тока с независимым возбуждением.
40. Характеристики генератора постоянного тока с параллельным возбуждением.
41. Характеристики генератора постоянного тока со смешанным возбуждением.
42. Работа МПТ в режиме двигателя. Основные формулы и их анализ.
43. Рабочие свойства двигателя постоянного тока, анализ механической характеристики.
44. Способы пуска и торможения двигателей постоянного тока.
45. Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока изменением сопротивления в цепи якоря.
46. Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока изменением подводимого напряжения.
47. Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока изменением тока возбуждения.

Практические вопросы

1. Из каких основных частей состоит СГ.
2. Какой ток должен протекать в обмотке возбуждения СГ – переменный или постоянный?
3. Почему СГ называют синхронным?
4. Как определить частоту вращения магнитного поля обмотки статора СГ, если известны $2p$ (число полюсов) и f (частота тока)?
5. В чём состоит отличие явнополюсных и неявнополюсных СГ?
6. Что такое реакция якоря СГ?
7. В чём проявляется реакция якоря СГ при чисто активной нагрузке?
8. В чём проявляется реакция якоря СГ при чисто индуктивной нагрузке?
9. В чём проявляется реакция якоря СГ при чисто ёмкостной нагрузке?
10. Какова физическая сущность индуктивных сопротивлений X_{ad} и X_{aq} СГ?
11. Какова физическая сущность индуктивных сопротивлений X_d и X_s СГ?
12. Изобразить в осях координат внешнюю характеристику СГ при активной, индуктивной и ёмкостной нагрузках, дать пояснения.
13. Изобразить в осях координат регулировочную характеристику СГ при активной, индуктивной и ёмкостной нагрузках, дать пояснения.
14. Изобразить в осях координат характеристику холостого хода СГ, дать пояснения.
15. Изобразить в осях координат характеристику короткого замыкания СГ, дать пояснения.
16. Как определить синхронное индуктивное сопротивление X_d СГ по характеристикам холостого хода и короткого замыкания?
17. В чём состоят условия точной синхронизации СГ с мощной сетью?
18. Какие приборы необходимы для проверки выполнения условий точной синхронизации СГ с мощной сетью, как ими пользоваться?
19. Как увеличить реактивную мощность СГ, синхронизированного с мощной сетью?
20. Как увеличить активную мощность СГ, синхронизированного с мощной сетью?
21. Как перевести СГ, работающий параллельно с мощной сетью, в режим синхронного двигателя и синхронного компенсатора?
22. Какие способы пуска синхронного двигателя вы знаете?
23. В каком режиме будет работать АД при коротком замыкании с сети питания?
24. В каком режиме окажется АД, если при его работе под нагрузкой произошел обрыв линейного провода, если обмотка статора соединена в треугольник?

25. В каком режиме окажется АД, если при его работе под нагрузкой произошел обрыв линейного провода, если обмотка статора соединена в звезду?

26. В каком режиме окажется АД, если при его работе под нагрузкой произошел обрыв цепи фазы, если обмотка статора соединена в треугольник?

27. В каком режиме окажется АД, если при его работе под нагрузкой произошел обрыв цепи фазы, если обмотка статора соединена в звезду?

28. В каком режиме окажется АД, если при его работе под нагрузкой поменять местами два линейных провода сети питания?

29. Как изменится величина пускового момента АД нормально работающего по схеме треугольник, если пуск осуществлять по схеме звезда?

30. В чём состоит физический смысл приведения вращающегося ротора АД к неподвижному состоянию?

31. В чём состоит физический смысл и необходимость приведения обмотки ротора к обмотке статора АД?

32. С помощью какого прибора и как измерить сопротивление изоляции обмотки статора АД?

33. Как определить параметры намагничивающего контура схемы замещения АД опытным путём?

34. Как определить параметры рабочего контура схемы замещения АД опытным путём?

35. Изобразить схему реостатного пуска АД с фазным ротором.

36. За счёт какого явления увеличивается активное сопротивление обмотки ротора глубокопазного АД при его пуске?

37. Что такое секция обмотки якоря МПТ?

38. Как укладываются проводники секций двухслойной обмотки якоря в пазы якоря?

39. Для чего предназначены главные и добавочные полюсы в МПТ?

40. Для чего предназначен коллектор МПТ и как он устроен?

41. Изобразите схему соединения обмоток генератора постоянного тока независимого возбуждения.

42. Изобразите схему соединения обмоток генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

43. Изобразите схему соединения обмоток генератора постоянного тока смешанного возбуждения.

44. Что такое характеристика холостого хода генератора постоянного тока?

45. Что такое внешняя характеристика генератора постоянного тока?

46. Что такое регулировочная характеристика генератора постоянного тока?

47. Как нагрузить генератор постоянного тока? Как нагрузить двигатель постоянного тока?
48. Что такое реакция якоря МПТ?
49. Какой ток протекает по обмоткам МПТ?
50. Что такое коммутация тока обмотки якоря МПТ?
51. Как изменится процесс коммутации тока, если в генераторе ПТ щетки сдвинуть по направлению вращения якоря?
52. Как определить значение номинального напряжения генератора опытным путём?
53. Как изменить направления вращения двигателя ПТ?
54. Почему при уменьшении тока возбуждения двигателя ПТ увеличивается частота его вращения?

2.2.6. Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины «Электрические машины»

Таблица 2.13 – Методические указания, используемые при изучении дисциплины

№ п/п	Наименование указаний, пособий	Количество экземпляров
Основная		
Учебники		
1	Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.	10
2	Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.	10
3	Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. - М.: Высш. шк., 1987. Ч. 1 - 360 с., ч.2 - 332 с.	10
Учебные пособия		
1	Просужих Р. П. Практические работы по электрическим машинам. Севастополь 1983г.	200
2	Просужих Р. П., Шайтор Н.М. Методические указания к курсовому проекту по трансформаторам. Расчет трёхфазных трансформаторов. Севастополь 1993г.	200
3	Просужих Р. П. Тесты по электрическим машинам. Севастополь 1993г.	200
Описание лабораторных работ		
1	Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь 2003г	200
Дополнительная		
1	Справочник по электротехнике. Т 1,2. - М.:Изд-во МЭИ. 2000.	4
2	Технические и профессиональные справочники, обеспечивающие практическую деятельность по дисциплине “Электрические машины”.	10

2.2.7. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине

Таблица 2.14 – Матрица формирования компетенций по дисциплине

Занятие (тема)	Компетенции и шифры планируемых результатов освоения дисциплины											
	В (ОПК-1)	У (ОПК-1)	З (ОПК-1)	В (ПК-3)	У (ПК-3)	З (ПК-3)	В (ПК-7)	У (ПК-7)	З (ПК-7)	В (ПК-16)	У (ПК-16)	З (ПК-16)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T1.1			+			+			+			
T2.1			+			+			+			
T2.2		+			+			+				+
T3.1			+			+			+			
T3.2		+			+			+				+
T3.3	+			+				+			+	
T3.3	+			+			+			+		
T4.1		+			+			+				
T4.2	+			+			+				+	
T4.3		+			+			+		+		
T5.1			+			+			+		+	
T5.2		+			+			+			+	
T5.3	+			+			+			+		

Описание показателей и критериев оценивания компетенций ООП ВО на различных этапах их формирования разработано на основе карт компетенций, формируемых в данной дисциплине, приведенных в таблице 5.2 - 5.5.

Таблица 2.15 – Карта компетенций ОПК-1

Этап (уровень) освоения компете- нции	Планиру- емые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения				
		1	2	3	4	5
Обучаемый осваивает компетенцию в полном объёме	Владеть В (ОПК- 1):	Не владеет	Владеет некоторыми основными методами, приёмами поиска, систематизации, хранения, обработки и анализа информации из различных источников и баз данных, владеет представлением её отдельными способами в требуемом формате с использованием отдельных информационных, компьютерных и сетевых технологий в области электрических машин	Владеет хорошо основными методами, приёмами поиска, систематизации, хранения, обработки и анализа информации из различных источников и баз данных, владеет отдельными способами представления ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий в области электрических машин	Владеет в совершенстве основными методами, приёмами поиска, систематизации, хранения, обработки и анализа информации из различных источников и баз данных, владеет представлением ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий в области электрических машин	Владеет в совершенстве всеми методами, приёмами поиска, систематизации, хранения, обработки и анализа информации из различных источников и баз данных, в совершенстве владеет представлением ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий в области электрических машин

	Уметь У (ОПК- 1):	Не умеет	Умеет пользоваться некоторыми основными методами, приёмами поиска, систематизации, хранения, обработки и анализа информации из различных источников и баз данных, умеет представлять её отдельными способами в требуемом формате с использованием отдельных информационных, компьютерных и сетевых технологий в области электрических машин	Умеет хорошо пользоваться основными методами, приёмами поиска, систематизации, хранения, обработки и анализа информации из различных источников и баз данных, умеет пользоваться отдельными способами представления ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий в области электрических машин	Умеет в совершенстве пользоваться основными методами, приёмами поиска, систематизации, хранения, обработки и анализа информации из различных источников и баз данных, умеет представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий в области электрических машин	Умеет в совершенстве пользоваться всеми методами, приёмами поиска, систематизации, хранения, обработки и анализа информации из различных источников и баз данных, в совершенстве умеет представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий в области электрических машин
	Знать З (ОПК- 1):	Не знает	Имеет некоторое представление об основных методах, приёмах поиска, систематизации, хранения, обработки и анализа информации из различных источников и баз данных, имеет представление об отдельных способах представления ее в требуемом формате с использованием отдельных информационных, компьютерных и сетевых технологий в области электрических машин	Знает хорошо основные методы, приёмы поиска, систематизации, хранения, обработки и анализа информации из различных источников и баз данных, знает отдельные способы представления ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий в области электрических машин	Знает в совершенстве основные методы, приёмы поиска, систематизации, хранения, обработки и анализа информации из различных источников и баз данных, знает представление ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий в области электрических машин	Знает в совершенстве все методы, приёмы поиска, систематизации, хранения, обработки и анализа информации из различных источников и баз данных, в совершенстве знает представление ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий в области электрических машин

Таблица 2.16 – Карта компетенций ПК-3

Этап (уровень) освоения компетенции	Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения				
		1	2	3	4	5
Обучаемый осваивает компетенцию в полном объёме	Владеть В (ПК- 3):	Не владеет	Неуверенно владеет отдельными навыками для участия в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая отдельные технические, энергоэффективные и экологические требования	Владеет отдельными навыками для участия в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая основные технические, энергоэффективные и экологические требования	Владеет хорошо основными навыками для участия в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования	Владеет в совершенстве навыками для участия в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования

	<u>Уметь</u> У (ПК- 3):	Не умеет	Умеет неуверенно применять отдельные методы проектирования объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая отдельные технические, энергоэффективные и экологические требования	Умеет удовлетворительно применять основные методы проектирования объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая основные технические, энергоэффективные и экологические требования	Умеет хорошо применять все методы проектирования объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования	Умеет в совершенстве принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования
	<u>Знать</u> З (ПК- 3):	Не знает	Имеет некоторое представление об некоторых методах проектирования объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая отдельные технические, энергоэффективные и экологические требования	Знает удовлетворительно основные методы проектирования объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования	Знает хорошо все основные методы проектирования объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования	Знает в совершенстве все методы проектирования объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования

Таблица 2.17 – Карта компетенций ПК-7

Этап (уровень) освоения компетенции	Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения				
		1	2	3	4	5
Обучаемый осваивает компетенцию в полном объеме	<u>Владеть</u> В (ПК-7):	Не владеет	Владеет некоторыми навыками для обеспечения отдельных режимов и заданных параметров технологического процесса по заданной методике при использовании электрических машин	Владеет удовлетворительно основными навыками для обеспечения требуемых режимов и заданных параметров технологического процесса по заданной методике при использовании электрических машин	Владеет хорошо основными навыками для обеспечения требуемых режимов и заданных параметров технологического процесса по заданной методике при использовании электрических машин	Владеет в совершенстве всеми основными навыками для обеспечения требуемых режимов и заданных параметров технологического процесса по заданной методике при использовании электрических машин
	<u>Уметь</u> У (ПК-7):	Не умеет	Умеет неуверенно обеспечивать отдельные режимы и заданные параметры технологического процесса по заданной методике при использовании электрических машин	Умеет удовлетворительно обеспечивать основные режимы и заданные параметры технологического процесса по заданной методике при использовании электрических машин	Умеет хорошо обеспечивать все основные режимы и заданные параметры технологического процесса по заданной методике при использовании электрических машин	Умеет в совершенстве обеспечивать все требуемые режимы и заданные параметры технологического процесса по заданной методике при использовании электрических машин

	<u>Знать</u> 3 (ПК-7):	Не знает	Имеет некоторое представление об отдельных режимах использования и параметры технологического процесса по заданной методике при использовании электрических машин различных типов	Знает удовлетворительно основные режимы использования и параметры технологического процесса по заданной методике при использовании электрических машин различных типов	Знает хорошо все основные режимы использования и параметры технологического процесса по заданной методике при использовании электрических машин различных типов	Знает в совершенстве все режимы использования и параметры технологического процесса по заданной методике при использовании электрических машин различных типов
--	---------------------------	----------	---	--	---	--

Таблица 2.18 – Карта компетенций ПК-16

Этап (уровень) освоения компетенции	Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения				
		1	2	3	4	5
Обучаемый осваивает компетенцию в полном объёме	<u>Владеть</u> В (ПК-16):	Не владеет	Владеет неуверенно отдельными навыками по выполнению ремонтов оборудования по заданной методике при использовании электрических машин различных типов	Владеет удовлетворительно основными навыками по выполнению ремонтов оборудования по заданной методике при использовании электрических машин различных типов	Владеет хорошо основными навыками по выполнению ремонтов оборудования по заданной методике при использовании электрических машин различных типов	Владеет в совершенстве всеми основными навыками по выполнению ремонтов оборудования по заданной методике при использовании электрических машин различных типов
	<u>Уметь</u> У (ПК-16):	Не умеет	Неуверенно умеет выполнять ремонты оборудования по заданной методике при использовании электрических машин некоторых типов.	Умеет удовлетворительно выполнять ремонты оборудования по заданной методике при использовании электрических машин различных типов.	Умеет хорошо выполнять ремонты оборудования по заданной методике при использовании электрических машин различных типов.	Умеет в совершенстве выполнять ремонты оборудования по заданной методике при использовании электрических машин различных типов.
	<u>Знать</u> 3 (ПК-16):	Не знает	Имеет некоторое представление об отдельных приёмах по ремонту оборудования по заданной методике при использовании электрических машин некоторых типов.	Знает удовлетворительно основные приёмы по ремонту оборудования по заданной методике при использовании электрических машин различных типов.	Знает хорошо все основные приёмы по ремонту оборудования по заданной методике при использовании электрических машин различных типов.	Знает в совершенстве все приёмы по ремонту оборудования по заданной методике при использовании электрических машин различных типов.

Таблица 2.19 – Паспорт фонда оценочных средств по дисциплине

№ темы	Контролируемые разделы дисциплины	Код контролируемой компетенции (или её части)	Наименование оценочного средства
5 семестр			
Т1.1	Л1	3 (ОПК-1) – I	
	Л2	3 (ОПК-1) – II	
	Л3	3 (ОПК-1) – II	
	РГР-1	3 (ОПК-1) – II В (ПК-3) – II	Защита отчета по РГР
Т2.1	Пз-1	3 (ОПК-1) – II В (ПК-3) – II В (ПК-7) – II	практическое задание

T2.1	Л4	3 (ОПК-1) – II 3 (ПК-3) – II	собеседование
T2.2	Л5	3 (ОПК-1) – II 3 (ПК-3) – II	собеседование
T2.2	Л6	3 (ОПК-1) – II 3 (ПК-3) – II	собеседование
T2.1	Лз-1	3 (ОПК-1) – II У (ПК-16) – II	Защита отчета по лабора- торн. работе
T2.2	Л7	3 (ОПК-1) – II 3 (ПК-3) – II	собеседование
T2.2	Л8	3 (ОПК-1) – II 3 (ПК-3) – II	собеседование
T2.2	Лз-2-	3 (ОПК-1) – II У (ПК-16) – II	Защита отчета по лабора- торн. работе
T2.2	Пз-2	3 (ОПК-1) – II У (ПК-3) – II	собеседование
T3.1	Л9	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T2.1 - 3.1	КР-1	3 (ОПК-1) – II; 3 (ПК-3) – II; 3 (ПК-7) – II; 3 (ПК-16) – II	тест
T2.2	Пз-3	3 (ОПК-1) – II У (ПК-3) – II	собеседование
T2.2	РГР-2	3 (ОПК-1) – II У (ПК-3) – II У (ПК-7) – II	Защита отчета по РГР
T3.1	Л10	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T2.2	Пз-4	3 (ОПК-1) – II У (ПК-7) – II У (ПК-16) – II	собеседование тест
T3.1	Л11	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T3.1	Л12	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T2.2	Лз-3	3 (ОПК-1) – II У (ПК-3) – II У (ПК-16) – II	Защита отчета по лабора- торн. работе
T3.2	Л13	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T3.2	Л14	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T3.3	Л15	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T3.2	Лз-4	3 (ОПК-1) – II У (ПК-3) – II У (ПК-16) – II	Защита отчета по лабора- торн. работе
Л16	Л16	3 (ОПК-1) – II	собеседование
Л17	Л17	3 (ОПК-1) – II	собеседование
Л18	Л18	3 (ОПК-1) – II	собеседование
	Диф. зачет	3 (ОПК-1) – II; 3 (ПК-3) – II; 3 (ПК-7) – II; 3 (ПК-16) – II	собеседование
6 семестр			
T3.4	Л19	3 (ОПК-1) – II 3 (ПК-3) – II 3 (ПК-7) – II	собеседование
T2.2	РГР-3	3 (ОПК-1) – II У (ПК-3) – II У (ПК-7) – II	Защита отчета по РГР
T2.2	РГР-3	3 (ОПК-1) – II У (ПК-3) – II У (ПК-7) – II	Защита отчета по РГР
T4.1	Л20	3 (ОПК-1) – II	собеседование

		3 (ПК-16) – II	
T2.2	Пз-9	3 (ОПК-1) – II В (ПК-3) – II В (ПК-7) – II	собеседование
T2.2	Пз-5	3 (ОПК-1) – II В (ПК-3) – II В (ПК-7) – II	собеседование
T4.1	Л21	3 (ОПК-1) – II 3 (ПК-16) – II	собеседование
T4.1	Л22	3 (ПК-6) – II	собеседование
T2.2	КП-1	3 (ОПК-1) – II В (ПК-3) – II В (ПК-7) – II 3 (ПК-16) – II	собеседование
T2.2	КП-2	3 (ОПК-1) – II В (ПК-3) – II В (ПК-7) – II 3 (ПК-16) – II	Защита КП
T4.1	Л23	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T4.1	Л24	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T3.2	Пз-6	3 (ОПК-1) – II В (ПК-3) – II В (ПК-7) – II	собеседование
T4.2	Л25	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T4.2	Л26	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T4.2	Лз-5	3 (ОПК-1) – II В (ПК-3) – II В (ПК-16) – II	Защита отчета по лабора- торн. работе
T3.2 - 4.2	КР-2	3 (ОПК-1) – II; 3 (ПК-3) – II; 3 (ПК-7) – II; 3 (ПК-16) – II	тест
T4.3	Л27	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T4.3	Л28	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T3.2	Пз-7	3 (ОПК-1) – II В (ПК-3) – II В (ПК-7) – II	собеседование
T5.2	Лз-6	3 (ОПК-1) – II; В (ПК-3) – II; В (ПК-7) – II; В (ПК-16) – II	Защита отчета по лабора- торн. работе
T4.3	Л29	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T5.1	Л30	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T3.2	Пз-8	3 (ОПК-1) – II В (ПК-3) – II В (ПК-7) – II	собеседование
T5.2	Лз-7	3 (ОПК-1) – II; В (ПК-3) – II; В (ПК-7) – II; В (ПК-16) – II	Защита отчета по лабора- торн. работе
T5.1	Л31	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T5.1	Л32	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T5.2	Лз-8	3 (ОПК-1) – II; В (ПК-3) – II; В (ПК-7) – II; В (ПК-16) – II	Защита отчета по лабора- торн. работе
T5.2	Л33	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T5.3	Л34	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T5.3	Л35	3 (ОПК-1) – II	собеседование
T5.3	Л36	3 (ОПК-1) – II	собеседование
	Экзамен	3 (ОПК-1) – II; 3 (ПК-3) – II; 3 (ПК-7) – II; В (ПК-16) – II	собеседование

Таблица 2.20 – Паспорт фонда оценочных средств по дисциплине (для экзамена)

№ п/п	Контролируемые разделы дисциплины (результаты по разделам)	Код контролируемой компетенции (или её части)	Наименование оценочного средства
1.	Раздел 1. Законы электромеханики	3 (ОПК-1) – I, 3 (ПК-3) – II	собеседование
2.	Раздел 2. Трансформаторы	3 (ОПК-1) – I, 3 (ПК-3) – II 3 (ПК-7) – II, В (ПК-16) – II	Защита ЛР, Защита РГР, КР
3.	Раздел 3. Синхронные машины	3 (ОПК-1) – I, 3 (ПК-3) – II В (ПК-7) – II, В (ПК-16) – II	Защита ЛР, Защита РГР, КР, диф.зачет
4.	Раздел 4. Асинхронные машины	3 (ОПК-1) – I, 3 (ПК-3) – II В (ПК-7) – II, В (ПК-16) – II	Защита ЛР, КР
5.	Раздел 5. Машины постоянного тока	3 (ОПК-1) – I, В (ПК-3) – II В (ПК-7) – II, В (ПК-16) – II	Защита ЛР, Защита КП, КР, экзамен

Таблица 2.21 – Таблица соответствия результатов контроля знаний по разным шкалам и критерии оценивания

Сумма баллов по 100-балльной шкале	Оценка ECTS	Критерии оценивания	Уровень компетентности	Оценка по национальной шкале	
				для экзамена, КП (КР), практики	для зачета
90 – 100	А отлично	«Отлично» - высший уровень компетенций: теоретическое содержание курса освоено полностью, практические навыки сформированы, все учебные задания выполнены качественно и оценены высоким, близким к максимальному, числом баллов.	Высокий (творческий)	отлично	зачтено
82-89	В очень хорошо	«Очень хорошо» - высокий уровень компетенций: теоретическое содержание курса освоено полностью, практические навыки в основном сформированы, выполнены все предусмотренные программой учебные задания, качество выполнения большинства из них оценено числом баллов, близким к максимальному.	Достаточный	хорошо	
74-81	С хорошо	«Хорошо» - недостаточно высокий уровень компетенций: теоретическое содержание курса освоено полностью, отдельные практические навыки сформированы недостаточно, все учебные задания выполнены, качество выполнения ни одного из них не оценено минимальным числом баллов, отдельные виды заданий выполнены с ошибками.			

64-73	Д удовлетворительно	«Удовлетворительно» - средний уровень компетенций: теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, практические навыки в основном сформированы, большинство учебных заданий выполнено, некоторые из заданий содержат ошибки.	Средний	удовлетворительно	
60-63	Е достаточно	«Достаточно (посредственно)» - низкий уровень компетенций: теоретическое содержание курса освоено частично, некоторые практические навыки не сформированы, отдельные учебные задания не выполнены, либо качество выполнения некоторых из них оценено числом баллов, близким к минимальному.			
35-59	ФХ условно неудовлетворительно	«Условно неудовлетворительно» - недостаточный уровень компетенций: теоретическое содержание курса освоено частично, практические навыки не сформированы, большинство учебных заданий не выполнено, либо качество их выполнения оценено числом баллов, близким к минимальному; при дополнительной самостоятельной работе возможно повышение качества выполнения учебных заданий.	Низкий	неудовлетворительно	не зачтено

2.2.8. Перечень ресурсов информационно-коммуникационной сети интернет, необходимых для освоения дисциплины «Электрические машины»

Таблица 2.22 – Описание информационных ресурсов необходимых для освоения дисциплины

№	Адрес сайта и его описание	Перечень материалов, представленных на сайте
1.	Национальный цифровой ресурс Руконт: http://rucont.ru/gcollections (до 15.05.2015 г.) Логин / пароль удаленного читателя (доступ с любой точки интернета): SevGU / 123456 логин: SevGU пароль: 123456 Чтобы попасть в раздел "Ваши коллекции" необходимо пройти в раздел "Коллекции" и внизу экрана "Ваши Коллекции"	Представлена информация по широкому спектру технических дисциплин: труды, монографии, профессиональный каталог ресурсов Интернет; учебно-методические материалы для студентов; подборка словарей, энциклопедий, справочников по разнообразным направлениям технических дисциплин.
2.	ЭБС znaniium.com (www.znaniium.com - издательство ИНФРА-М): логин:abonent пароль:Pg7ZgHGu	Представлена информация по широкому спектру технических дисциплин: труды, монографии, профессиональный каталог ресурсов Интернет; учебно-методические материалы для студентов; подборка словарей, энциклопедий, справочников по разнообразным направлениям технических дисциплин.
3.	ЭБС book.ru (http://www.book.ru/ - Издательство КНОРУС): логин: пароль:	Представлена информация по широкому спектру технических дисциплин: труды, монографии, профессиональный каталог ресурсов Интернет; учебно-методические материалы для студентов; подборка словарей, энциклопедий, справочников по разнообразным направлениям технических дисциплин.

		ным направлениям технических дисциплин.
4.	ЭБС издательства «Лань» (e.lanbook.com - только к издательским коллекциям) – до 31.12.2015 г.;	Представлена информация по широкому спектру технических дисциплин: труды, монографии, профессиональный каталог ресурсов Интернет; учебно-методические материалы для студентов; подборка словарей, энциклопедий, справочников по разнообразным направлениям технических дисциплин.
5.	ЭБС «ЮРАЙТ» (www.biblio-online.ru): Доступ предоставляется со всех компьютеров, выходящих в интернет с диапазона IP-адресов прокси-сервера СевГУ. Получить доступ в электронную библиотеку из любой точки мира сотрудники университета могут, если предварительно регистрируются в электронной библиотеке с любого компьютера из корпусов СевГУ и самостоятельно заведут себе персональные логин и пароль.	Представлена информация по широкому спектру технических дисциплин: труды, монографии, профессиональный каталог ресурсов Интернет; учебно-методические материалы для студентов; подборка словарей, энциклопедий, справочников по разнообразным направлениям технических дисциплин.
6.	Электронная библиотека Издательского дома «Гребенников» (grebennikov.ru) – (договоренность о предоставлении по логину/паролю есть, пока только по IP-адресам на ул. Гоголя и в Студгородке) логин: пароль:	Представлена информация по широкому спектру технических дисциплин: труды, монографии, профессиональный каталог ресурсов Интернет; учебно-методические материалы для студентов; подборка словарей, энциклопедий, справочников по разнообразным направлениям технических дисциплин.
7.	ЭБС «IPRBooks» (http://www.iprbookshop.ru/): логин: sevntu пароль: rfRYrU83Lv?	Представлена информация по широкому спектру технических дисциплин: труды, монографии, профессиональный каталог ресурсов Интернет; учебно-методические материалы для студентов; подборка словарей, энциклопедий, справочников по разнообразным направлениям технических дисциплин.
8.	Справочная правовая система «Консультант Плюс» [Электронный ресурс] : сайт. – Режим доступа : www.consultant.ru	Представлена информация по методическому сопровождению изучения дисциплин в высшей школе

2.2.9. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине «Электрические машины»

При осуществлении образовательного процесса студентами и профессорско-преподавательским составом используются следующее программное обеспечение: Microsoft Office (Access, Excel, PowerPoint, Word и т. д), Open Office, Люникс (бесплатное программное обеспечение широкого класса), Skype.

При осуществлении образовательного процесса студентами и профессорско-преподавательским составом используются следующие информационно справочные системы: автоматизированная система управления «Спрут» (Деканат, Библиотека), ЭБС «Университетская библиотека онлайн», Консультант плюс, Гарант, электронное издание УМК, Видео-лекции на закрытой части сайта, Виртуальные справочные службы, Библиотеки, Профессиональная поисковая система Science Direct, Профессиональная поисковая система JSTOR, Профессиональная поисковая система ProQuest, Профессиональная поисковая система НЭБ, Профессиональная поисковая система EconLit, иные ИСС.

2.2.10. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине «Электрические машины»

Перечень и краткая характеристика лабораторного оборудования приведены в табл. 2.23.

Таблица 2.23 - Перечень лабораторного оборудования

№	Наименование лабораторного оборудования	Количество	Аудитория
1	Стенд по исследованию характеристик однофазного трансформатора	3	Маш.зал
2	Стенд по исследованию характеристик трёхфазного трансформатора	5	Маш.зал
3	Стенд по исследованию характеристик автономного трёхфазного синхронного генератора	5	Маш.зал
4	Стенд по исследованию параллельной работы трёхфазного синхронного генератора с мощной сетью	5	Маш.зал
5	Стенд по исследованию характеристик трёхфазного асинхронного двигателя	5	Маш.зал
6	Стенд по исследованию характеристик генератора и двигателя постоянного тока	5	Маш.зал
7	Персональный компьютер	12	А 457
8	Стенд по изучению устройства однофазных и трёхфазных силовых трансформаторов	1	Маш.зал
9	Стенд по изучению устройства трёхфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором	1	Маш.зал
10	Стенд по изучению устройства и принципа действия трёхфазных синхронных машин	1	Маш.зал
11	Полигон по изучению устройства и дополнительного оборудования силовых трёхфазных трансформаторов	1	Полигон

3. КРАТКИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ

Лекция 1

Тема: История развития и классификация ЭМ

Учебные вопросы:

1. Классификация электрических машин.
2. Законы электромеханики.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь, 1983.

1. Классификация электрических машин

Электрическая машина - это электротехническое устройство, предназначенное для электромеханического преобразования энергии.

Электрические машины классифицируются по следующим признакам:

1). По назначению подразделяют на следующие виды:

- Электромашинные генераторы;
- Электрические двигатели;
- Электромашинные преобразователи;
- Электромашинные компенсаторы;
- Электромашинные усилители.

2). По роду тока подразделяют на следующие виды:

- машины постоянного тока;
- машины переменного тока.

3). В зависимости от мощности электрические машины подразделяются:

- на микромашины (0,1 – 500 Вт);
- машины малой мощности (0,5 – 1,5 кВт);
- машины средней мощности (1,5 – 100 кВт);
- машины большой мощности (100 – 1000 кВт и более).

4). В зависимости от напряжения электрические машины подразделяются:

- на низковольтные (меньше 100 В);
- средневольтные (до 1000 В);
- высоковольтные (свыше 1000 В).

5). В зависимости от скорости вращения электрические машины подразделяются:

- на тихоходные (меньше 250 об/мин);
- среднескоростные (250 - 1000 об/мин);
- быстроходные (1000 - 3000 об/мин);
- сверхбыстроходные (свыше 3000 об/мин).

Электромашинные генераторы преобразуют механическую энергию в электрическую. Их устанавливают на электрических станциях и различных транспортных установках: автомобилях, самолетах, тепловозах, кораблях, передвижных электростанциях и др.

Электрические двигатели преобразуют электрическую энергию в механическую; они приводят во вращение различные машины, механизмы и устройства, применяемые в промышленности, сельском хозяйстве, связи, на транспорте, в военном деле и быту.

Электромашинные преобразователи преобразуют переменный ток в постоянный и, наоборот, изменяют значения напряжения переменного и постоянного тока, частоту, число фаз и др.

Электромашинные компенсаторы осуществляют генерирование реактивной мощности в электрических установках для улучшения энергетических показателей источников и приемников электрической энергии.

Электромашинные усилители используют для управления объектами большой мощности посредством электрических сигналов малой мощности, подаваемых на их обмотки управления (возбуждения).

Микромашинами называются электрические машины небольшой мощности (до 500 Вт).

По назначению электрические микромашины автоматических устройств подразделяются на следующие группы:

- Силовые микродвигатели;
- Управляемые (исполнительные) двигатели;
- Тахогенераторы;
- Вращающиеся трансформаторы;
- Машины синхронной связи (сельсины, магнесины).

Силовые микродвигатели приводят во вращение различные механизмы автоматических устройств, самопишущих приборов и пр.

Управляемые (исполнительные) двигатели преобразуют подводимый к ним электрический сигнал в механическое перемещение вала, т. е. отрабатывают определенные команды.

Тахогенераторы преобразуют механическое вращение вала в электрический сигнал — напряжение, пропорциональное частоте вращения вала.

Вращающиеся трансформаторы дают на выходе напряжение, пропорциональное той или иной функции угла поворота ротора, например синусу или косинусу этого угла или самому углу.

Машины синхронной связи (сельсины) осуществляют синхронный и синфазный поворот или вращение нескольких механически не связанных между собой осей.

Машины переменного тока в зависимости от принципа действия и особенностей электромагнитной системы подразделяют:

- на трансформаторы;
- асинхронные машины;
- синхронные машины;
- коллекторные машины.

Трансформаторы широко применяют для преобразования величины переменного напряжения: в системах передачи и распределения электрической энергии, в выпрямительных установках, устройствах связи, автоматики и вычислительной техники, а также при электрических измерениях (измерительные трансформаторы) и функциональных преобразованиях (вращающиеся трансформаторы).

Асинхронные машины используют главным образом в качестве электрических двигателей трехфазного тока. Простота устройства и высокая надежность позволяют применять их в различных отраслях техники для привода механизмов.

Синхронные машины применяют в качестве генераторов переменного тока промышленной частоты на электрических станциях и генераторов повышенной частоты в автономных источниках питания (на кораблях, самолетах и т. п.).

В электрических приводах большой мощности используют также **синхронные электродвигатели**.

В устройствах автоматики широко применяют различные синхронные машины малой мощности (реактивные, с постоянными магнитами, гистерезисные, индукторные и пр.).

Коллекторные машины переменного тока используют сравнительно редко и главным образом в качестве электродвигателей. Они имеют сложную конструкцию и требуют тщательного ухода.

Машины постоянного тока применяют главным образом в качестве электродвигателей в устройствах электропривода, требующих регулирования частоты вращения в широких пределах.

Например, на железнодорожном и морском транспорте, в прокатных станах, в грузоподъемных и землеройных машинах, в сложных металлообрабатывающих станках и пр.

Также используют двигатели постоянного тока в случаях, когда источниками электрической энергии для питания электродвигателей служат аккумуляторные батареи (стартерные двигатели, двигатели подводных лодок, космических кораблей и т. п.).

Генераторы постоянного тока часто применяют для питания устройств связи, зарядки аккумуляторных батарей, в качестве основных источников питания на транспортных установках (автомобилях, самолетах, тепловозах, пассажирских вагонах).

В системах автоматического регулирования машины постоянного тока широко используют в качестве электромашинных усилителей, исполнительных двигателей и тахогенераторов.

2. Законы электромеханики

Электромеханика является одним из разделов физики, в котором рассматривается электромеханическое преобразование энергии.

Электромеханика является фундаментальной наукой, для которой могут быть сформулированы три основных закона.

Первый закон.

Электромеханическое преобразование энергии не может осуществляться с КПД, равным 100 %.

В электрических машинах энергия, преобразующаяся в тепло, относится к потерям, и **КПД** есть отношение электрической мощности, отдаваемой в сеть, к механической (режим генератора) или отношение полезной механической к электрической мощности, забираемой из сети (режим двигателя).

Нельзя создать электрическую машину, в которой вся энергия преобразовывалась бы из электрической в механическую или, наоборот, из механической в электрическую, а преобразование энергии в тепло отсутствовало бы.

Второй закон.

Все электрические машины обратимы, т. е. они могут работать как в двигательном, так и в генераторном режиме.

Если электрическая энергия потребляется из сети, электрическая машина работает в режиме двигателя.

Если поток механической энергии, поступающей через вал, преобразуется в поток электромагнитной энергии, устанавливается генераторный режим работы.

В индуктивных электрических машинах обмотки статора и ротора связаны магнитным полем. Чтобы осуществлялась связь вращающихся обмоток с неподвижными обмотками с помощью переменных или постоянных токов, в воздушном зазоре машины создается вращающееся магнитное поле.

Для создания магнитного поля в машинах переменного тока требуется реактивная мощность. В обмотках машины переменного тока протекают активные и реактивные токи.

Реактивные токи создают вращающееся магнитное поле, а активные составляющие токов определяют активную мощность машины.

Направления активных и реактивных потоков энергии независимо от режима работы электрической машины могут совпадать или быть встречными.

Это значит, что активная мощность может поступать со стороны статора, а реактивная — со стороны ротора и наоборот.

В ЭП имеет место режим преобразования электрической или механической энергии в тепло. Это режим холостого хода.

Активная мощность в двигательном и генераторном режимах изменяет направление, однако поток тепловой энергии, как правило, направления не изменяет. Потери в ЭП необратимы.

Третий закон.

Электромеханическое преобразование энергии осуществляется полями, неподвижными относительно друг друга.

Неподвижные относительно друг друга поля ротора и статора в воздушном зазоре машины создают результирующее поле и электромагнитный момент:

$$M_{ЭМ} = \mu^{-1} P_{ЭМ}, \quad (1)$$

где ω - угловая скорость поля; $P_{ЭМ}$ - электромагнитная мощность - мощность магнитного поля, сконцентрированная в воздушном зазоре.

Поля, неподвижные относительно друг друга, создают $M_{ЭМ}$, а поля, перемещающиеся в воздушном зазоре относительно друг друга, создают поток тепловой энергии, косвенно влияя на распределение потоков механической и электрической энергии.

Обмотки электрических машин выполняются таким образом, что при протекании по ним токов в воздушном зазоре создается вращающееся магнитное поле.

Вращающееся поле может быть создано двухфазной системой токов, если неподвижные обмотки сдвинуты в пространстве на 90° ; трехфазной системой токов — при сдвиге обмоток в пространстве на 120° и токов во времени на 120° .

Вращающееся поле может также создаваться и постоянным током. При этом обмотка, обтекаемая постоянным током, должна вращаться.

В синхронной машине вращающееся поле в большинстве случаев создается обмотками, расположенными на статоре, и его угловая скорость равна ω_c .

Ротор вращается с такой же угловой скоростью, что и поле ($\omega_p = \omega_c$), поэтому в обмотке ротора частота тока $f_2 = 0$ и в ней протекает постоянный ток.

Поля статора и ротора в синхронной машине неподвижны относительно друг друга.

В машине постоянного тока обмотка возбуждения расположена на статоре и поле возбуждения неподвижно.

В якоре создается вращающееся поле, частота вращения которого равна частоте вращения ротора, а направление вращения поля противоположно вращению ротора.

Поэтому поля статора и ротора в машине постоянного тока неподвижны относительно друг друга.

Так как электромеханика является частью физики, к электрическим машинам применимы все основные законы физики.

К ним в первую очередь относятся законы сохранения энергии, полного тока, закон Ома и др.

В основе уравнений, описывающих преобразования энергии в электрических машинах, лежат уравнения Максвелла и Кирхгофа.

Лекция 2

Тема: Принцип действия и режим холостого хода трансформатора

Учебные вопросы:

1. Электрическая машина как электромеханический преобразователь.
 2. Основные определения, касающиеся трансформатора.
 3. Принцип действия трансформатора.
 4. Режим холостого хода трансформатора.
- Выводы.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.

4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь 1983г.

1. Электрическая машина как электромеханический преобразователь.

Электрические машины представляют собой определенную комбинацию в пространстве обмоток, в которых протекают токи, сдвинутые во времени.

При проектировании стремятся получить в зазоре круговое поле, что теоретически возможно лишь для двухфазных машин при сдвиге в пространстве обмоток на 90° , а для трехфазной — на 120° .

Простейшей схемой электрической машины в неподвижной в пространстве системе координат α, β является двухфазная машина с двумя парами обмоток на статоре и роторе (рис. 1).

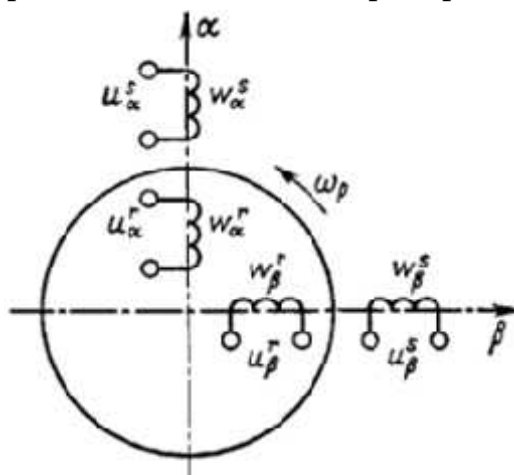


Рис 1. Модель обобщенной машины

На рис. 1 обмотки статора w_α^s и w_β^s сдвинуты в пространстве и в магнитном поле на 90° и обмотки ротора w_α^r и w_β^r сдвинуты относительно друг друга на 90° .

К обмоткам статора приложены соответственно напряжения u_α^s и u_β^s , а к обмоткам ротора — напряжения u_α^r и u_β^r .

Чтобы в воздушном зазоре двухфазной машины получить вращающееся магнитное поле, необходимо к обмоткам статора или ротора подвести напряжения, сдвинутые во времени на 90° .

Тогда в обмотках будут протекать токи, сдвинутые во времени на 90° , и в воздушном зазоре появится вращающееся магнитное поле.

Исходя из третьего закона электромеханики — неподвижности относительно друг друга полей статора и ротора — электромеханическое преобразование энергии будет возможным при определенном соотношении угловых скоростей:

$$\mu_c = \mu_p \pm \mu_{n,p}, \quad (1)$$

где $\mu_c, \mu_p, \mu_{n,p}$ — угловые скорости поля статора, ротора и поля ротора относительно ротора.

При изменении ω_c или ω_p изменяется частота токов в роторе, но поля статора и ротора остаются неподвижными относительно друг друга.

В воздушном зазоре машины (рис. 1) круговое поле будет только при определенных условиях. Чтобы поле было синусоидальным, необходимо на электрических выводах иметь синусоидальное напряжение, а машина должна быть идеальной.

В идеальной электрической машине воздушный зазор равномерный и гладкий (в машине нет пазов на роторе и статоре), обмотки выполнены в виде токовых слоев, создающих синусоидальное распределение МДС в воздушном зазоре.

При этом машина насыщена, магнитная проницаемость стали μ_a равна бесконечности. Машина симметричная, т. е. ее обмотки, магнитная система, воздушный зазор симметричны по осям α и β .

Двухфазная двухполюсная идеальная машина (рис. 1) называется **обобщенной электрической машиной**.

Обобщенной электрической машиной такая машина называется потому, что к ней приводятся процессы преобразования энергии во всех основных типах индуктивных электрических машин.

Основные типы электрических машин можно свести к обобщенной электрической машине, представляющей собой комбинацию двух пар обмоток, перемещающихся относительно друг друга.

Асинхронная (несинхронная) машина из схемы обобщенной машины получается, когда к обмоткам статора w_s^s и w_s^s подводятся синусоидальные напряжения с частотой f_1 , сдвинутые во времени на 90° .

В обмотках ротора при этом проходят токи с частотой $f_2 = f_1 S$, которые создаются приложенными к ротору напряжениями или наводятся токами обмоток статора.

В асинхронной машине угловая скорость ротора $\mu_p \neq \mu_c$, а поля ротора и статора неподвижны относительно друг друга, так как сумма угловых скоростей ротора и поля ротора относительно ротора равна ω_c .

Синхронную машину можно получить из модели обобщенной машины, если подвести к обмоткам статора переменное напряжение, а к обмоткам ротора — постоянное или, наоборот, к статору — постоянное, а к обмоткам ротора — переменное напряжение.

При этом $\mu_p = \mu_c$, т. е. поля статора и ротора неподвижны относительно друг друга.

Из схемы обобщенной машины при скорости ротора $\omega_p = 0$ можно получить электромагнитный преобразователь — трансформатор.

Хотя в трансформаторах происходит только электромагнитное преобразование энергии, они относятся к электрическим машинам, как из-за общности уравнений, так и из-за близкой технологии изготовления.

Из анализа обобщенной машины следует, что, несмотря на существенные отличия в конструкции и системе питающих напряжений, все электрические машины объединяет одно общее — они являются электромеханическими преобразователями.

Одна и та же электрическая машина может работать как синхронная, асинхронная, с преобразователем частоты от сети постоянного и переменного тока, а также как электромагнитный преобразователь — трансформатор.

2. Основные определения, касающиеся трансформатора

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Принцип трансформирования предложил и осуществил в 1976 г. русский ученый Яблочков.

Кроме свойства изменять величину напряжения трансформаторы обладают свойством разделять единую сеть на отдельные электрически не связанные между собой сети. Для этого применяются специальные разделительные трансформаторы.

Как правило, трансформатор состоит из:

- а) сердечника, набранного из листовой трансформаторной стали, и
- б) двух или нескольких обмоток, связанных между собой электромагнитно, а в автотрансформаторе — также и электрически.

Трансформатор, имеющий две обмотки, называется двухобмоточным, трансформатор с тремя или несколькими обмотками — трехобмоточным или многообмоточным.

Соответственно роду тока различают трансформаторы:

- однофазные;
- трехфазные;
- многофазные.

Под обмоткой многофазного трансформатора понимают совокупность всех фазных обмоток одинакового напряжения, определенным образом соединенных между собой.

Та из обмоток трансформатора, к которой подводится энергия переменного тока, называется первичной, другая, от которой энергия отводится, называется вторичной обмоткой.

Обмотка, присоединенная к сети с более высоким напряжением, называется обмоткой высшего напряжения (ВН).

Обмотка, присоединенная к сети меньшего напряжения, называется обмоткой низшего напряжения (НН).

Если вторичное напряжение меньше первичного, то трансформатор называется понижающим, а если больше — повышающим.

Чтобы предотвратить вредное влияние воздуха на изоляцию обмоток и улучшить условия охлаждения трансформатора, его сердечник с находящимися на нем обмотками помещают в бак, заполненный трансформаторным маслом. Такие трансформаторы называются масляными.

Трансформаторы, не погружаемые в масло, называются сухими.

Наибольшее значение имеют следующие типы трансформаторов:

1) **силовые** — для передачи и распределения электроэнергии;
 2) **автотрансформаторы** — для преобразования напряжений в относительно ограниченных пределах, для связи энергосистем различных напряжений, для пуска в ход двигателей переменного тока и т. д.;

3) **для питания установок со статическими полупроводниковыми преобразователями** при преобразовании переменного тока в постоянный (выпрямлении) и обратном преобразовании постоянного тока в переменный (инвертировании);

4) **испытательные** — для производства испытаний под высоким и сверхвысоким напряжением;

5) **силовые специального назначения:** печные, сварочные и т. д.;

6) **измерительные** — для измерения тока и напряжения при включении в схемы измерительных приборов;

3. Принцип действия трансформатора

Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора состоит из двух обмоток (рис. 2), размещенных на замкнутом магнитопроводе, выполненном из ферромагнитного материала.

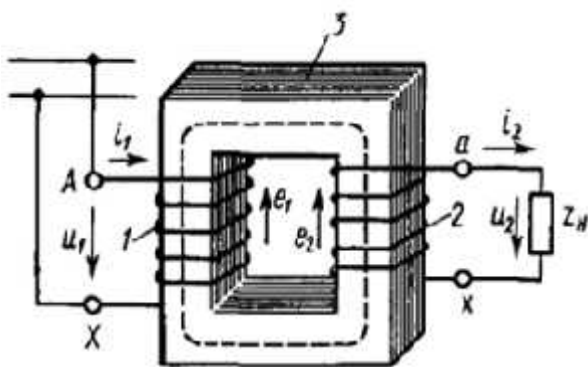


Рис. 2. Электромагнитная система

однофазного трансформатора

Первичную обмотку 1 подключают к источнику переменного тока — электрической сети с напряжением u_1 .

К вторичной обмотке 2 присоединяют сопротивление нагрузки Z_H .

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. Если к зажимам первичной обмотки подведено напряжение переменного тока u_1 , то в ее витках потечет переменный ток i_1 ,

который создаст в магнитопроводе переменное магнитное поле. Синони-

мом магнитного поля и его силовой характеристикой является магнитный поток Φ .

Одна основная часть магнитного потока Φ_0 , которая называется основным магнитным потоком, будет замыкаться по всему магнитопроводу и окажется сцепленной с витками, как первичной, так и вторичной обмоток.

В соответствии с законом электромагнитной индукции переменный поток Φ_0 будет индуцировать в обмотках ЭДС E_1 и E_2 , мгновенные значения которых, будут определяться формулами:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_0}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_0}{dt} \quad \left. \vphantom{\frac{d\Phi_0}{dt}} \right\} \quad (2)$$

где w_1 и w_2 - число витков.

В соответствии с принципом электромагнитной инерции ЭДС E_1 стремится противодействовать той же причине, которая ее вызвала. Поэтому ЭДС E_1 будет практически в противофазе с приложенным напряжением U_1 , ограничивая тем самым величину тока I_{10} , в цепи первичной обмотки.

Иначе говоря, величина тока I_{10} , определяется разностью мгновенных значений приложенного напряжения U_1 и ЭДС E_1 .

Другая (меньшая часть) магнитного потока Φ_{s1} замыкается по воздуху только вокруг витков первичной обмотки, называется потоком рассеяния первичной обмотки и будет индуцировать в ней ЭДС E_{s1} .

При синусоидальном изменении основного магнитного потока имеем:

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -w_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = -w_1 \frac{d(\Phi_m \sin \mu t)}{dt} = -w_1 \Phi_m \mu \cos \mu t = \\ &= \underbrace{w_1 \Phi_m \mu}_{E_{1m}} \sin \left(\mu t - \frac{\pi}{2} \right) = E_{1m} \sin \left(\mu t - \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Переходя к действующему значению ЭДС получим:

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{w_1 \mu \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{w_1 2\pi f \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_1 \Phi_m. \quad (4)$$

Аналогично найдём действующее значение ЭДС вторичной обмотки:

$$\boxed{E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m}. \quad (5)$$

ЭДС E_1 и E_2 отличаются друг от друга лишь за счет величины w_1 и w_2 . Это значит, что меняя соотношения числа витков, можно получить трансформаторы на любые соотношения ЭДС E_1 и E_2 .

Если к выводам вторичной обмотки подключить сопротивление нагрузки Z_H , то по цепи обмотки под действием ЭДС E_2 потечет переменный ток I_2 , а на ее выводах установится напряжение U_2 .

Ток I_2 создает в магнитопроводе свой магнитный поток Φ_2 , который будет направлен навстречу основному потоку Φ_0 .

Часть потока Φ_2 замкнется вокруг витков вторичной обмотки и эта часть называется потоком рассеяния вторичной обмотки Φ_{S2} .

Большая часть потока Φ_2 замкнется по всему магнитопроводу, вследствие чего результирующий магнитный поток в нем уменьшится. Это приведет к уменьшению ЭДС E_1 и к увеличению разности мгновенных значений напряжения U_1 и ЭДС E_1 , что в свою очередь, вызовет увеличение тока I_1 в цепи первичной обмотки и создаваемого им магнитного потока Φ . Благодаря этому результирующий магнитный поток в магнитопроводе достигает своего исходного значения $\Phi_0 \approx const$.

Таким образом, при увеличении тока в цепи вторичной обмотки и энергии, отдаваемой потребителям, автоматически возрастут ток и энергия, поступающие в первичную обмотку из сети.

При нагрузке ток первичной обмотки можно представить в виде суммы:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + \dot{I}_{1ДОБ}, \quad (6)$$

где $I_{1ДОБ}$ - добавочный ток, обусловленный током вторичной обмотки I_2 и его размагничивающим действием.

Если разделить уравнение (3) на (4), то можно получить

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2} = K, \quad (7)$$

где K - равное отношению числа витков или их ЭДС, называют коэффициентом трансформации.

На практике условились, что K определяется как отношение высшего напряжения к низшему, т.е. он всегда больше единицы.

4. Режим холостого хода трансформатора.

Режимом холостого хода трансформатора называется такой режим его работы, при котором на первичную обмотку подано номинальное переменное напряжение и по ней проходит ток силой I_0 , а вторичная обмотка разомкнута и ток в ней равен нулю.

Изучение режима холостого хода имеет важное значение, так как позволяет определить расчетным или опытным путём следующие величины:

- коэффициент трансформации;

- ток холостого хода;
- потери холостого хода.

Считаем магнитный поток трансформатора синусоидальной величиной.

$$\Phi_0 = \Phi_{0m} \sin \mu t. \quad (8)$$

Определим значения индуцируемых им ЭДС в первичной и вторичной обмотках:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = -w_1 \mu \Phi_{0m} \cos \mu t = 2^{\text{®}} f w_1 \Phi_{0m} \sin(\mu t - \frac{\text{®}}{2}); \quad (9)$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_0}{dt} = -w_2 \mu \Phi_{0m} \cos \mu t = 2^{\text{®}} f w_2 \Phi_{0m} \sin(\mu t - \frac{\text{®}}{2}). \quad (10)$$

Из последних выражений видно, что ЭДС e_1 и e_2 отстают по фазе от потока Φ_0 на угол $\frac{\text{®}}{2}$ и их амплитуды равны следующим выражениям:

$$E_{1m} = 2^{\text{®}} f w_1 \Phi_{0m}; \quad E_{2m} = 2^{\text{®}} f w_2 \Phi_{0m}; \quad (11)$$

Магнитный поток рассеяния первичной обмотки Φ_{S1} наводит в обмотке ЭДС рассеяния e_{S1} , которая также является ЭДС самоиндукции и равна:

$$e_{S1} = -L_{S1} \frac{di_{10}}{dt}. \quad (12)$$

Поскольку поток Φ_{S1} замыкается по воздуху, имеющую постоянную магнитную проницаемость, то индуктивность L_{S1} является постоянной величиной.

Поток Φ_{S1} совпадает по фазе с током i_{10} , а ЭДС e_{S1} отстает от него на угол $\frac{\text{®}}{2}$. Запишем это в символической форме:

$$\dot{E}_{S1} = -j \dot{I}_{10} \mu L_{S1} = -j X_1 \dot{I}_{10}, \quad (13)$$

где X_1 - индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки.

Первичная обмотка имеет активное сопротивление R_1 и, соответственно, падение напряжения в этом в этом сопротивлении $R_1 \dot{I}_{10}$, которое совпадает по фазе с током I_{10} .

В соответствии со вторым законом Кирхгофа для первичной обмотки справедливо уравнение для мгновенных значений:

$$u_1 + e_1 + e_{S1} = R_1 i_{10}. \quad (14)$$

Подставим сюда значение e_{S1} из предыдущего уравнения и перейдем к символической форме записи:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jX_1\dot{I}_{10} + R_1\dot{I}_{10}. \quad (15)$$

Это уравнение называется уравнением первичной обмотки трансформатора в режиме холостого хода.

Во вторичной обмотке в режиме холостого хода, тока нет, поэтому: $e_2 = u_2$, или в символической форме: $\dot{E}_2 = \dot{U}_2$.

Ток I_{10} имеет 2 составляющие:

- ток намагничивания $\dot{I}_\kappa$, создающий основной магнитный поток трансформатора;
- активный ток от потерь в стали $\dot{I}_a$.

Таким образом:
$$\dot{I}_{10} = \dot{I}_a + j\dot{I}_\kappa. \quad (16)$$

Обычно $\dot{I}_\kappa$ составляет 90 % от $\dot{I}_0$. Поэтому трансформатор, работающий на холостом ходу, нагружает сеть реактивной мощностью.

При работе трансформаторе на ХХ полезная мощность равна нулю.

Следовательно, мощность P_0 , потребляемая трансформатором при ХХ, затрачивается на потери в трансформаторе:

$$P_0 = p_{m1} + p_c + p_d, \quad (17)$$

где $p_{m1} = I_0^2 R_1$ - потери в меди первичной обмотки;

p_c – потери в стали сердечника;

$p_d = (0,15 - 0,2) p_c$ – добавочные потери ХХ, потери в стали, обусловленные недоброкачеством сборки листов, потери в крепежных деталях и в кожухе от полей рассеяния и пр.

Выводы:

1. Принцип работы трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции двух обмоток, связанных одним переменным магнитным потоком.
2. При существующем многообразии конструкций трансформаторов можно выделить общие конструктивные элементы: первичную обмотку, вторичную обмотку и магнитопровод.
3. Режимом холостого хода трансформатора называется такой режим его работы, при котором на первичную обмотку подано номинальное переменное напряжение и по ней проходит ток силой I_0 , а вторичная обмотка разомкнута и ток в ней равен нулю.
4. Изучение режима холостого хода имеет важное значение, так как позволяет определить расчетным или опытным путём коэффициент трансформации, ток холостого хода, потери холостого хода.

Лекция 3

Тема: Работа трансформатора под нагрузкой

Учебные вопросы:

1. Нагрузочный режим трансформатора.
 2. Приведенный трансформатор.
 3. Векторная диаграмма трансформатора при нагрузке.
- Выводы.

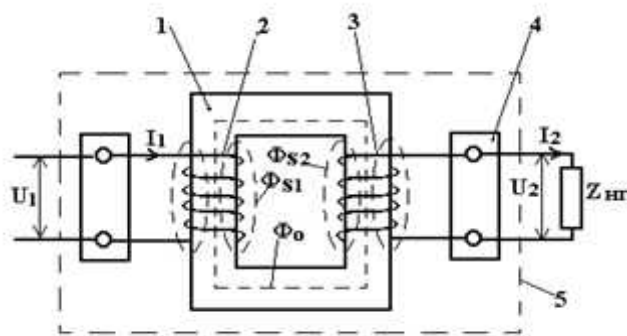
Литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь 1983г.

1. Нагрузочный режим трансформатора

Режим работы трансформатора, при котором к первичной обмотке подведено напряжение U_1 , а вторичная обмотка замкнута на внешнее сопротивление Z_H некоторого потребителя (рис. 1) называется нагрузочным или рабочим режимом трансформатора.

Этот режим работы трансформатора является основным, так как в этом случае осуществляется передача э/э из первичной цепи во вторичную (рис.1).



Физические процессы, происходящие в трансформаторе при нагрузке, заключаются в следующем.

При замыкании вторичной обмотки на внешнее сопротивление Z_H , в ней под действием ЭДС взаимной индукции E_2 возникнет ток I_2 . Этот ток создаёт в сердеч-

нике трансформатора свой магнитный поток, состоящий из двух частей Φ_2 и Φ_{s2} .

Переменный поток рассеяния Φ_{S2} , замыкаясь в основном по воздуху вокруг витков вторичной обмотки, наводит в ней ЭДС рассеяния:

$$\dot{E}_{S2} = -j\mu L_{S2} \dot{I}_2 = -jX_2 \dot{I}_2, \quad (1)$$

где $X_2 = \mu L_{S2}$ - индуктивное сопротивление вторичной обмотки, обусловленное потоком рассеяния; L_{S2} - индуктивность рассеяния вторичной обмотки, обусловленная потоком рассеяния.

Другая большая часть магнитного потока Φ_2 замыкается по сердечнику трансформатора и согласно закону Ленца противодействует магнитному потоку Φ_1 , создаваемому первичной обмоткой.

Закон Ленца.

При всяком изменении магнитных потоков, сцепляющихся с контурами, в контурах наводятся ЭДС такого направления, что токи, вызванные этими ЭДС, стремятся воспрепятствовать изменению потокосцепления.

Следовательно, при нагрузке основной магнитный поток трансформатора Φ , сцепляющийся с первичной и вторичной обмотками, создаётся МДС первичной обмотки $I_1 w_1$ и вторичной обмотки $I_2 w_2$.

Причём, если МДС первичной обмотки $I_1 w_1$ намагничивает трансформатор, то МДС вторичной обмотки $I_2 w_2$ размагничивает его.

Казалось бы, что при увеличении нагрузки основной магнитный поток трансформатора Φ должен уменьшаться, а при уменьшении нагрузки увеличиваться.

В действительности же основной магнитный поток трансформатора Φ практически остаётся без изменений.

Так как к трансформатору как при ХХ, так и при нагрузке подводится одно и тоже напряжение U_1 , то с некоторым приближением можно считать, что это напряжение уравнивается ЭДС первичной обмотки E_1 :

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 w_1 f \Phi_m. \quad (2)$$

Откуда видно, что основной магнитный поток

$$\Phi_m \approx \frac{U_1}{4,44 f w_1} \cong \text{const}. \quad (3)$$

Он не зависит от нагрузки трансформатора и при $U_1 = \text{const}$ остаётся практически неизменным и равным потоку в режиме ХХ.

Если магнитный поток при холостом ходе и при нагрузке одинаков, то и МДС при холостом ходе и нагрузке равны друг другу, т.е.

$$\dot{F}_0 = \dot{F}_{\text{НАГР}}. \quad (4)$$

МДС F_0 при холостом ходе создается током одной первичной обмотки, поэтому

$$\dot{F}_0 = w_1 \dot{I}_{10}. \quad (5)$$

При нагрузке результирующая МДС создается токами, как первичной, так и вторичной обмоток, поэтому

$$F_{\text{НАГР}} = w_1 \dot{I}_1 + w_2 \dot{I}_2; \quad (6)$$

следовательно

$$w_1 \dot{I}_{10} = w_1 \dot{I}_1 + w_2 \dot{I}_2. \quad (7)$$

Преобразуя выражение (7) можно получить:

$$\dot{I}_{10} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}. \quad (8)$$

И далее

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} - \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \dot{I}_{10} - \dot{I}_{1\text{ДОБ}}. \quad (9)$$

Последнее выражение показывает, что при нагрузке ток первичной обмотки имеет две составляющие: $\dot{I}_{10}$ - ток холостого хода; $\dot{I}_{1\text{ДОБ}} = -\frac{w_2}{w_1} \dot{I}_2$ - ток, обусловленный током нагрузки в цепи вторичной обмотки, и компенсирующий размагничивающее действие вторичного тока.

Поэтому при каждом изменении тока I_2 во вторичной обмотке автоматически изменяется ток I_1 в первичной обмотке, т.е. в трансформаторе имеет место процесс саморегуляции.

Уравнения электрического равновесия и МДС для трансформатора под нагрузкой имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j \dot{I}_1 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j \dot{I}_2 X_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_{10} - \frac{1}{K} \dot{I}_2. \end{aligned} \quad (10)$$

2. Приведенный трансформатор.

Так как для большинства трансформаторов число витков первичной и вторичной обмоток неравны, то ЭДС, токи, активные и индуктивные сопротивления их обмоток отличаются по величине.

Это обстоятельство затрудняет построение векторных диаграмм, схем замещения, непосредственное сопоставление и количественный учёт процессов, происходящих в трансформаторе, особенно при больших значениях коэффициента трансформации.

С целью устранения этого недостатка обе обмотки трансформатора приводят к одному числу витков и называют такой трансформатор приведенным.

Обычно все величины вторичной обмотки приводят к величинам первичной обмотки через коэффициент трансформации, но с сохранением энергетических соотношений.

Приведенный трансформатор, это трансформатор эквивалентный реальному по энергетическим соотношениям первичной и вторичной обмоток, но имеющий число витков вторичной обмотки равное числу витков первичной обмотки и изменённые параметры вторичной обмотки. Прием состоит в том, что реальный трансформатор с коэффициентом трансформации $K = \frac{w_1}{w_2}$, условно заменяют некоторым эквивалентным трансформатором,

с коэффициентом трансформации $K' = \frac{w_1}{w_2} = 1$, где $w_1 = w_2$. Тогда

ЭДС вторичной обмотки E'_2 будет равна ЭДС первичной обмотки E_1 : $E'_2 = E_1$.

Из принципа работы трансформатора нам известно:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = K; \quad E_1 = \frac{w_1}{w_2} E_2. \quad (11)$$

Следовательно,

$$E'_2 = E_1 = E_2 \frac{w_1}{w_2} = KE_2, \quad (12)$$

здесь K – коэффициент трансформации, является коэффициентом приведения ЭДС.

Приведение вторичной обмотки трансформатора к первичной, не должна изменять его энергетических показателей, и намагничивающих сил обмоток.

Так, электромагнитная мощность вторичной обмотки приведенного трансформатора $E'_2 I'_2$ должна быть равна электромагнитной мощности вторичной обмотки реального трансформатора: $E'_2 I'_2 = E_2 I_2$, отсюда

$$I'_2 = \frac{E_2}{E'_2} I_2 = \frac{E_2}{KE_2} I_2 = \frac{I_2}{K}. \quad (13)$$

Здесь I'_2 - приведенный ток вторичной обмотки.

Определим приведенное напряжение вторичной обмотки: $U'_2 I'_2 = U_2 I_2$, отсюда

$$U'_2 = \frac{I_2}{I'_2} U_2 = KU_2 \quad (14)$$

Определим приведенное активное сопротивление вторичной обмотки из условия равенства потерь: $I_2'^2 R_2' = I_2^2 R_2$, откуда

$$R_2' = R_2 \left(\frac{I_2}{I_2'} \right)^2 = R_2 K^2. \quad (15)$$

Определим приведенное реактивное сопротивление из условия равенства реактивных мощностей: $I_2'^2 X_2' = I_2^2 X_2$, откуда

$$X_2' = X_2 K^2. \quad (16)$$

Аналогично определяются полные приведенные сопротивления вторичной обмотки трансформатора и полное приведенное сопротивление нагрузки:

$$Z_2' = \sqrt{R_2'^2 + X_2'^2} = Z_2 K^2; \quad (17)$$

$$Z_{\text{нГ}}' = \sqrt{R_{\text{нГ}}'^2 + X_{\text{нГ}}'^2} = Z_{\text{нГ}} K^2. \quad (18)$$

С учетом приведения вторичных величин трансформатора к первичным, уравнения ЭДС и токов первичной обмотки, будут иметь следующий вид

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \\ \dot{U}_2' &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' R_2' - j\dot{I}_2' X_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2'; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_{10} - \dot{I}_2'. \end{aligned} \quad (19)$$

По полученным уравнениям можно составить векторную диаграмму и схему замещения приведенного трансформатора.

3. Векторная диаграмма трансформатора при нагрузке

Построим векторную диаграмму трансформатора, работающего в нагрузочном режиме.

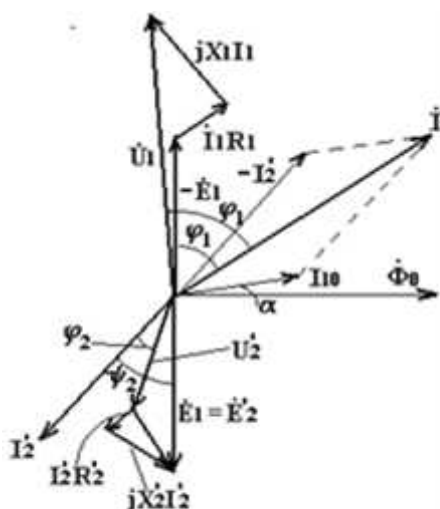


Рис. 2. Векторная диаграмма трансформатора

Это делается согласно векторным уравнениям (19).

Порядок построения векторной диаграммы следующий:

- 1) Отложить вектор магнитного потока Φ_{0m} .
- 2) С начала векторной диаграммы отложить в масштабе тока ток $\dot{I}_{10}$ под углом равным α (угол потерь) в сторону опережения вектора Φ_m . Вектор $\dot{I}_{10}$ раскладывается на два составляющих тока $\dot{I}_a$ и $\dot{I}_{\kappa}$.

- 3) Отложить $\dot{E}_1$ и $\dot{E}_2'$ под углом 90° в сторону отставания от вектора Φ_{0m} .
- 4) Под углом $\alpha_2 = \arctg \frac{X_2' + X_H'}{R_2' + R_H'}$ к вектору $\dot{E}_2'$ откладывается вектор $\dot{I}_2'$.
- 5) Из вектора $\dot{E}_2'$ вычитаем вектор падения напряжения $jX_2'\dot{I}_2'$.
- 6) Вычитаем вектор падения на активном сопротивлении вторичной обмотки $R_2'\dot{I}_2'$, он опережает вектор $jX_2'\dot{I}_2'$ на 90° .
- 7) Соединив начало векторной диаграммы с концом вектора $R_2'\dot{I}_2'$ получим искомый вектор $\dot{U}_2'$.
- 8) К концу вектора $\dot{I}_{10}$ пристроить вектор $-\dot{I}_2'$.
- 9) Соединив начало векторной диаграммы с концом вектора $-\dot{I}_2'$ получим искомый вектор $\dot{I}_1$.
- 10) Отложить $-\dot{E}_1$ под углом 90° в сторону опережения от вектора Φ_{0m} .
- 11) К концу вектора $-\dot{E}_1$ пристроить вектор $R_1\dot{I}_1$ параллельно вектору $\dot{I}_1$.
- 12) К концу вектора $R_1\dot{I}_1$ пристроить вектор $jX_1\dot{I}_1$, опережающий вектор $\dot{I}_1$ на 90° .
- 13) Соединить начало векторной диаграммы с концом вектора $jX_1\dot{I}_1$, получив тем самым искомый вектор $\dot{U}_1$.

Принимая во внимание уравнение равновесия ЭДС и векторную диаграмму, нарисует схему замещения трансформатора в нагрузочном режиме (рис. 3)

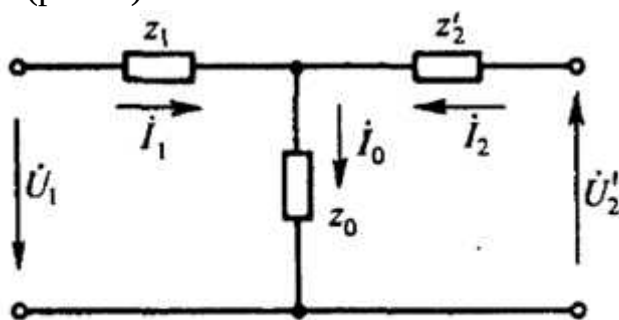


Рис. 3. Схема замещения трансформатора

Схема замещения трансформатора

Аналитическое исследование работы трансформатора упрощается, если действительный трансформатор, в котором обмотки связаны между собой электромагнитно, заместить схемой, элементы которой свя-

заны между собой только электрически.

В схеме замещения, электромагнитная связь первичной и вторичной сторон, реализуется простым электрическим соединением.

При этом следует изменить на противоположное направление ЭДС и тока вторичной стороны, что соответствует направлению и ЭДС первичной стороны и уравнению (19).

Схема состоит из трёх ветвей:

- 1) Первичной с параметрами R_1 и X_1 , моделирующими первичную обмотку трансформатора.
- 2) Вторичной с параметрами R'_2 , X'_2 , Z'_H R_1 и X_1 , моделирующими вторичную обмотку и нагрузку трансформатора.
- 3) Намагничивающей, по которой течет ток $\dot{I}_{10}$, ЭДС на её зажимах может быть представлена в виде

$$-\dot{E}_1 = -\dot{E}'_2 = \dot{I}_{10}(R_0 + jX_0) = \dot{I}_{10}Z_0, \quad (20)$$

где $Z_0 = R_0 + jX_0$ - комплекс полного сопротивления намагничивающей ветви; $R_0 = p_c / I_{10}^2$ - активное сопротивление, моделирующее активные потери в стали; $X_0 = \mu M$ - индуктивное сопротивление намагничивающей ветви; M - взаимная индуктивность обмоток.

Данная схема замещения позволяет анализировать и рассчитывать все режимы работы трансформатора

Действительно, если вторичная цепь разомкнута, то $\dot{I}'_2 = 0$ и ток $\dot{I}_1 = \dot{I}_0$, т.е. получаем режим ХХ.

Если же вторичную обмотку замкнуть накоротко, то получим режим КЗ.

Включение вторичной обмотки на разные по величине сопротивления нагрузки будет обеспечивать промежуточные режимы от ХХ до КЗ.

Выводы:

1. Нагрузочным режимом трансформатора называется режим работы трансформатора, при котором к первичной обмотке подведено напряжение U_1 , а вторичная обмотка замкнута на внешнее сопротивление Z_H некоторого потребителя.
2. Приведенный трансформатор - это трансформатор эквивалентный реальному по энергетическим соотношениям первичной и вторичной обмоток, но имеющий число витков вторичной обмотки равное числу витков первичной обмотки и изменённые параметры вторичной обмотки.
3. Векторная диаграмма трансформатора представляет собой совокупность векторов, определяемая системой векторных уравнений трансформатора под нагрузкой.

Лекция 4

Тема: Трёхфазные трансформаторы

Учебные вопросы:

1. Преобразование трехфазного тока.
2. Способы соединения обмоток трехфазных трансформаторов.
3. Схемы и группы соединений обмоток трансформаторов.

Литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь 1983г.
5. Кацман М.М. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 364 с.

1. Способы соединения обмоток трехфазных трансформаторов.

Каждая из обмоток трехфазного трансформатора как первичная, так и вторичная, может быть соединена:

- а) звездой,
- б) треугольником,
- в) зигзагом.

Главное значение имеют способы соединения обмоток звездой и треугольником.

Независимо от способа соединения концевые точки каждой фазной обмотки трехфазной системы называют: одну — началом обмотки, другую — ее концом.

Предположим, например, что за начало первой обмотки мы приняли ту ее концевую точку, идя от которой мы наматываем обмотку по часовой стрелке («правая намотка» — рис. 1).

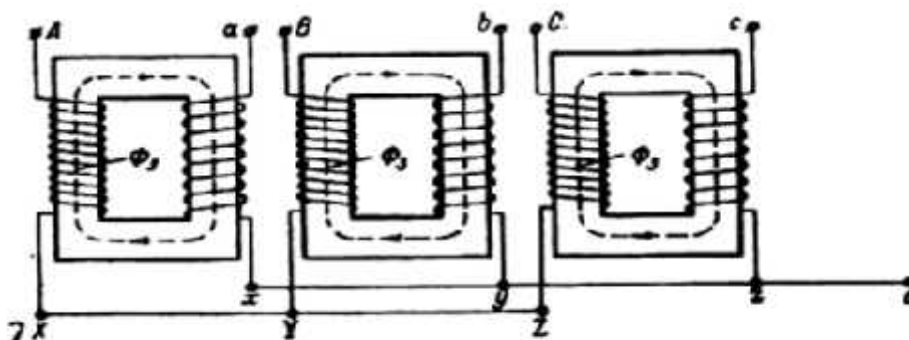


Рис. 1. Трансформаторная группа при соединении обмоток по схеме Y/Y_0-12

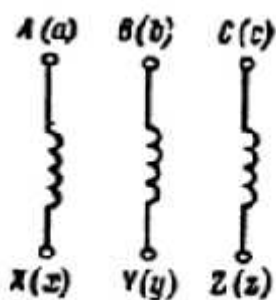


Рис. 2

Тогда за начала двух других обмоток мы должны принять такие концевые точки этих обмоток, идя от которых мы наматываем обмотки в том же, что и первую, направлении.

Условимся обозначать начала обмотки ВН трехфазного трансформатора буквами A, B и C , а ее концы — буквами X, Y и Z ; соответственно начала и концы обмотки НН — буквами a, b, c и x, y, z (рис. 2).

Соединение трехфазной обмотки трансформатора звездой.

При соединении трехфазной обмотки звездой соединяют в одну общую нейтральную точку либо три начала ее, оставляя свободными концы, либо три ее конца, оставляя свободными начала (рис. 3, а).

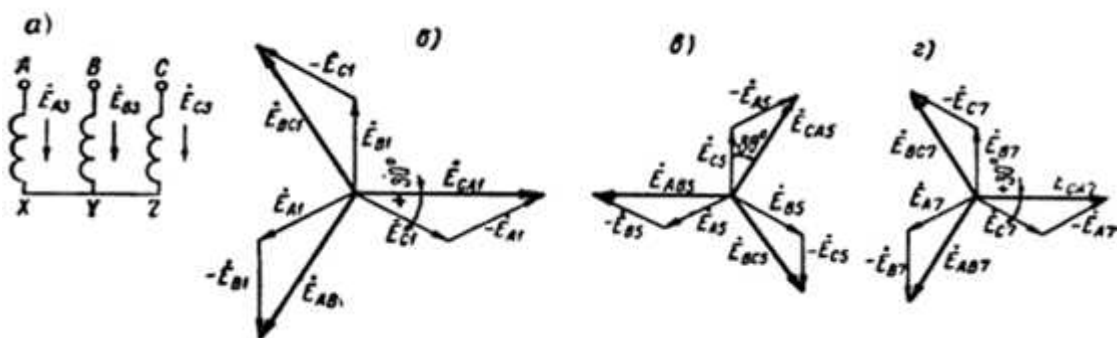


Рис. 3. Векторные диаграммы э. д. с. при соединении трехфазной обмотки звездой

Обходя любой из трех контуров, образуемых звездой, например контур $(A-X) - (Y-B)$, мы идем по обмотке A от ее начала A к концу X , а по обмотке B — от ее конца Y к началу B , т.е. изменяем направление обхода обмотки B относительно обмотки A . В этом случае для мгновенных значений линейных ЭДС имеем

$$e_{AB} = e_A - e_B \quad (5)$$

$$e_{BC} = e_B - e_C \quad (6)$$

$$e_{CA} = e_C - e_A. \quad (7)$$

Из уравнений (5), (6) и (7) следует, что при соединении обмоток звездой:

1) гармонические, кратные, трем, в линейном напряжении исчезают; физически это объясняется тем, что по каждому из двух контуров, составляющих звезду, эти гармонические действуют взаимно встречно (рис. 3, а).

2) линейные напряжения всех гармонических порядка $3s + 1$, включая сюда и основную, т. е. первую гармоническую, представляют собой симметричные трехфазные системы напряжений с прямым следованием фаз и начальной фазой $\Psi = +30^\circ$ (рис. 3, б и 3, г) и соответственно напря-

жения всех гармонических порядка $3s - 1$ — симметричные трехфазные системы с обратным порядком следования фаз и начальной фазой $\Psi = -30^\circ$ (рис. 3, в);

3) амплитуда линейного напряжения любой гармонической порядка $3s + 1$ в $\sqrt{3}$ раз больше амплитуды фазного напряжения соответствующей гармонической.

Переходя к действующим значениям фазных и линейных ЭДС, имеем

$$E_\phi = \sqrt{\frac{1}{2}(E_{m1}^2 + E_{m3}^2 + E_{m5}^2 + E_{m7}^2 + \dots)} \quad (8)$$

$$E_\lambda = \sqrt{\frac{3}{2}(E_{m1}^2 + E_{m5}^2 + E_{m7}^2 + \dots)}. \quad (9)$$

Так как при соединении обмоток звездой фазные токи непосредственно выводятся в линию, то

$$I_\lambda = I_\phi. \quad (10)$$

Как известно из курса «Теоретические основы электротехники», при несинусоидальных ЭДС и токах, мощность системы равна сумме мощностей отдельных гармонических.

Обычно наибольшее значение имеет мощность первой, или основной, гармонической. Для этой гармонической имеем:

$$P_1 = 3E_{\phi 1}I_{\phi 1} \cos \varphi = \sqrt{3}E_{\lambda 1}I_{\lambda 1} \cos \varphi, \quad (11)$$

где φ - угол сдвига между ЭДС $E_{\phi 1}$ и током $I_{\phi 1}$.

Соединение трехфазной обмотки трансформатора треугольником

При соединении обмотки треугольником начало последующей фазной обмотки присоединяется к концу предыдущей.

Соединение обмоток возможно:

а) по схеме (A — X) — (B — Y) — (C — Z) — A (рис. 4, а)

б) по схеме (A — X) — (C — Z) — (B — Y) — A (рис. 4, б).

Пусть i_{AX}, i_{BY}, i_{CZ} — мгновенные значения токов в фазных обмотках A, B и C;

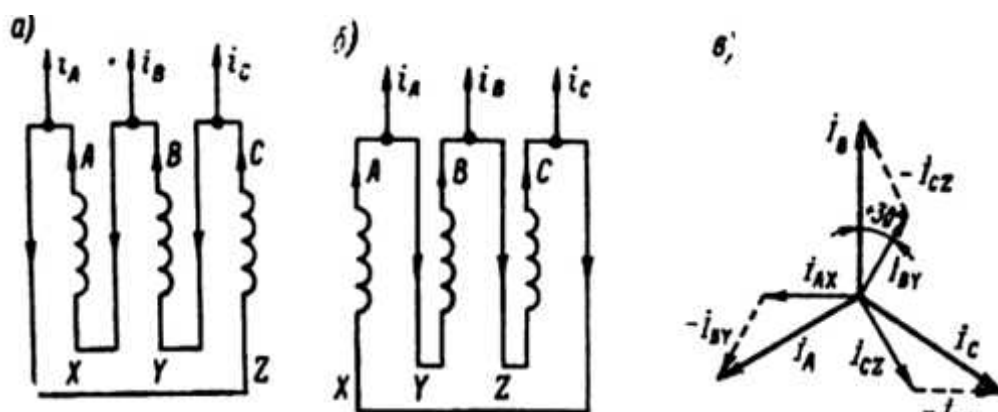


Рис. 4. Схемы соединений трехфазной обмотки треугольником (а и б) и диаграмма токов (в)

i_A, i_B, i_C — мгновенные значения токов в линиях, присоединенных к началам обмоток A, B и C .

Тогда для схемы на рис. 4, б имеем

$$\begin{aligned} i_A &= i_{AX} - i_{BY}; \\ i_B &= i_{BY} - i_{CZ}; \\ i_C &= i_{CZ} - i_{AX}. \end{aligned} \quad (12)$$

Соответствующая векторная диаграмма для первой гармонической токов изображена на рис. 4, в (индекс 1 на диаграмме опущен).

Мы видим, что вектор линейного тока опережает вектор фазного тока на угол 30° , причем

$$I_{\text{л1}} = I_{\text{ф1}} \sqrt{3} \quad (13)$$

В отношении третьей и кратных ей гармонических треугольник представляет собой замкнутый контур, в котором все эти гармонические действуют в одном направлении — либо от начала каждой фазной обмотки к ее концу, либо в обратном направлении.

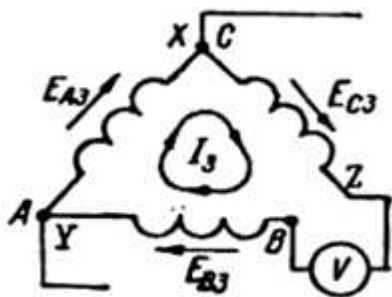


Рис. 5. Третьи гармонические эдс при соединении обмоток треугольником

Действующее значение гармонических, кратных трем,

$$E_{3\Delta} = \sqrt{E_3^2 + E_9^2 + \dots} \quad (14)$$

ЭДС $E_{3\Delta}$ можно измерить, если разомкнуть какой-нибудь узел треугольника, например узел $B - Z$ (рис. 5), и в рассечку включить вольтметр.

Действуя по замкнутому контуру треугольника, ЭДС $E_{3\Delta}$ создает в нем ток I_3 , который можно измерить, если в указанную выше рассечку включить вместо вольтметра амперметр.

Соединение трехфазной обмотки трансформатора зигзагом

Сущность этого способа состоит в том, что каждую фазную обмотку на стороне низшего напряжения делят на две, чаще всего, равные части и помещают эти части на разных стержнях (рис. 6, а).

Соединение обеих частей производят так, чтобы их ЭДС геометрически вычитались; для этого конец каждой одной половины фазной обмотки соединяют с концом второй половины той же обмотки.

Если при этом фазные обмотки разделены пополам, то результирующая ЭДС фазной обмотки в $\sqrt{3}$ раза больше ЭДС в каждой ее половине (рис. 6, б).

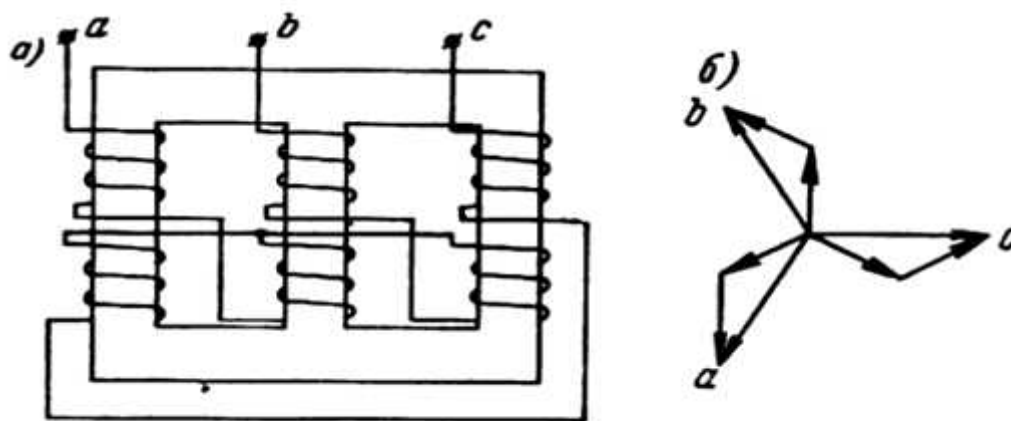


Рис. 6. Соединение обмоток трансформатора зигзагом

Соединение зигзагом применяется в специальных трансформаторах, например в трансформаторах для ртутных выпрямителей.

Соединения звездой, треугольником и зигзагом условились обозначать символами Y , Δ и .

Сначала пишут способ соединения обмотки ВН, затем обмотки НН и между этими обозначениями ставят наклонную черту.

Если какая-нибудь обмотка имеет выведенную нейтральную точку, то к соответствующему символу приписывается значок «О».

Таким образом, обозначение Y_0 / Δ следует читать так: обмотка ВН соединена звездой и имеет выведенную нейтральную точку, обмотка НН соединена треугольником.

Так как одна из обмоток может быть «вывернута» относительно другой, например, намотана в другую относительно первой сторону, то всего можно получить двенадцать различных способов соединения обмоток трехфазных трансформаторов.

ГОСТ оставляет из них только три, а именно:

- 1) Y / Y_0 , 2) Y / Δ 3) Y_0 / Δ .

2. Схемы и группы соединений обмоток.

Принятые ГОСТ схемы соединений обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов показаны на рис. 7.

Одного указания на способ соединения обмоток трансформатора недостаточно; необходимо еще указание на угол сдвига α между первичным и вторичным линейными напряжениями, в соответствии с чем определяется группа, к которой принадлежит трансформатор.

	Схемы соединения обмоток		Диаграммы векторов		Условные обозначения
	ВН	НН	ВН	НН	
а)					$Y/Y_c - 12$
б)					$Y/\Delta - 11$
в)					$Y_0/\Delta - 11$

Рис. 7. Схемы соединений обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов

Покажем, что угол α зависит от:

- а) направления, в котором намотана обмотка;
- б) способа обозначения зажимов обмоток, т. е. их маркировки,
- в) способа соединения обмоток трехфазных трансформаторов.

Выясним сначала влияние двух первых факторов на примере однофазного трансформатора (рис. 8).

Будем считать, что верхняя обмотка трансформатора является его первичной обмоткой, а нижняя — вторичной.

Предположим, что обе обмотки намотаны в одну и ту же сторону и что их верхние зажимы приняты за начала обмоток и обозначены буквами A и a , а нижние зажимы X и x : — за концы обмоток.

Так как обе обмотки трансформатора располагаются на одном и том же стержне и пронизываются одним и тем же основным потоком, то в нашем случае наводимые в обмотках э. д. с. имеют в любой момент времени одинаковое направление относительно зажимов обмоток, например от конца X к началу A в первичной обмотке и от конца x к началу a во вторичной обмотке.

Соответственно этому напряжения $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$ на зажимах первичной обмотки и вторичной, приведенной к первичной, обмотки трансформатора совпадают по фазе и изображаются двумя векторами $\vec{OA}$ и $\vec{Oa}$ равными по величине и одинаково направленными (рис. 8, б).

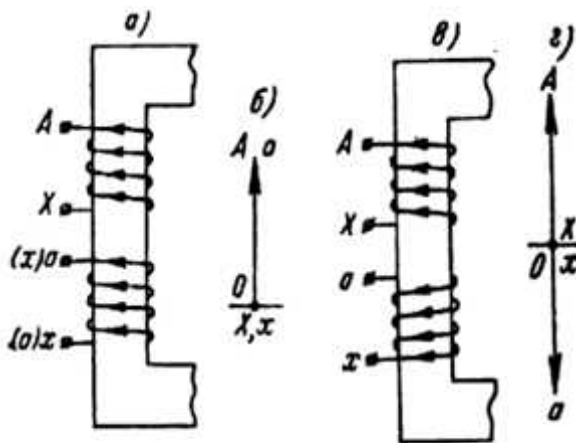


Рис. 8. Угол сдвига векторов эдс в зависимости от направления намотки и обозначения зажимов обмотки

Если первичная и вторичная обмотки намотаны в разные стороны, но сохраняют те же обозначения зажимов, что и на рис. 8, а, то, как это можно видеть на рис. 8, в, напряжения $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$ относительно зажимов первичной и вторичной обмоток направлены в разные стороны, например от X к A в первичной обмотке и от a к x: во вторичной обмотке.

Соответственно этому напряжения $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$ должны быть изо-

бражены векторами $\overline{OA}$ и $\overline{Oa}$, направленными в разные стороны (рис. 8, г).

Мы получили бы такой же результат, если бы, оставив тот же способ намотки обмоток, что и на рис. 8, а, изменили маркировку вторичной обмотки, поменяв местами обозначения ее зажимов (соответствующие буквы поставлены в скобках на рис. 8, а).

В этом случае первичное напряжение было бы направлено в одну сторону, например от зажима X к зажиму A, а вторичное напряжение в другую — от зажима a к зажиму x.

Таким образом, принимая вектор OA первичного напряжения за исходный, мы можем сказать, что вектор Oa вторичного напряжения однофазного трансформатора либо совпадает с вектором OA по фазе, либо находится с ним в противофазе; в первом случае вектор Oa смещен относительно вектора OA на угол $\alpha = 0^\circ$, а во втором — на угол $\alpha = 180^\circ$.

Вместо того чтобы выражать угол сдвига между напряжениями в градусах, удобнее пользоваться часовым способом обозначения угла.

Для этого вектор OA первичного линейного напряжения принимают за большую стрелку часов и устанавливают на цифре 12 часового циферблата, а вектор Oa вторичного линейного напряжения принимают за малую стрелку часов и устанавливают на циферблате соответственно положению вектора Oa относительно вектора OA .

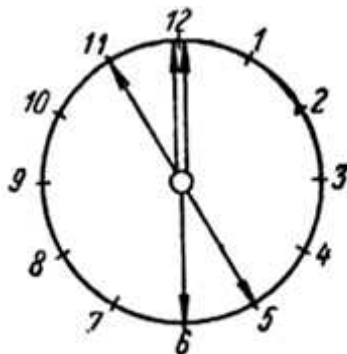


Рис. 9. Часовое обозначение группы соединений

Если векторы OA и Oa совпадают по фазе, как на рис. 8, б, то малую стрелку часов мы должны установить, как и большую стрелку, на той же цифре 12 (рис. 9).

Угол сдвига между стрелками часов равен нулю или, что одно и то же, $360^\circ = 30^\circ \times 12$.

Здесь угол 30° представляет собой угол между двумя соседними цифрами часового циферблата и принимается за единицу часового сдвига.

Цифра 12 и определяет собой группу, к которой в данном случае принадлежит трансформатор.

Если векторы OA и Oa находятся в противофазе, как на рис. 8, г, то малую стрелку часов мы должны установить на цифре 6 циферблата соответственно углу сдвига на $30^\circ \times 6 = 180^\circ$. В этом случае группа трансформатора определяется цифрой 6.

Выясним теперь вопрос о группах трехфазных трансформаторов.

Предположим, что обе обмотки трансформатора соединены звездой, намотаны в одну и ту же сторону и имеют одинаковые обозначения зажимов.

Обмотку ВН мы будем считать первичной обмоткой, а обмотку НН — вторичной.

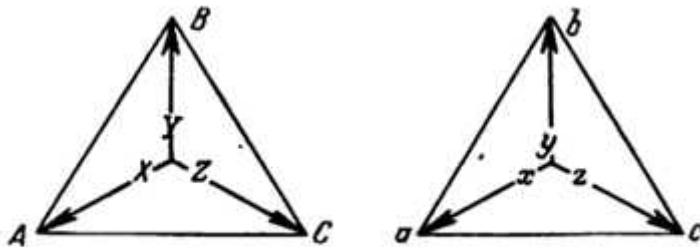


Рис. 10. Соединение Y/Y — 12

Так как вторичная обмотка как бы повторяет первичную, то звезда ax , by и cz вторичных фазных напряжений и треугольник abc вторичных линейных напряжений совпадают соответственно по фазе со звездой AX ,

BY и CZ и треугольником ABC фазных и линейных первичных напряжений (рис. 10).

Таким образом, угол сдвига вторичного линейного напряжения относительно первичного равен нулю, и, следовательно, трансформатор принадлежит к группе Y/Y — 12 ($\alpha = 0^\circ$ или $\alpha = 30^\circ \times 12$).

Если мы намотаем обмотку НН в обратном направлении относительно обмотки ВН или поменяем местами ее начала и концы (но одновременно одно и другое), то при соединении обеих обмоток по-прежнему звездой треугольник напряжений abc повернется относительно треуголь-

ника ABC на 180° , т. е. на $30^\circ \times 6$ (рис. 11).

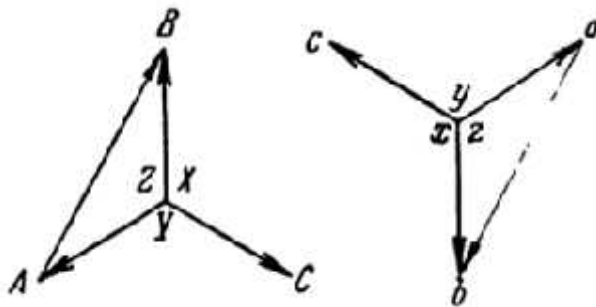


Рис. 11. Соединение Y/Y — 6

В этом случае вторую стрелку часов надо установить на цифре 6 циферблата (см. рис. 9). Следовательно, данное соединение обмоток относится к группе 6 и пишется в виде Y/Y — 6 или Y/Y₀ — 6.

Рассмотрим теперь соединение звезда — треугольник на рис. 9, б. Здесь обмотка НН соединена по схеме $a - x - c - z - b - y - a$.

Стороны AB , BC и CA треугольника напряжений ABC определяют собой линейные напряжения обмотки ВН, а лучи звезды того же треугольника — фазные напряжения этой обмотки.

Если обмотки ВН и НН намотаны в одном направлении и имеют одинаковые обозначения зажимов, то векторы фазных напряжений обеих обмоток совпадают.

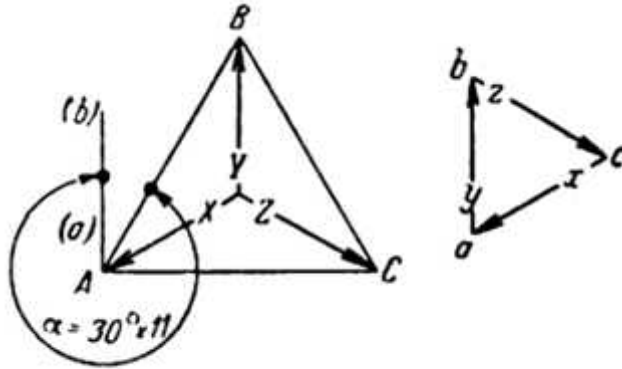


Рис. 12. Соединение Y/Δ — 11

Поэтому при построении треугольника abc нужно провести из точки a (рис. 12), находящейся в левом нижнем углу, вектор ax параллельно вектору AX , затем из точки c , которую нужно совместить с точкой x , следует провести вектор cz параллельно вектору CZ и, наконец, из точки b , которую нужно совместить с точкой z ,

провести вектор by параллельно вектору BY , тем самым замыкая треугольник abc .

Сопоставляя положения треугольников ABC и abc , например сторон AB и ab , можно видеть, что второй треугольник повернут относительно первого по направлению вращения часовой стрелки на $330^\circ = 30^\circ \times 11$.

Следовательно, данное соединение обмоток относится к группе 11 и пишется в виде Y/Δ — 11.

Если бы обмотка НН была намотана в обратном направлении относительно обмотки ВН или мы поменяли местами ее начала и концы, то треугольник abc повернулся бы относительно треугольника ABC на $150^\circ = 30^\circ \times 5$. Следовательно, такое соединение обмоток дает группу 5 и пишется в виде Y/Δ — 5.

Группы 12, 6, 11 и 5 считаются основными. Из них можно получить ряд производных групп. Для этого нужно только переместить зажимы обмотки НН относительно зажимов обмотки ВН.

Лекция 5

Тема: Определение параметров и характеристики трансформатора

Учебные вопросы:

1. Определение параметров схемы замещения трансформатора опытным путем.
2. Определение параметров схемы замещения расчетным путем.
3. Внешняя характеристика трансформатора.
4. Коэффициент полезного действия трансформатора.

Литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь 1983г.

1. Определение параметров схемы замещения трансформатора опытным путем.

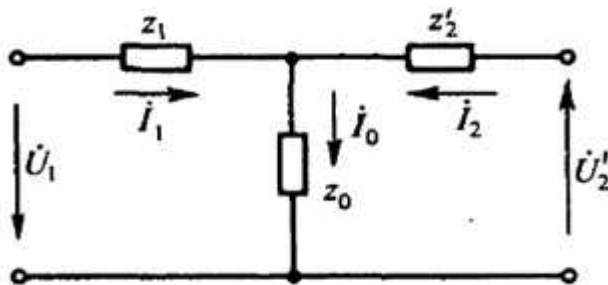


Рис. 1. Схема замещения трансформатора

Ранее была получена схема замещения для приведенного трансформатора (рис. 1).

Эту схему замещения можно видоизменить, представив каждое полное сопротивление состоящим из двух сопротивлений: активного и реактивного (рис. 2).

ного (рис. 2).

В этой схеме замещения $Z_1 = r_1 + jx_1$; $Z_2' = r_2' + jx_2'$; $Z_0 = r_0 + jx_0$.

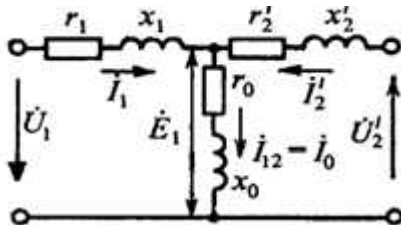


Рис. 2. Видоизмененная схема замещения трансформатора

В схему рис. 2 входят активные сопротивления первичной и вторичной обмоток r_1 и r_2' , индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток x_1 и x_2' , а также сопротивление, эквивалентное потерям в стали, r_0 и сопротивление взаимной индукции x_0 .

Определение параметров — сопротивлений схемы замещения — может быть проведено опытным и расчетным путями.

Для определения параметров схемы замещения опытным путём необходимо провести два опыта — холостого хода и короткого замыкания.

1.1. Опыт холостого хода трансформатора.

Уравнения трансформатора при холостом ходе, когда $I_2' = 0$, а $Z_H = \infty$, выглядят следующим образом;

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1; \dot{U}_2' = \dot{E}_2'; \dot{I}_0 = \dot{I}_0. \quad (1)$$

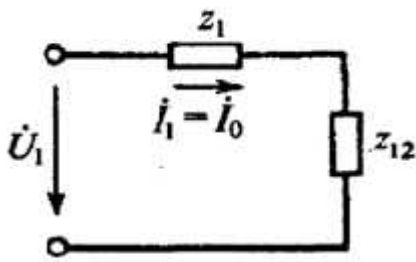


Рис. 3. Схема замещения трансформатора

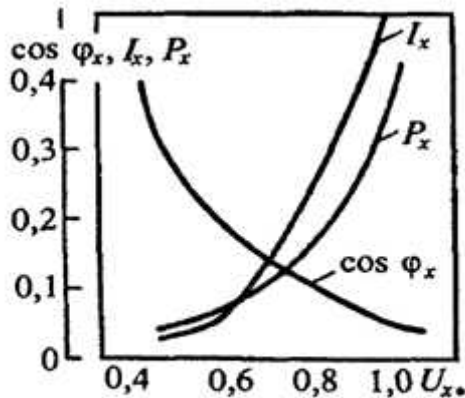


Рис. 4. Характеристики холостого хода трансформатора

Схема замещения при холостом ходе может быть получена из Т-образной схемы, если считать $\dot{I}'_2 = 0$ (рис. 3).

В опыте холостого хода снимаются зависимости тока холостого хода I_x , потерь холостого хода P_x , $\cos \varphi_x$ от напряжения (рис. 4).

Ток холостого хода сначала линейно зависит от U_x , а при

$U_x \approx (0,6 \div 0,8)U_{ном}$ из-за насыщения отклоняется от линейной зависимости.

При $U_x = (1,1 \div 1,2)U_{ном}$ когда магнитная система трансформатора насыщена, I_x снова изменяется по линейному закону.

При насыщении растет реактивная мощность, поэтому $\cos \varphi_x$ с увеличением напряжения падает.

Потери при холостом ходе P_x — это потери в стали магнитопровода трансформатора

форматора

Ток холостого хода в силовых трансформаторах составляет 0,8 — 10%. В трансформаторах 200 000 — 630 000 кВ·А ток холостого хода составляет 0,5 — 0,4%.

Поэтому электрические потери в 10^2 — $5 \cdot 10^4$ раз меньше электрических потерь при номинальном режиме. Считают, что потери при холостом ходе — это потери в стали.

Определив потери холостого хода P_x , можно найти активное сопротивление схемы замещения r_0 , эквивалентное потерям в стали:

$$P_x = m I_x^2 (r_1 + r_0), \text{ но } r_1 \ll r_0, \text{ поэтому можно считать, что } P_x = m I_x^2 r_0.$$

Сопротивление взаимной индукции

$$z_0 = \frac{U_x}{I_x}. \quad (2)$$

Зная полное сопротивление и $r_0 = \frac{P_x}{m I_x^2}$, определяют $x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}$.

Активные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора r_1 и r_2 находятся опытным путем при питании обмоток постоянным током. Активные, или, вернее, омические, сопротивления находят делением постоянного напряжения на ток.

Сопротивления схемы замещения трансформатора z_0 , x_0 , r_0 зависят от напряжения. С ростом U_x из-за насыщения z_0 и x_0 уменьшаются и ток увеличивается.

Насыщение в трансформаторе — индукция B_m — зависит от приложенного к обмоткам напряжения U_ϕ , числа витков фазы обмотки w и сечения магнитопровода S : $U_\phi = 4,44 f B_m S w$.

Потери в стали пропорциональны B^2 и частоте $f^{1,3}$ приближенно. Чтобы уменьшить потери в стали, надо уменьшать в первую очередь индукцию в стержнях и ярмах магнитопровода трансформатора.

В относительных единицах при $U_x = U_{ном}$ обычно $z_0^* \approx x_0^* = 33 \div 330$ и $r_0^* = 5 \div 65$. Последние числа относятся к мощным трансформаторам.

Сопротивления r_1 и x_1 в сотни раз меньше r_0 и x_0 . Для мощных трансформаторов с большой точностью можно считать, что параметры схемы замещения при холостом ходе определяются параметрами намагничивающего контура.

Из опыта холостого хода определяют коэффициент трансформации как отношение напряжений на первичной и вторичной обмотках при холостом ходе:

$$n_{12} = \frac{U_1}{U_2}. \quad (3)$$

1.2. Опыт короткого замыкания.

Опыт проводится при пониженном напряжении, приложенном к первичной обмотке, и замкнутой накоротко вторичной обмотке.

При этом $\dot{U}_2 = 0$, а токи примерно равны $\dot{I}_{ном}$. Уравнения при коротком замыкании:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1; 0 = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' z_2'; \dot{I}_1 = -\dot{I}_2'. \quad (4)$$

Так как намагничивающий ток $\dot{I}_0$ при пониженном напряжении не большой, в опыте короткого замыкания можно считать, что $\dot{I}_0 = 0$, откуда следует, что $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2'$.

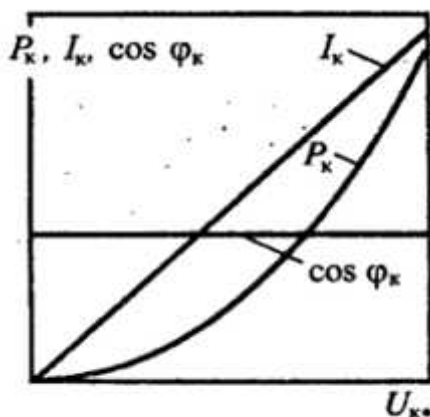


Рис. 5. Характеристики короткого замыкания трансформатора

Характеристики короткого замыкания показаны на рис. 5.

В опыте короткого замыкания трансформатор ненасыщен, поэтому ток I_k при увеличении напряжения изменяется по линейному закону.

Потери при коротком замыкании пропорциональны квадрату тока.

Коэффициент мощности $\cos \varphi$, остается постоянным при изменении напряже-

ния, так как соотношение между активной и реактивной составляющими остается, практически, неизменным.

Из опыта короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{m U_k I_k}; \quad (5)$$

$$z_k = \frac{U_k}{I_k}; \quad r_k = z_k \cos \varphi_k; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}. \quad (6)$$

Потери при коротком замыкании — это потери в меди.

Потерями в стали можно пренебречь, так как опыт проводится при напряжении в 10 — 20 раз меньшем, чем номинальное, а потери в стали пропорциональны квадрату напряжения.

Поэтому потери в стали в опыте короткого замыкания в 100÷400 раз меньше, чем при $U_{ном}$.

Потери короткого замыкания можно найти по формуле

$$P_k = m U_k I_k \cos \varphi_k = m I_k^2 r_k, \quad (7)$$

где $r_k = r_1 + r_2'$.

В теории трансформаторов важное значение имеет понятие о напряжении короткого замыкания.

Напряжение короткого замыкания u_k . — это такое напряжение, при котором в опыте короткого замыкания в обмотках трансформатора протекают номинальные токи.

Напряжение короткого замыкания определяется по следующей формуле

$$u_k = \frac{U_{к.ном}}{U_{1ном}} 100\%, \quad (8)$$

Напряжение короткого замыкания для силовых трансформаторов определяется ГОСТ и выбивается на паспортной табличке трансформатора, u_k определяет объем меди трансформатора, так как от сечения витков обмотки зависит активное сопротивление r_k .

Поэтому, чем больше u_k , тем меньше габариты трансформатора. При этом выше потери в меди и ниже КПД.

Напряжение короткого замыкания определяет значение ударных токов при коротком замыкании трансформатора при номинальном напряжении. На параллельную работу включаются трансформаторы, имеющие одинаковое u_k %.

2. Определение параметров схемы замещения расчетным путем.

Активные сопротивления обмоток трансформатора определяются по формуле:

$$r = \frac{\rho l}{S}, \quad (9)$$

где ρ - удельное сопротивление материала обмотки, Ом·м; l - длина обмотки, м; S - сечение проводника обмотки, м².

При проектировании трансформаторов сначала рассчитывают потери короткого замыкания, а затем определяют активные сопротивления первичной и вторичной обмоток.

Так как потери в меди $P_M = I^2 r$, то, заменяя ток через плотность тока и сечение проводника, получаем:

$$P_M = \Delta^2 S^2 \frac{\rho l}{S} = \Delta^2 S l \rho, \quad (10)$$

где Δ - плотность тока, А/м²; $S l$ - объем провода, м³.

Умножив и разделив правую часть (10) на плотность меди γ_M , получим потери в меди:

$$P_M = \frac{\Delta^2 (S l \gamma_M) \rho}{\gamma_M}. \quad (11)$$

Подставив в (11) $\gamma_M = 8,910^3$ кг/м³ и $\rho = 0,02135 \cdot 10^{-6}$ Ом м, получим

$$P_M = 2,4 \Delta^2 G_M \cdot 10^{-12}, \quad (12)$$

где G_M - масса меди обмотки, кг, $G_M = S l \gamma_M$, S - сечение обмотки; l - средняя длина витка обмотки.

Число витков на фазу обмотки низкого напряжения:

$$w_1 = \frac{U_\phi}{4,44 f B_{CT} S_{CT}}, \quad (13)$$

где U_ϕ - фазное напряжение обмотки низкого напряжения, В; f - частота, Гц; B_{CT} - индукция в стержне, Тл; S_{CT} - сечение стержня, м².

Полученное число витков из (13) округляется до целого числа.

Следует отметить, что ЭДС одного витка: $U_\phi = \frac{U_\phi}{w_1}$ в низковольтных

трансформаторах равна 1 — 1,5 В.

Однако при практических расчетах определяют общую массу обмоток и потери в обмотках, а затем находят $r_k = r_1 + r'_2$.

Активное сопротивление обмоток увеличивается примерно на 5% за счет влияния вихревых токов.

Раздельное определение индуктивных сопротивлений рассеяния x_1 и x'_2 представляет большие трудности, а для проектирования трансформаторов достаточно рассчитать $x_k = w L_k = x_1 + x'_2$.

При этом считают, что $x_1 \approx x'_2$.

Для определения активной и реактивной составляющих сопротивления взаимной индукции $z_{12} = r_{12} + jx_{12}$ необходимо знать активную I_{0a} и реактивную I_{0p} составляющие тока холостого хода.

Тогда активное r_{12} и реактивное x_{12} сопротивления ветви намагничивания по рис. 2 будут:

$$r_{12} = \frac{E_1}{I_{0a}}; \quad (14)$$

$$x_{12} = \frac{E_1}{I_{0p}}. \quad (15)$$

Для определения I_{0a} , предварительно рассчитывают потери в стали трансформатора, зная массу ярм и стержней и удельные потери при заданной индукции:

$$I_{0a} = \frac{\sum p_m G_m}{m E_1}, \quad (16)$$

где p_m - удельные потери при данной индукции, Вт/кг; G_m - масса участка магнитной цепи, для которой принимаются удельные потери.

Для вычисления реактивной составляющей I_{0p} тока холостого хода необходимо предварительно определить реактивную намагничивающую мощность $\sum p_p G_m$, а затем ток

$$I_{0p} = \frac{\sum p_p G_m}{m E_1}, \quad (17)$$

где p_p - удельная намагничивающая мощность, ВА/кг.

Значения удельных потерь p_m и удельной намагничивающей мощности P_p находят по соответствующим таблицам в зависимости от индукции каждого участка магнитопровода.

3. Внешняя характеристика трансформатора.

Внешней характеристикой трансформатора называют зависимость $U'_2 = f(I'_2)$ или $U'_2 = f(\quad)$ при $U_1 = U_{ном} = const$, $f_{ном} = const$, $\cos \varphi_2 = const$.

Для ее построения может быть использована формула

$$U'_2 = U_{ном} - \Delta U = U_{ном} \left[1 - \frac{\beta}{100} (u_{к.а\%} \cos \varphi_2 + u_{к.р\%} \sin \varphi_2) - \frac{2}{20000} (u_{к.р\%} \cos \varphi_2 + u_{к.а\%} \sin \varphi_2)^2 \right]. \quad (18)$$

В пределах изменения коэффициента нагрузки β от 0 до 1 внешние характеристики практически прямолинейны (рис. 6).

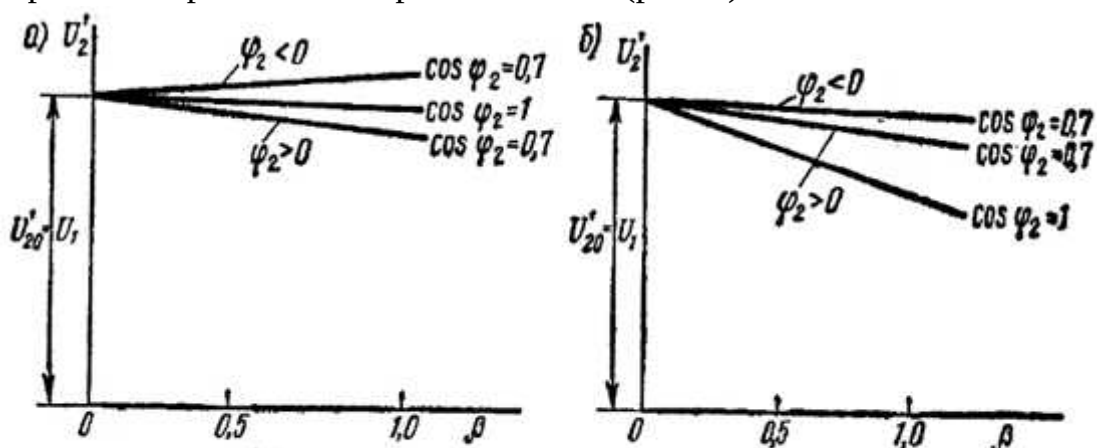


Рис. 6. Внешние характеристики трансформаторов большой (а) и малой (б) мощности

Напряжение короткого замыкания $u_{к\%}$, его составляющие $u_{к.а\%}$ и $u_{к.р\%}$ зависят в определенной степени от номинальной мощности трансформатора.

В трансформаторах средней и большой мощности реактивная составляющая напряжения короткого замыкания значительно больше, чем активная.

Поэтому в таких трансформаторах реактивная нагрузка вызывает большее изменение напряжения U_2' , чем активная, т.е. при активно-индуктивной нагрузке чем меньше $\cos\varphi_2$, тем ниже проходит внешняя характеристика (рис. 6, а) и напряжение $U_2' < U_1$.

При активно-емкостной нагрузке оно может при некоторых углах φ_2 стать большим U_1 .

В трансформаторах небольшой мощности активное падение напряжения обычно больше, чем реактивное. Поэтому в них активная нагрузка вызывает большее изменение напряжения, чем реактивная.

При активно-индуктивной нагрузке, чем меньше $\cos\varphi_2$, тем выше располагаются внешние характеристики; при активно-емкостной же нагрузке они располагаются выше, чем при активной (см. рис. 6, б) и активно-индуктивной.

Меры по уменьшению падения напряжения.

Наличие индуктивных падений напряжения, вызываемых потоками рассеяния, ведет к нежелательному изменению напряжения трансформатора под нагрузкой.

Чтобы уменьшить потоки рассеяния, первичные и вторичные обмотки выполняют на одних и тех же стержнях, по возможности приближая одну обмотку к другой.

Наиболее распространена концентрическая обмотка, в которой катушки первичной и вторичной обмоток имеют одинаковую высоту и одна из них охватывает другую.

Поэтому сближение обмоток ведет к уменьшению потоков рассеяния. Минимальное расстояние между обмотками ограничивается электрической прочностью изоляционного промежутка.

Вследствие этого высоковольтные трансформаторы, в которых изоляционный промежуток больше, имеют относительно большие потоки рассеяния и напряжения короткого замыкания, чем низковольтные трансформаторы.

4. Коэффициент полезного действия трансформатора.

При передаче электрической энергии из первичной обмотки трансформатора во вторичную в нем возникают потери энергии.

Коэффициентом полезного действия трансформатора называют отношение отдаваемой мощности P_2 к мощности P_1 , поступающей в первичную обмотку:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1} \quad (19)$$

Учитывая, что

$$P_2 = P_1 - \Delta P,$$

где $\Delta P = \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} + \Delta P_m$ - суммарные потери в трансформаторе, формулу (19) можно преобразовать:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1}. \quad (20)$$

Определение потерь мощности.

Высокие значения КПД электрических машин не позволяют определять его с достаточной точностью путем непосредственного измерения мощностей P_1 и P_2 .

Поэтому согласно требованиям ГОСТа его вычисляют косвенным методом по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

Этот метод дает более высокую точность, так как при указанных опытах трансформатор не отдает мощность нагрузке, а следовательно, мощность, поступающая в первичную обмотку, целиком расходуется на компенсацию имеющихся в нем потерь.

При опыте холостого хода ток I_0 невелик и электрическими потерями мощности, создаваемыми им в первичной обмотке, можно пренебречь.

В то же время магнитный поток практически равен магнитному потоку при нагрузке, так как его величина определяется приложенным к трансформатору напряжением.

Потери в стали пропорциональны квадрату величины магнитного потока.

Следовательно, с достаточной точностью можно считать, что магнитные потери в стали равны мощности, потребляемой трансформатором при холостом ходе и номинальном первичном напряжении, т. е.

$$\Delta P_m \approx P_0. \quad (21)$$

Для определения суммарных электрических потерь положим, согласно упрощенной схеме замещения, что $I'_2 = I_1$.

При этом

$$\Delta P_{эл} = I_1^2 r_1 + I_2'^2 r_2' \approx I_2'^2 (r_1 + r_2') \approx I_2'^2 r_k', \quad (22)$$

или

$$\Delta P_{эл} \approx I_{2ном}'^2 r_k \approx \Delta P_{эл.ном}, \quad (23)$$

где $\Delta P_{эл.ном}$ - электрические потери при номинальной нагрузке.

Величина $\Delta P_{эл.ном} \approx I_{2ном}'^2 r_k \approx I_{1ном}^2 r_k$ может быть с достаточной степенью точности принята равной мощности P_k , потребляемой трансформатором при опыте короткого замыкания, который проводится при номинальном токе нагрузки.

При этом магнитные потери в стали ΔP_m весьма малы (по сравнению с потерями $\Delta P_{эл}$) из-за сильного уменьшения напряжения U_1 , а следовательно, и магнитного потока трансформатора, и ими можно пренебречь.

Таким образом,

$$\Delta P_{эл} \approx P_k. \quad (24)$$

Полные потери:

$$\Delta P = P_0 + P_k. \quad (25)$$

Подставляя полученное значение ΔP в (25) и учитывая, что

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \approx I_{ном} U_{ном} \cos \varphi_2 = S_{ном} \cos \varphi_2,$$

найдем

$$\eta = 1 - \frac{P_k + P_0}{S_{ном} \cos \varphi_2 + P_k + P_0}. \quad (26)$$

Эта формула рекомендуется ГОСТом для определения КПД трансформатора. Значения P_0 и P_k для силовых трансформаторов приведены в соответствующих стандартах и каталогах.

На рис. 7 приведены кривые зависимости КПД от нагрузки для трансформаторов средней и большой мощности.

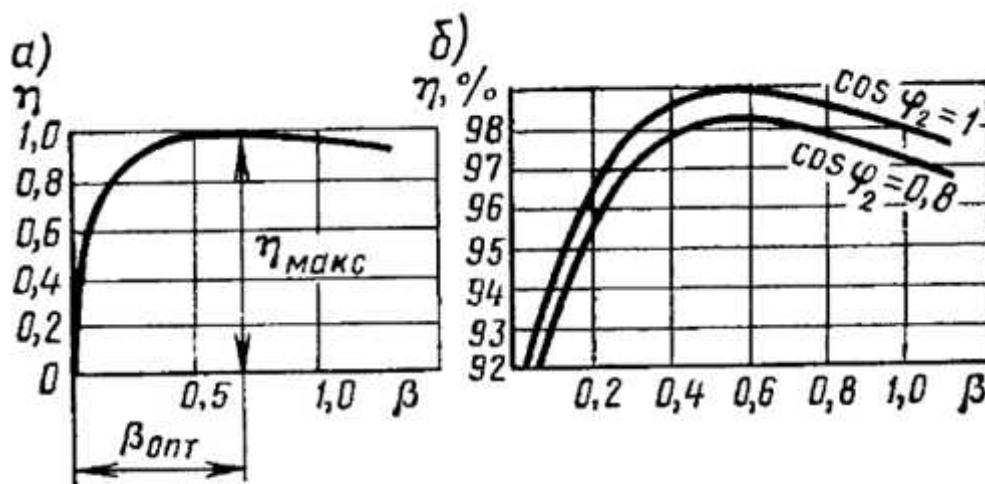


Рис. 7. Кривые изменения кпд трансформатора в зависимости от нагрузки:

а - при неизменном значении $\cos \varphi_2$;

б - при различном значении $\cos \varphi_2$

При $\beta = 0$ полезная мощность и КПД равны нулю. С ростом отдаваемой мощности КПД увеличивается, так как в энергетическом балансе уменьшается удельное значение магнитных потерь в стали, имеющих постоянное значение.

При некотором значении $\beta_{\text{опт}}$ КПД достигнет максимума, после чего начнет уменьшаться с ростом нагрузки.

Причиной этого является сильное увеличение электрических потерь в обмотках, возрастающих пропорционально квадрату тока, т. е. пропорционально β^2 , в то время как полезная мощность P_2 растет только пропорционально β .

Максимальная величина к.п.д. в мощных трансформаторах достигает весьма высоких значений (0,98 — 0,99).

В трансформаторах малой мощности она может снижаться до 0,6 при $S_{\text{НОМ}}$ до 10 ВА.

КПД имеет максимум при такой нагрузке, когда электрические потери в обмотках равны магнитным потерям в стали.

При уменьшении $\cos \varphi_2$ КПД снижается (рис. 7, б), так как возрастают токи I_2 и I_1 при которых трансформатор будет иметь заданную мощность P_2 .

Лекция 6

Тема: Параллельная работа трансформаторов.

Учебные вопросы:

Введение.

1. Условия параллельной работы.

2. Условие одинаковости групп соединений обмоток.

3. Условие равенства коэффициентов трансформации.
4. Условие равенства напряжений короткого замыкания.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь 1983г.
5. Кацман М.М. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 364 с.

Введение.

Один мощный трансформатор делать выгоднее, чем несколько трансформаторов на ту же суммарную мощность.

В мощном трансформаторе меньше расход активных материалов и выше энергетические показатели.

Однако часто в энергетических установках необходимо включать несколько трансформаторов на параллельную работу.

Параллельная работа трансформаторов необходима по тем же причинам, что и параллельная работа генераторов:

- 1) обеспечение резервирования в энергоснабжении потребителей в случае аварии и необходимости ремонта трансформаторов;
- 2) уменьшение потерь энергии в периоды малых нагрузок подстанции путем отключения части параллельно работающих трансформаторов.

1. Условия параллельной работы.

Как и при параллельной работе генераторов, для достижения наилучших условий параллельной работы трансформаторов необходимо, чтобы общая нагрузка подстанции распределялась между параллельно работающими трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям.

Такое распределение , нагрузки достигается при условиях, когда параллельно работающие трансформаторы имеют:

- 1) одинаковые группы соединений обмоток;
- 2) равные первичные и вторичные номинальные напряжения или, что тоже самое, равные коэффициенты трансформации;
- 3) равные напряжения короткого замыкания.

Если первые два из этих условий соблюдены, то вторичные напряжения соответствующих фаз параллельно включенных трансформаторов на холостом ходу, когда вторичные обмотки разомкнуты, будут равны по значению и по фазе.

Поэтому при включении вторичных обмоток на общие шины в этих обмотках при отсутствии нагрузки не возникает никаких токов.

В противном случае уже на холостом ходу возникают уравнивающие токи $I_{y\Pi}$, которые будут циркулировать по замкнутым контурам, образуемым вторичными обмотками параллельно включенных трансформаторов, и трансформироваться также в первичные обмотки.

На рис. 1, такие токи показаны штриховыми стрелками.

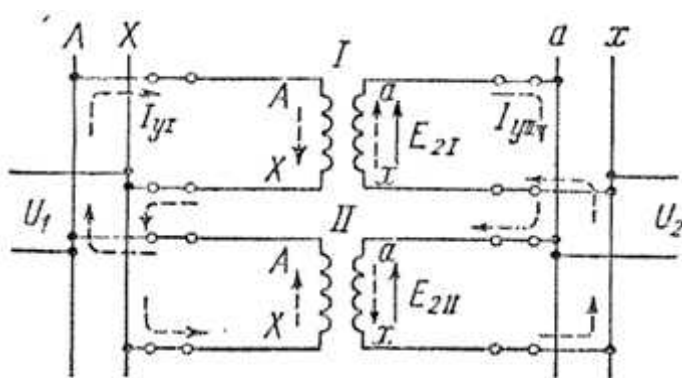


Рис. 1. Схема параллельной работы однофазных двухобмоточных трансформаторов

Уравнивающие токи, если они даже и не очень велики и поэтому не приводят к аварии, складываясь при подключении потребителей с токами нагрузки, вызывают неравномерную нагрузку, а также излишние потери и нагрев трансформаторов.

Допускается включение на параллельную работу трансформаторов с коэффициентами трансформации, отличающимися не более чем на 1 %. При этих условиях уравнивающие токи будут незначительными.

Соблюдение третьего из указанных условий обеспечивает равномерное распределение нагрузки между трансформаторами.

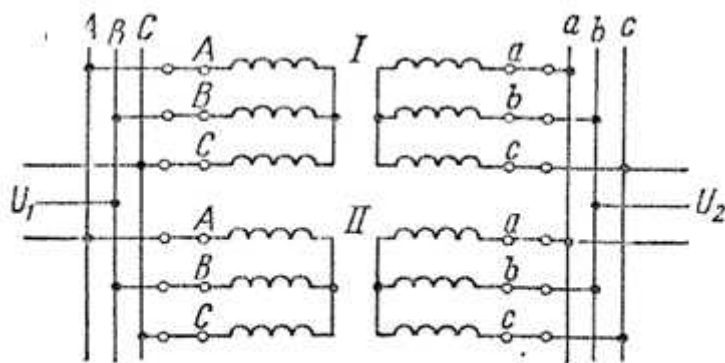


Рис. 2. Схема параллельной работы трёхфазных двухобмоточных трансформаторов

Отметим, что при первом включении трансформаторов на параллельную работу необходимо проверить их фазировку, т.е. убедиться в том, что на одну и ту же шину включаются такие фазы отдельных трансформаторов, на-

пряжения которых совпадают по фазе (рис. 2).

Выясним влияние отклонений от указанных выше условий на параллельную работу трансформаторов. При этом будем пренебрегать намагничивающим током трансформаторов и пользоваться упрощенной схемой замещения.

2. Условие одинаковости групп соединений обмоток.

Допустим, что на параллельную работу включены два трансформатора – с соединениями обмоток $Y/\Delta - 11$ и $Y/Y - 0$, имеющие одинаковые первичные и вторичные номинальные напряжения.

Тогда вторичные э. д. с. E_2 соответствующих фаз этих трансформаторов будут равны по значению, но сдвинуты по фазе на 30° (рис. 3).

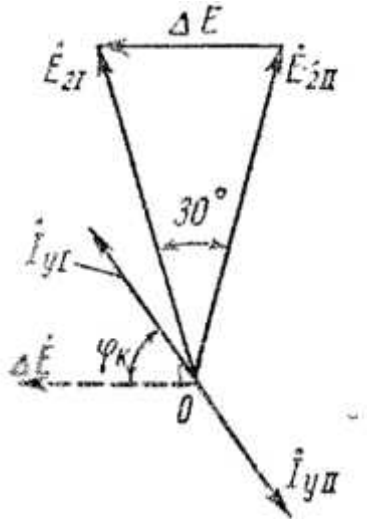


Рис. 3. Уравнительные токи при параллельной работе трансформаторов $Y/\Delta - 11$ и $Y/Y - 0$

В замкнутом контуре вторичных обмоток действует разность этих ЭДС

$$\Delta E = 2E_2 \sin 15 = 0,518E_2.$$

Уравнительный ток течет только по первичным и вторичным обмоткам трансформаторов и ограничивается по значению только сопротивлениями этих обмоток, т. е. сопротивлениями короткого замыкания трансформаторов. Поэтому

$$I_y = \frac{\Delta \dot{E}}{Z_{KI} + Z_{KII}} \quad (1)$$

Если, например, мощности трансформаторов равны и $Z_{KI*} = Z_{KII*} = u_{KI*} = u_{KII*} = 0,05$ то относительное значение уравнительного тока будет

$$I_{y*} = \frac{0,518}{2 \cdot 0,5} = 5,18 \text{ т. е. этот ток будет в } 5,18$$

раза больше номинального. Наличие такого тока почти равносильно короткому замыканию.

Таким образом, параллельное включение трансформаторов с различными группами соединений обмоток недопустимо.

3. Условие равенства коэффициентов трансформации.

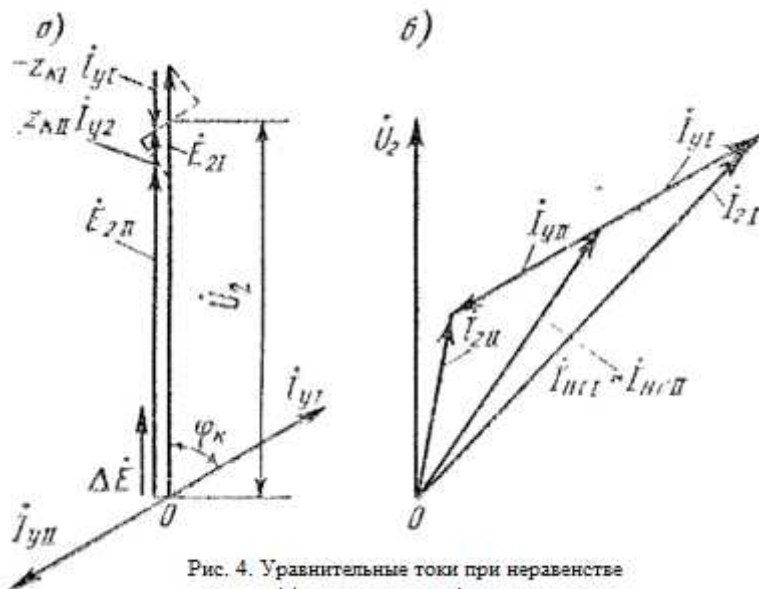


Рис. 4. Уравнительные токи при неравенстве коэффициентов трансформации

Пусть, например, у двух однофазных трансформаторов (см. рис. 1)

первичные и вторичные номинальные напряжения не равны и поэтому $E_{2I} > E_{2II}$ (рис. 4, а).

В замкнутом контуре вторичных обмоток действует разность этих ЭДС $\Delta \dot{E} = \dot{E}_{2I} - \dot{E}_{2II}$ и возникает уравнительный ток, определяемый равенством (1).

Этот ток имеет во вторичных обмотках трансформаторов различные относительно действующих в них ЭДС направления (рис. 1 и 4, а): трансформатор *I* отдает ток I_{yI} , а трансформатор *II* потребляет ток I_{yII} .

Падения напряжения, вызываемые уравнительными токами в обмотках трансформаторов, выравнивают вторичные напряжения обмоток (рис. 4, а).

При включении нагрузки в трансформаторах возникают токи нагрузки $\dot{I}_{нI}$ и $\dot{I}_{нII}$. Складываясь с ними, уравнительные токи вызывают неравенство результирующих токов $\dot{I}_{2I}$, $\dot{I}_{2II}$ и неравномерную нагрузку трансформаторов (рис. 4, б).

В качестве примера допустим, что параллельно работают два трансформатора одинаковой мощности и $Z_{кI*} = Z_{кII*} = 0,055$, а их коэффициенты трансформации различаются на 1%.

Тогда $\Delta E = 0,01U_n$ и, согласно формуле (1),

$$I_{y*} = \frac{\Delta E_*}{Z_{кI*} + Z_{кII*}} = \frac{0,01}{2 \cdot 0,055} = 0,091,$$

т. е. уравнительный ток составляет довольно значительную величину.

По ГОСТ в общем случае допускается отличие коэффициентов трансформации от паспортных значений на 0,5 %, а для трансформаторов с $k > 3$ – на 1 %. Допускается параллельная работа трансформаторов с такими различиями коэффициентов трансформации.

4. Условие равенства напряжений короткого замыкания.

Рассмотрим параллельную работу трех трансформаторов с одинаковыми группами соединений и номинальными напряжениями обмоток.

Получаемые при этом результаты можно легко распространить на любое число параллельно работающих трансформаторов.

Пренебрегая намагничивающими токами и используя упрощенную схему замещения, можно представить схему параллельной работы трех трансформаторов в виде, изображенном на рис. 5.

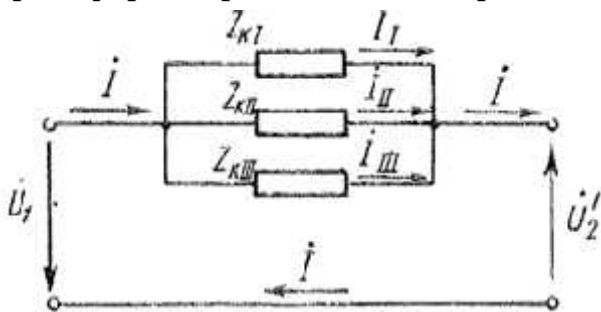


Рис. 5. Упрощенная схема параллельной работы трансформаторов с одинаковыми группами соединений и коэффициентами трансформации, но при разных u_k

Падения напряжения $\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}'_2 = \dot{U}'_{20} - \dot{U}'_2$ будут у всех трех трансформаторов одинаковы:

$$\Delta \dot{U} = Z \dot{I}, \quad (2)$$

где $\dot{I}$ общий ток нагрузки и

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_{кI}} + \frac{1}{Z_{кII}} + \frac{1}{Z_{кIII}}} = \frac{1}{\sum_n \frac{1}{Z_{кn}}} \quad (3)$$

Токи отдельных трансформаторов

$$\dot{I}_I = \frac{a\dot{U}}{Z_{\kappa I}} = \frac{\dot{I}}{Z_{\kappa I} \sum_n \frac{1}{Z_{\kappa n}}}; \quad \dot{I}_{II} = \frac{\dot{I}}{Z_{\kappa II} \sum_n \frac{1}{Z_{\kappa n}}}; \quad \dot{I}_{III} = \frac{\dot{I}}{Z_{\kappa III} \sum_n \frac{1}{Z_{\kappa n}}}. \quad (4)$$

В общем случае эти токи не совпадают по фазе, так как аргументы $\varphi_{\kappa I}, \varphi_{\kappa II}, \varphi_{\kappa III}$ комплексов сопротивлений короткого замыкания

$$Z_{\kappa I} = z_{\kappa I} e^{j\varphi_{\kappa I}}; Z_{\kappa II} = z_{\kappa II} e^{j\varphi_{\kappa II}}; Z_{\kappa III} = z_{\kappa III} e^{j\varphi_{\kappa III}} \quad (5)$$

могут быть неравными. При этом, например,

$$\frac{\dot{I}_I}{\dot{I}_{II}} = \frac{z_{\kappa II}}{z_{\kappa I}} e^{j(\varphi_{\kappa II} - \varphi_{\kappa I})}$$

т. е. $\dot{I}_I$ и $\dot{I}_{II}$ сдвинуты по фазе на угол $\varphi_{\kappa II} - \varphi_{\kappa I}$.

Однако в обычных условиях эти сдвиги по фазе незначительны и с большой точностью

$$I_I + I_{II} + I_{III} = I \quad (6)$$

Поэтому и арифметическая сумма полных мощностей трансформаторов с большой точностью равна полной мощности нагрузки S .

Вследствие изложенного, комплексные величины в выражениях (3) и (4) можно заменить их модулями.

Согласно определению,

$$z_{\kappa I*} = \frac{z_{\kappa I} I_{Ih}}{U_h},$$

откуда получим

$$z_{\kappa I} = z_{\kappa I*} \frac{U_h}{I_{Ih}} = \frac{u_{\kappa I\%}}{100} \frac{U_h}{I_{Ih}} \quad (7)$$

и аналогичные выражения для $z_{\kappa II}$ и $z_{\kappa III}$.

Подставим эти выражения для z_{κ} в (4) и заменим токи на пропорциональные им полные мощности, умножив (4) на величину mU_h .

Тогда

$$mU_h I_I = \frac{mU_h I}{\frac{u_{\kappa I\%}}{100} \frac{U_h}{I_{Ih}} \frac{m}{\sum_n \frac{100 I_{hn}}{u_{\kappa n\%} U_h}}}$$

или

$$S_I = \frac{S}{\frac{u_{\kappa I\%}}{S_{hI}} \sum_n \frac{S_{hn}}{u_{\kappa n\%}}} \quad (8)$$

В относительных единицах

$$\begin{aligned}
S_{I*} &= \frac{S_I}{S_{нI}} = \frac{S}{u_{кI\%} \sum_n \frac{S_{нп}}{u_{кп\%}}}; \\
S_{II*} &= \frac{S_{II}}{S_{нII}} = \frac{S}{u_{кII\%} \sum_n \frac{S_{нп}}{u_{кп\%}}}; \\
S_{III*} &= \frac{S_{III}}{S_{нIII}} = \frac{S}{u_{кIII\%} \sum_n \frac{S_{нп}}{u_{кп\%}}}.
\end{aligned} \tag{9}$$

На основании равенств (9)

$$S_{I*} : S_{II*} : S_{III*} = \frac{1}{u_{кI\%}} : \frac{1}{u_{кII\%}} : \frac{1}{u_{кIII\%}}, \tag{10}$$

т.е. относительные нагрузки трансформаторов обратно пропорциональны их напряжениям короткого замыкания.

Если $u_{кI\%} = u_{кII\%} = u_{кIII\%}$ то $S_{I*} = S_{II*} = S_{III*}$, т.е. трансформаторы нагружаются равномерно и при увеличении нагрузки достигают номинальной мощности одновременно.

Очевидно, что при этом условия параллельной работы являются наилучшими. Если же $u_{к\%}$ не равны, то при повышении нагрузки номинальной мощности, прежде всего, достигнет трансформатор с наименьшим $u_{к\%}$.

Другие трансформаторы при этом будут еще недогружены, и в то же время дальнейшее увеличение общей нагрузки недопустимо, так как первый трансформатор будет перегружаться.

Установленная мощность трансформаторов останется, таким образом, недоиспользованной.

Рекомендуется включать на параллельную работу такие трансформаторы, для каждого из которых значение $u_{к\%}$ отличается от арифметического среднего значения $u_{к\%}$ всех этих трансформаторов не более чем на $\pm 10\%$ и отношение номинальных мощностей которых находится в пределах 3:1. Допустимые перегрузки трансформаторов нормируются ГОСТ.

ЛЕКЦИЯ 7

Тема: Многообмоточные трансформаторы

Учебные вопросы:

Введение.

1. Трехобмоточные трансформаторы.
2. Двухобмоточные трансформаторы с расщепленной обмоткой.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам.- Севастополь, 1983.

Введение.

Многообмоточным называют трансформатор, на магнитопроводе которого располагается более двух электрически не связанных обмоток.

В энергетических системах применяются главным образом трехобмоточные трансформаторы, связывающие электрические сети с тремя различными напряжениями U_1 , U_2 и U_3 .

Применяются как однофазные трехобмоточные трансформаторы (рис. 1), так и трехфазные трех-

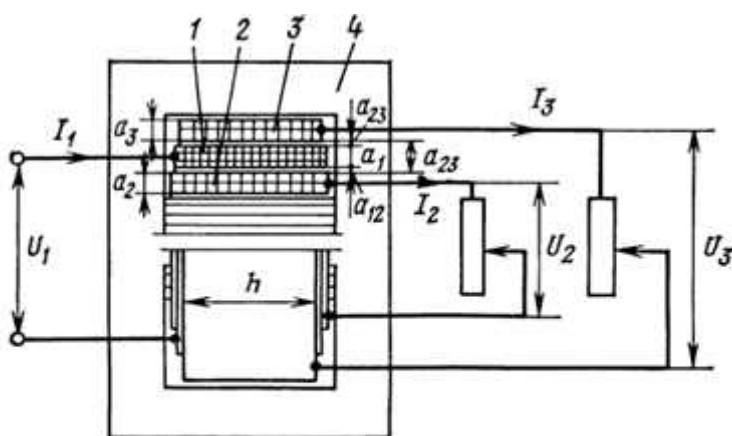


Рис. 1. Схема однофазного трансформатора
1 - первая обмотка; 2 - вторая обмотка; 3 - третья обмотка;
4 - бронестержневой магнитопровод

обмоточные трансформаторы, которые могут иметь схемы и группы соединений обмоток: $Y_0/Y_0/\Delta-0-11$ (рис. 2) и $Y_0/\Delta/\Delta-11-11$.

1. Трехобмоточные трансформаторы

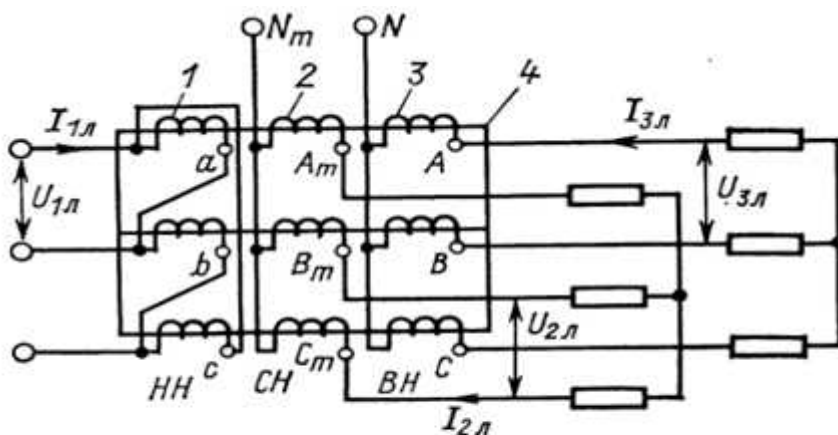


Рис. 2. Схема трёхфазного трёхобмоточного трансформатора $Y_0/Y_0/\Delta-0-11$
1 - первая трёхфазная обмотка НН; 2 - вторая трёхфазная обмотка СН;
3 - третья трёхфазная обмотка ВН; 4 - стержневой магнитопровод

Трехобмоточные трансформаторы могут иметь либо одну первичную обмотку (1) и две вторичные (2 и 3), либо две первичные (1 и 2) и одну вторичную (3).

В дальнейшем рассматривается трансформатор с одной первичной

и двумя вторичными обмотками.

Трехобмоточный трансформатор заменяет собой два двухобмоточных трансформатора, один из которых связывает сеть 1 с сетью 2, другой — сеть 1 с сетью 3.

Экономически трехобмоточный трансформатор выгоднее, чем два двухобмоточных: его изготовление обходится дешевле, на подстанции он занимает меньше места, причем он допускает не только передачу энергии из первичной сети 1 в любую из вторичных (2 или 3), но и непосредственную (с помощью одной трансформации) передачу энергии из одной из вторичных сетей в другую вторичную сеть (например, из 2 в 3).

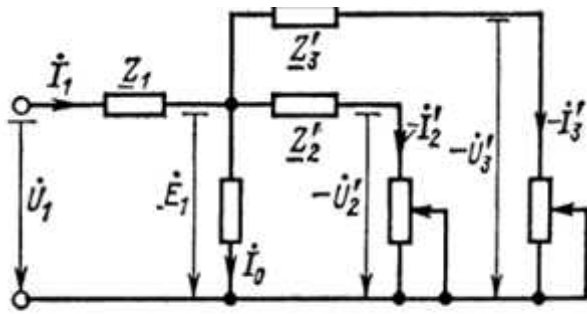


Рис. 3. Схема замещения трёхобмоточного трансформатора

При использовании двух двухобмоточных трансформаторов такого рода передача энергии требует двух трансформаций (сначала из 2 сети в 1, а затем из 1 в 3) и потери энергии получаются примерно в 2 раза большими.

К числу недостатков трехобмоточного трансформатора относится его несколько меньшая надежность (при повреждении одной из его обмоток он полностью выходит из строя, в то время как при неисправности в одном из двухобмоточных трансформаторов второй может эксплуатироваться).

Электромагнитные процессы в трехобмоточном трансформаторе могут быть описаны по аналогии с двухобмоточным трансформатором.

Предварительно необходимо привести все величины второй и третьей обмотки к числу витков первичной обмотки:

$$I'_2 = I_2 \frac{w_2}{w_1}; I'_3 = I_2 \frac{w_3}{w_1}; U'_2 = U_2 \frac{w_1}{w_2}; U'_3 = U_3 \frac{w_1}{w_3};$$

$$Z'_2 = Z_2 \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2; Z'_3 = Z_3 \left(\frac{w_1}{w_3} \right)^2.$$

Поле взаимной индукции образуется намагничивающим током I_0 который определяется из уравнения токов

$$I_1 + I'_2 + I'_3 = I_0 \quad (1)$$

Электродвижущая сила взаимной индукции

$$-E_1 = -E'_2 = -E'_3 = Z_0 I_0 \quad (2)$$

где $Z_0 = R_0 + jX_0$ — сопротивление взаимной индукции.

Поле рассеяния образуется взаимно уравновешенной системой токов $I'_1; I'_2; I'_3$ где $I'_1 = I_1 - I_0$

Электродвижущие силы поля рассеяния в каждой из обмоток

$$\dot{E}_{\pm 1} = -jX_1 \dot{I}'_1 \approx -jX_1 \dot{I}_1; \quad \dot{E}_{\pm 2} = -jX'_2 \dot{I}'_2; \quad \dot{E}_{\pm 3} = -jX'_3 \dot{I}'_3,$$

где X_1, X'_2, X'_3 — эквивалентные индуктивные сопротивления рассеяния обмоток, найденные с учетом влияния токов в других обмотках.

Уравнения напряжений обмоток формально записываются так же, как уравнения напряжений двухобмоточного трансформатора

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\pm 1} + R_1 \dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + Z_1 \dot{I}_1; \\ -\dot{E}'_2 &= -\dot{U}'_2 + \dot{E}'_{\pm 2} - R'_2 \dot{I}'_2 = -\dot{U}'_2 + Z'_2 (-\dot{I}'_2); \\ -\dot{E}'_3 &= -\dot{U}'_3 + \dot{E}'_{\pm 3} - R'_3 \dot{I}'_3 = -\dot{U}'_3 + Z'_3 (-\dot{I}'_3), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $Z_1 = R_1 + jX_1; Z'_2 = R'_2 + jX'_2; Z'_3 = R'_3 + jX'_3$.

Системе уравнений (1) — (3) соответствует схема замещения на рис. 3.

Сопротивление взаимной индукции Z_0 рассчитывается или определяется экспериментально таким же образом, как в двухобмоточном трансформаторе.

Сопротивления Z_1, Z'_2, Z'_3 выражаются через сопротивления короткого замыкания $Z_{K12}, Z_{K13}, Z_{K23}$ определенные из опытов короткого замыкания по рис. 4.

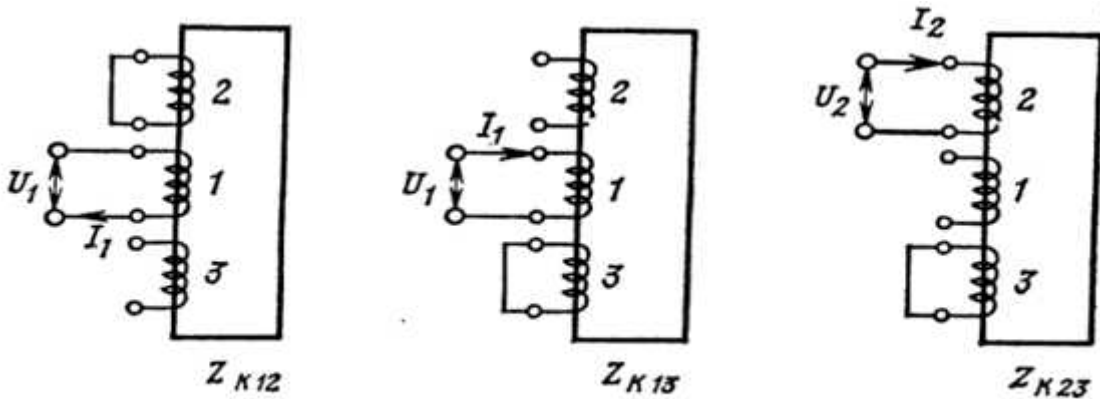


Рис. 4. Опыты короткого замыкания однофазного трёхобмоточного трансформатора

Сопротивление $Z_{K12} = R_{K12} + jX_{K12}$ определяется при разомкнутой обмотке 3.

Сопротивление $Z_{K13} = R_{K13} + jX_{K13}$ определяется при разомкнутой обмотке 2.

Сопротивление $Z_{K23} = R_{K23} + jX_{K23}$ определяется при питании обмотки 2 и разомкнутой обмотке 1, это сопротивление приводится к обмотке 1 по формуле

$$Z'_{K23} = Z_{K23} \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \quad \text{Замечаем, что}$$

$$Z_{\kappa 12} = Z_1 + Z'_2; Z_{\kappa 23} = Z_1 + Z'_3; Z'_{\kappa 23} = Z'_2 + Z'_3.$$

Решая эти уравнения относительно Z_1, Z'_2, Z'_3 получаем:

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= \frac{1}{2}(Z_{\kappa 12} + Z_{\kappa 13} - Z'_{\kappa 23}); \\ Z'_2 &= \frac{1}{2}(Z_{\kappa 12} + Z'_{\kappa 23} - Z_{\kappa 13}); \\ Z'_3 &= \frac{1}{2}(Z_{\kappa 13} + Z'_{\kappa 23} - Z_{\kappa 12}). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Активные составляющие этих сопротивлений представляют собой активные сопротивления соответствующих обмоток R_1, R'_2, R'_3 , а их реактивные составляющие имеют смысл эквивалентных индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \frac{1}{2}(X_{\kappa 12} + X_{\kappa 13} - X'_{\kappa 23}); \\ X'_2 &= \frac{1}{2}(X_{\kappa 12} + X'_{\kappa 23} - X_{\kappa 13}); \\ X'_3 &= \frac{1}{2}(X_{\kappa 13} + X'_{\kappa 23} - X_{\kappa 12}). \end{aligned} \right\}$$

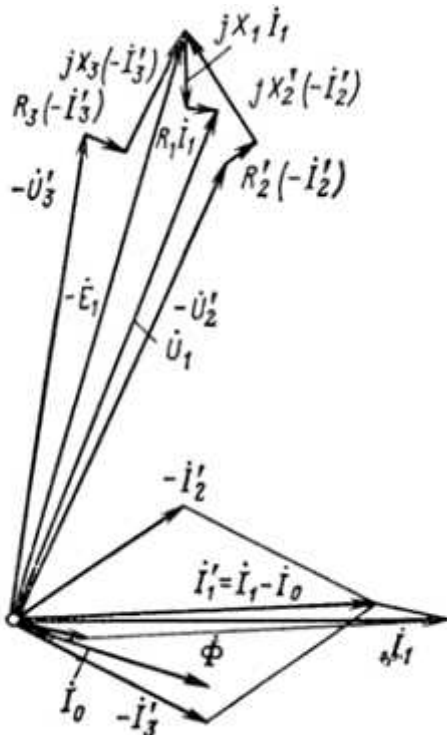


Рис. 5. Векторная диаграмма трёхобмоточного трансформатора

Вторичные напряжения трансформатора при нагрузке могут быть определены аналитически с помощью (1), (3) или графически путем построения векторной диаграммы, приведенной на рис. 5.

Полагая, что $\dot{I}_0 \ll \dot{I}_1$, и считая заданными первичное напряжение $\dot{U}_{1н}$ и токи $\dot{I}_2, \dot{I}_3$, можно найти $\dot{E}_1, \dot{U}'_2, \dot{U}'_3$ и оценить изменения напряжения на второй и третьей обмотках:

$$\Delta u_2 = \frac{U'_2 - U_{1н}}{U_{1н}}; \Delta u_3 = \frac{U'_3 - U_{1н}}{U_{1н}}.$$

Из схемы замещения или из векторной диаграммы видно, что при $Z_1 \neq 0$ напряжение U'_2 зависит не

только от тока I'_2 , но и от тока I'_3 (соответственно U'_3 зависит не только от

тока I'_3 , но и от тока I'_2), что, вообще говоря, нежелательно для потребителей электроэнергии.

С целью уменьшения этого влияния следует уменьшить сопротивление за счет его реактивной составляющей X_1 .

Это может быть достигнуто при размещении обмотки 1 между обмотками 2 и 3, как на рис. 1.

Выражая индуктивные сопротивления короткого замыкания через размеры обмоток

$$\left. \begin{aligned} X_{\kappa 12} &\approx \frac{a_1 + a_2}{3} + a_{12}; \\ X_{\kappa 13} &\approx \frac{a_1 + a_3}{3} + a_{13}; \\ X'_{\kappa 23} &\approx \frac{a_2 + a_3}{3} + a_{23}. \end{aligned} \right\}$$

где $a_{23} = a_1 + a_{13} + a_{12}$ замечаем, что при таком размещении обмоток сопротивление X_1 получается отрицательным (как на диаграмме по рис. 5) и очень небольшим по абсолютному значению

$$X_1 = \frac{1}{2}(X_{\kappa 12} + X_{\kappa 13} - X'_{\kappa 23}) \approx \frac{2a_1}{3};$$

$$a_{12} + a_{13} - a_{23} = -\frac{a_1}{3} < 0.$$

Трехобмоточные трансформаторы выпускаются с различным соотношением номинальных мощностей обмоток. Стандартом предусматриваются следующие соотношения мощностей (в долях мощности первичной обмотки):

$S_{1н} / S_{1н}$	$S_{2н} / S_{1н}$	$S_{3н} / S_{1н}$
1	1	1
1	1	2/3
1	2/3	2/3

Соотношению мощностей должны соответствовать соотношения между приведенными токами. Обязательно соблюдение условия $\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2 - \dot{I}'_3$ (см. рис. 5).

Однако при этом сумма вторичных токов может быть больше первичного тока $I'_2 + I'_3 \geq I_1$ и соответственно сумма вторичных мощностей может превышать первичную мощность

$$I'_2 U_1 + I'_3 U_1 \geq I_1 U_1 \quad \text{или} \quad S_2 + S_3 \geq S_1$$

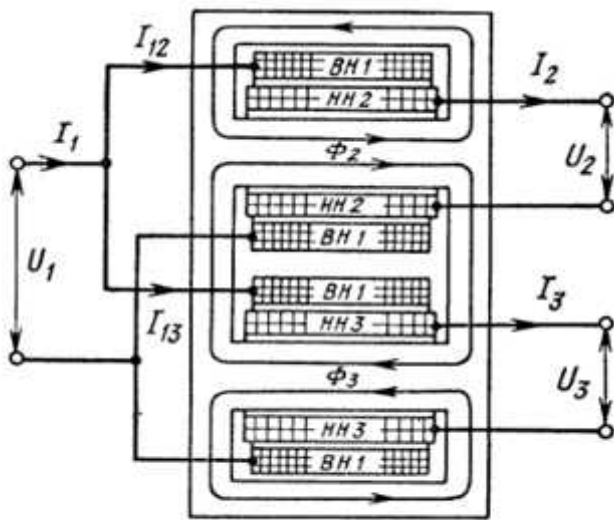


Рис. 6. Схем двухобмоточного однофазного трансформатора с расщепленной обмоткой НН

Правда, это превышение должно находиться в пределах, предусмотренных стандартом (в первом варианте $S_2 + S_3 \leq 2S_1$; во втором $S_2 + S_3 \leq 1\frac{2}{3}S_1$ в третьем $S_2 + S_3 \leq 1\frac{1}{3}S_1$).

В то же время баланс активных и реактивных мощностей конечно должен соблюдаться:

$$P_1 = P_2 + P_3 + \sum P;$$

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + \sum Q,$$

где $\sum P, \sum Q$ - потери активной и

реактивной мощностей в самом трансформаторе.

2. Двухобмоточные трансформаторы с расщепленной первичной (или вторичной) обмоткой

Такое название получили трансформаторы с одной первичной (или вторичной) обмоткой и с расщепленной вторичной (или первичной) обмоткой.

Поскольку расщепленная обмотка состоит из двух самостоятельных электрически не связанных частей, такой трансформатор по-существу является многообмоточным и отличается от трехобмоточного лишь тем, что в нем не требуется осуществлять передачу энергии из одной части расщепленной обмотки в другую.

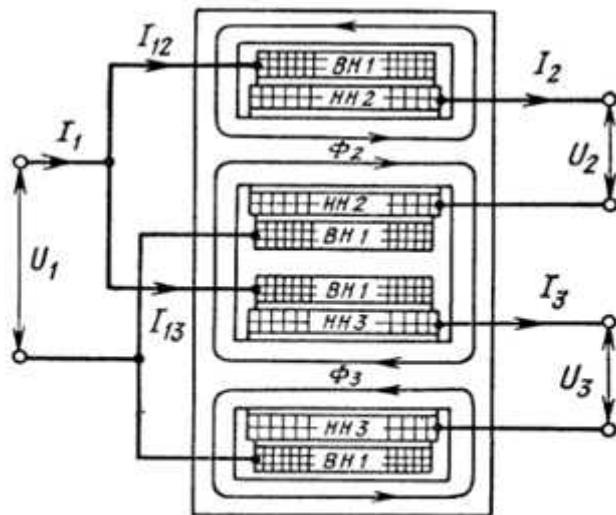


Рис. 6. Схем двухобмоточного однофазного трансформатора с расщепленной обмоткой НН

Устройство однофазного двухобмоточного трансформатора с одной первичной обмоткой 1 и расщепленной на две части (2 и 3) вторичной обмоткой показано на рис. 6.

Магнитопровод трансформатора выполнен бронестержневым.

Вторичные обмотки 2 и 3 низшего напряжения НН размещаются на разных стержнях, первичная обмотка 1 высшего напряжения имеет две параллельные ветви, которые также размещаются на разных стержнях.

При таком расположении обмоток магнитная связь между двумя частями (2 и 3) обмотки НН получается весьма слабой.

Передача энергии из сети 2 в сеть 3 посредством магнитного поля почти полностью исключается и трансформатор можно рассматривать как два отдельных трансформатора, один из которых связывает сеть 1 с сетью 2, а другой — сеть 1 с сетью 3.

При нагружении одной из частей обмотки низшего напряжения НН, например НН2, на стороне высшего напряжения ВН будет практически нагружена только одна из параллельных цепей, размещенная на том же стержне, что и обмотка НН2.

Разумеется, такой трансформатор может передавать энергию и в обратном направлении. В этом случае он имеет две первичные обмотки НН2 и НН3, питаемые, например, от двух отдельных генераторов, и одну вторичную, ВН1.

Номинальные напряжения U_3 и U_2 могут быть как одинаковыми, так и различными. Магнитные потоки Φ_2 и Φ_3 в стержнях трансформатора и приведенные токи I'_2 и I'_3 зависят от соотношения между напряжением U_1 и приведенными напряжениями U'_2 и U'_3 .

Если $U'_2 = U'_3$, то $I'_2 = I'_3$; $\Phi_2 = \Phi_3$ и, следовательно, потоки в крайних необмотанных стержнях бронестержневого магнитопровода отсутствуют.

В общем случае, когда напряжения в сетях 2 и 3 таковы, что $U_2 \neq U_3$, приведенные токи и потоки неодинаковы, $I'_2 \neq I'_3$ и $\Phi_2 \neq \Phi_3$, и поток, равный разности потоков $\Phi_2 - \Phi_3$, замыкается через крайние стержни.

Если бы магнитопровод трансформатора был двухстержневым, то при $U_2 \neq U_3$ поток $\Phi_2 - \Phi_3$ замыкался бы между верхним и нижним ярами вне магнитопровода.

Поэтому в стенках масляного бака и в других массивных металлических конструктивных частях, расположенных во внешнем магнитном поле, могли бы создаваться значительные потери от вихревых токов.

Поэтому для трансформаторов с расщепленной омоткой предпочтительна бронестержневая конструкция магнитопровода.

По сравнению с обычным двухобмоточным трансформатором с одной обмоткой высшего напряжения ВН, присоединенной к сети 1, и одной обмоткой низшего напряжения НН, присоединенной к сетям 2 и 3, двухобмоточный трансформатор с расщепленной на две части, 2 и 3, обмоткой НН обладает тем несомненным преимуществом, что при коротком замыкании на выводах сети 2 он потребляет из сети 1 вдвое меньший ток.

Это объясняется тем, что в обычном двухобмоточном трансформаторе обмотки 2 и 3 соединены параллельно и его сопротивление короткого замыкания $Z_{\kappa 123}$ равно половине сопротивления короткого замыкания об-

моток 1 и 2 (или 1 и 3) трансформатора с расщепленной обмоткой $Z_{к12} = Z_{к13}$.

Именно поэтому трансформаторы с расщепленной обмоткой получили заметное распространение.

ЛЕКЦИЯ 8

Тема: Переходные процессы в трансформаторах

Учебные вопросы:

Введение.

1. ПП при подключении трансформатора к сети
2. Переходные процессы в трансформаторе при коротком замыкании
3. ПП в трансформаторах при перенапряжениях.
4. Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь, 1983.

Введение.

Переходные процессы в трансформаторах возникают при включении, при изменении нагрузки, различных коммутационных и аварийных режимах.

Переходные процессы в трансформаторах описываются дифференциальными уравнениями. При постоянных параметрах эти уравнения имеют аналитическое решение.

При учете насыщения, когда индуктивности и взаимные индуктивности зависят от токов, для решения уравнений трансформатора применяют ЭВМ.

1. ПП при подключении трансформатора к сети.

Вначале рассмотрим подключение трансформатора к сети. Будем анализировать включение однофазного ненасыщенного трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой (рис. 1).

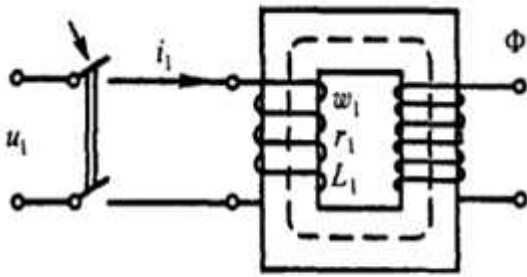


Рис. 1. Включение ненагруженного трансформатора в сеть

Для этого простого процесса можно записать следующее уравнение:

$$u_1 = i_1 r_1 + w_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1)$$

В ненасыщенном трансформаторе справедливо соотношение

$$i_1 = \frac{w_1 \Phi}{L_1}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), исключим i_1 , и для приложенного синусоидального напряжения получим

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha) = \frac{w_1 r_1}{L_1} \Phi + w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (3)$$

здесь Ψ - угол, определяющий мгновенное значение напряжения в момент включения трансформатора.

Таким образом, включение трансформатора при холостом ходе рассматривается как подключение катушки к сети. Решение (3) имеет вид

$$\Phi = \Phi' + \Phi'' = \Phi_m \left[\cos \alpha e^{-\frac{r_1}{L_1} t} - \cos(\omega t + \alpha) \right] \pm \Phi_{ocm} e^{-\frac{r_1}{L_1} t}, \quad (4)$$

где Φ' - мгновенное значение установившегося потока;

$$\Phi' = \Phi_m \sin\left(\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2}\right) = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha); \quad (5)$$

Φ'' - мгновенное значение переходного свободного значения потока;

$$\Phi'' = (\Phi_m \cos \alpha \pm \Phi_{ocm}) e^{-\frac{r_1}{L_1} t}; \quad (6)$$

$\Phi_{ост}$ - остаточное значение магнитного потока.

Графическое изображение решения уравнения (4) представлено на рис. 2.

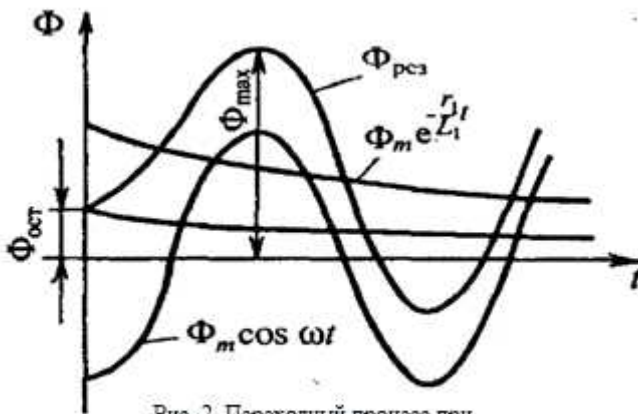


Рис. 2. Переходный процесс при включении трансформатора

Характер переходного процесса зависит от момента включения. При $\alpha = \frac{\pi}{2}$ и $\Phi_{ocm} = 0$ сразу устанавливается поток $\Phi_m \cos \omega t$ и процесс включения проходит без бросков тока.

Наиболее неблагоприятное протекание переходного процесса имеет место при $\Psi = 0$

и $\Phi_{\text{ост}}$, совпадающем по знаку со свободной составляющей потока.

Этот случай включения представлен на рис. 2. Поток достигает максимального значения примерно через полпериода после включения, и $\Phi_{\text{max}} \approx 1,8 \div 2,5 \Phi_m$.

Поток достигает 2,5-кратного значения Φ_m при условии, что остаточный поток равен $0,5 \Phi_m$, а свободная составляющая затухает очень медленно, что имеет место в мощных трансформаторах, у которых $r_1 \ll \omega L_1$.

В трансформаторах малой мощности процесс включения протекает быстрее и сопровождается меньшими бросками тока.

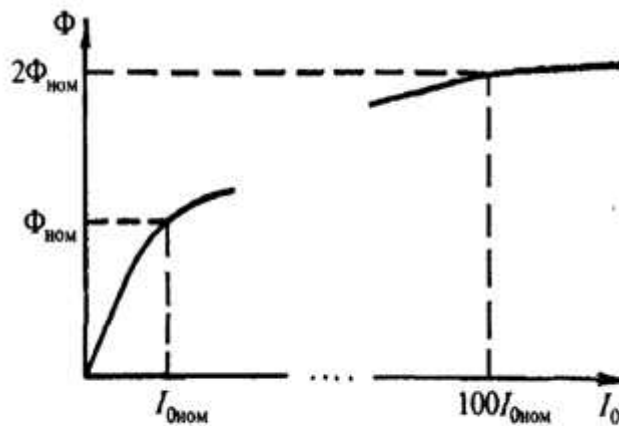


Рис. 3. Зависимость тока холостого хода в трансформаторе

Увеличение потока в 2 - 2,5 раза по сравнению с потоком Φ_m в реальном трансформаторе приводит к появлению тока, в 100 и более раз превышающего ток холостого хода трансформатора (рис. 3).

Обычно длительность переходного процесса невелика и броски тока затухают через несколько периодов.

Намагничивающий ток в силовых трансформаторах составляет 0,4 — 8% номинального тока трансформатора, поэтому кратковременные броски тока при включении не превышают 1,5 - 2,5 номинального тока трансформатора.

Броски тока при включении не опасны для трансформатора, но необходимо настраивать защиту таким образом, чтобы не было ложных отключений трансформатора.

2. Переходные процессы в трансформаторе при коротком замыкании

Переходные процессы при коротком замыкании являются для трансформаторов опасными аварийными процессами.

Короткие замыкания трансформаторов возникают в энергосистемах при повреждении изоляции, замыкании линии передач, при перенапряжениях и в результате ошибочных действий персонала.

При анализе процессов короткого замыкания в трансформаторе считают, что напряжение и частота на первичной обмотке остаются неизменными (сеть бесконечной мощности), замыкание происходит непосредственно на вторичных выводах, трансформатор ненасыщен (рис. 4).

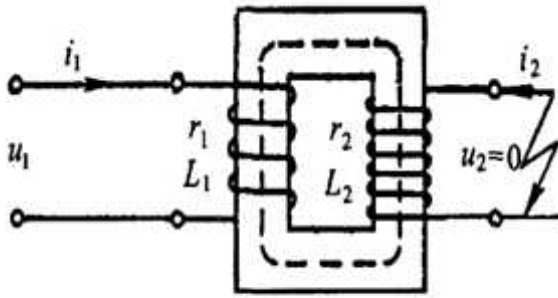


Рис. 4. Короткое замыкание однофазного трансформатора

Рассмотрим однофазный трансформатор с приведенным числом витков. Из дифференциальных уравнений трансформатора следует:

$$\begin{aligned} u_1 &= i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}; \\ 0 &= i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}. \end{aligned} \quad (7)$$

Если пренебречь током холостого хода, приняв $i_1 = -i_2$, и вычесть друг из друга уравнения системы (7), получим

$$u_1 = i_1 (r_1 + r_2) + (L_1 + L_2 - 2M) \frac{di_1}{dt}. \quad (8)$$

Так как $L_1 = M + L_{\pm 1}$, а $L_2 = M + L_{\pm 2}$, то имеем

$$u_1 = i_1 r_k + L_k \frac{di_1}{dt}. \quad (9)$$

Здесь $r_k = r_1 + r_2$, $L_k = L_{\pm 1} + L_{\pm 2}$.

Решение (9) имеет вид

$$\begin{aligned} i_1 &= i_{1k} = i_{1y} + i_{1св} = \sqrt{2} I_{1y} \sin(\omega t + \alpha - \psi_k) + \\ &+ \sqrt{2} [I_1 \sin(\alpha - \psi) - I_{1y} \sin(\alpha - \psi_k)] e^{-\frac{r_k}{L_k} t}, \end{aligned} \quad (10)$$

где i_{1y} - мгновенное значение установившегося тока короткого замыкания, равное

$$\frac{U_{1m}}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha - \psi_k) = \sqrt{2} I_{1y} \sin(\omega t + \alpha - \psi_k); \quad (11)$$

$i_{1св}$ — свободный ток, равный

$$\sqrt{2} [I_1 \sin(\alpha - \psi) - I_{1y} \sin(\alpha - \psi_k)] e^{-\frac{r_k}{L_k} t}; \quad (12)$$

здесь I_{1y} - действующее значение установившегося тока короткого замыкания, равное U_1 / Z_k ; Ψ - угол, характеризующий мгновенное значение напряжения в момент короткого замыкания; φ_k - фазный угол при коротком замыкании; I_1 - ток нагрузки в момент короткого замыкания; φ - фазный угол в момент короткого замыкания.

Для упрощения анализа процессов при коротком замыкании будем считать, что короткое замыкание произошло в трансформаторе при токе нагрузки $I_1 = 0$, т.е. при холостом ходе.

Это не изменяет значительно процессы в трансформаторе, так как ток короткого замыкания во много раз превышает ток нагрузки.

Для этого случая

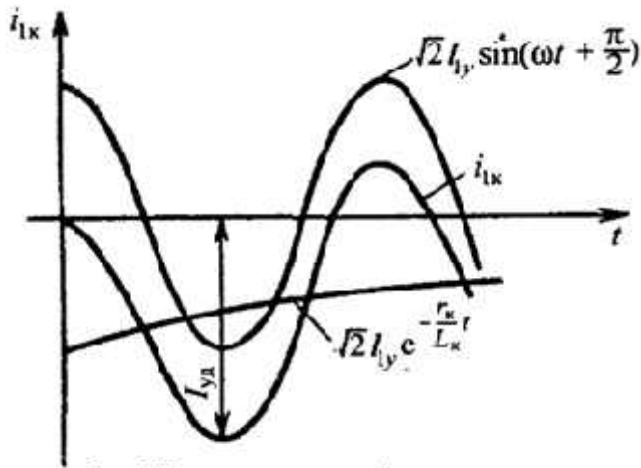


Рис. 5. Изменение тока в трансформаторе при коротком замыкании

$$i_{1к} = \sqrt{2} I_{1у} [\sin(\omega t + \alpha - \alpha_k) - \sin(\alpha - \alpha_k)] \quad (13)$$

Из (13) следует, что при $\alpha = \alpha_k$ свободный ток отсутствует и ток короткого замыкания сразу становится равным установившемуся значению.

Наибольшее значение ток короткого замыкания приобретает при $\alpha = \alpha_k + \pi/2$ (рис. 5).

Максимальное значение тока короткого замыкания наступает через полпериода после

короткого замыкания. Ударный ток короткого замыкания равен

$$I_{уд} = \sim \sqrt{2} I_{1у}, \quad (14)$$

где $\sim = 1,7 \div 1,8$ для трансформаторов большой мощности и $\sim = 1,2 \div 1,3$ для трансформаторов небольшой мощности.

Установившийся ток короткого замыкания, считая трансформатор ненасыщенным, находим, используя относительные единицы, из отношения

$$\frac{I_{1у}}{I_{1ном}} = \frac{100}{u_k} \%. \quad (15)$$

Напряжение короткого замыкания определяет установившийся ток короткого замыкания и является важным показателем для характеристики динамических процессов в трансформаторе.

Хотя переходные процессы в трансформаторе при коротком замыкании по существу затухают в течение пяти — семи периодов, короткие замыкания очень опасны для трансформатора.

При $u_k \% = 5\%$ установившийся ток короткого замыкания в 20 раз, а ударный ток примерно в 50 раз превышают номинальный ток.

Во избежание выхода из строя трансформаторов при коротком замыкании они снабжаются быстродействующей защитой, отключающей их при коротком замыкании.

При коротком замыкании возникают огромные усилия, действующие на обмотки. Способность трансформатора выдерживать короткое замыкание определяется его электродинамической стойкостью.

Витковое короткое замыкание.

При эксплуатации трансформаторов из-за повреждения изоляции витков может произойти короткое замыкание одного или нескольких витков внутри обмотки.

При этом в двухобмоточном трансформаторе появляется третий короткозамкнутый контур и поврежденную фазу можно рассматривать как фазу трехобмоточного трансформатора.

Ток в замкнутых витках вторичной обмотки можно определить исходя из равенства МДС:

$$\frac{w_{2к}}{w_2} = \frac{I_{2ном}}{I_{2к}}. \quad (16)$$

При определении токов в первичной обмотке в (16) индекс 2 заменяется на 1.

Как следует из (16), ток в замкнутых витках может в десятки и сотни раз превышать номинальный ток, что приводит к недопустимому местному нагреву, а огромные усилия, действующие на короткозамкнутые витки, приводят к тяжелой аварии и выходу из строя трансформатора.

При витковом коротком замыкании ток, потребляемый из сети, практически не увеличивается: это исключает возможность создания защиты трансформатора от витковых коротких замыканий.

Единственной защитой трансформатора от витковых коротких замыканий являются правильный расчет изоляции, высокая технологическая культура завода-изготовителя и правильная эксплуатация трансформатора.

3. Переходные процессы в трансформаторах при перенапряжениях.

Электромагнитное преобразование энергии в трансформаторах происходит при сравнительно низких частотах — 50 — 1000 Гц. При этих частотах схема замещения трансформатора состоит из активных и индуктивных сопротивлений.

При эксплуатации трансформаторы могут подвергаться воздействию высокочастотных напряжений прямоугольной формы в кратковременных импульсах, значительно превосходящих по амплитуде номинальное напряжение трансформатора.

Перенапряжения в энергосистемах возникают при коммутационных операциях (отключении и включении линий передачи и трансформаторов), авариях и грозовых разрядах.

Характерной формой волны перенапряжений является аperiodическая волна (рис. 6, а).

Начальный, круто нарастающий участок до U_m называют фронтом волны, а спадающий участок — спадом волны.

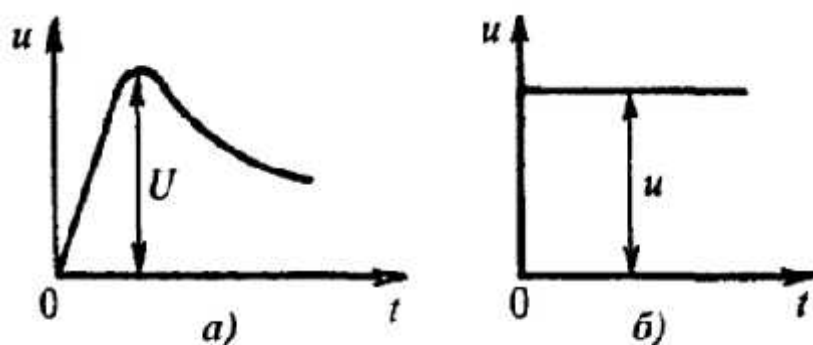


Рис. 6. Волны перенапряжений:
а - аperiodическая; б - прямоугольная

При этом длительность фронта волны составляет несколько микросекунд, а вся волна перенапряжений действует десятки микросекунд.

Наиболее опасна волна с прямоугольным фронтом (рис. 6, б). Она дает наиболь-

шие перенапряжения, а при разложении прямоугольной волны на гармонические составляющие амплитуды высших гармоник максимальны.

Волны с прямоугольным фронтом приходят к трансформаторам при грозовых перенапряжениях. При грозовых разрядах отрицательные заряды двигаются вдоль линии со скоростью света (рис. 7).

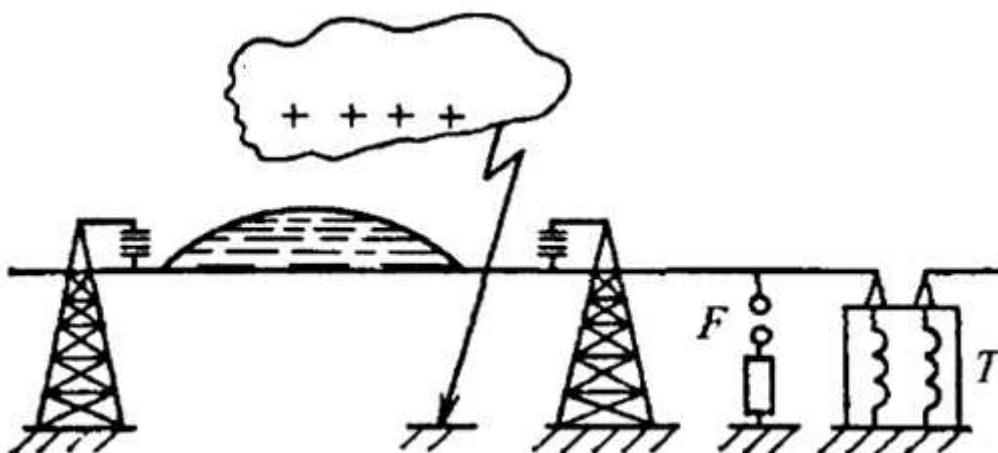


Рис. 7. Грозовые перенапряжения в линиях передачи и трансформаторах

Многokrатно отражаясь от концов линии, волны, вызванные грозовыми разрядами, кратковременно создают амплитуды напряжений, в десятки раз превышающие номинальное напряжение трансформатора.

Чтобы предохранить от пробоя изоляцию обмотки трансформатора T , перед трансформатором устанавливают разрядники F (рис. 7) и усиливают изоляцию на входных витках обмотки.

Для защиты трансформаторов от перенапряжений применяются внешние и внутренние меры.

К мерам внешней защиты относится применение заземляющих тросов и разрядников, которые снижают амплитуду волны перенапряжения до значения, в 4 - 5 раз превышающего номинальное напряжение.

Внутренними мерами защиты являются усиление изоляции входных и концевых катушек обмотки ВН и применение емкостной защиты (в трансформаторах класса 110 кВ и выше).

3. Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов

При эксплуатации трансформаторов в энергосистемах часто нагрузка по фазам может быть неодинаковой.

Это связано обычно с подключением к трехфазным трансформаторам однофазной нагрузки: тяговых подстанций, электротермических печей, осветительной нагрузки и других однофазных потребителей.

Неравномерность токов по фазам искажает напряжения трансформаторов, что приводит к неблагоприятным последствиям для потребителя — уменьшается мощность электродвигателей, повышается напряжение на лампах накаливания, что снижает срок их службы.

Несимметричные режимы имеют место при авариях — одно- и двухфазном коротких замыканиях.

При несимметричных режимах может наступить режим перевозбуждения трансформатора или автотрансформатора, когда индукция в магнитопроводе превышает номинальную индукцию холостого хода.

Действующие стандарты допускают 10%-ное превышение номинального напряжения. Более глубокие перевозбуждения в эксплуатации недопустимы.

При индукциях больше 1,9Тл значительно растет намагничивающий ток и деформируется магнитное поле вне магнигопровода, что приводит к увеличению добавочных потерь и нагреву нажимных плит стержней и стяжных шпилек.

В эксплуатации часто встречаются режимы работы трансформаторов при коротких замыканиях одной или двух фаз при различных соединениях обмоток или замыкании одной или двух фаз трансформатора на землю, а также при обрыве фазы.

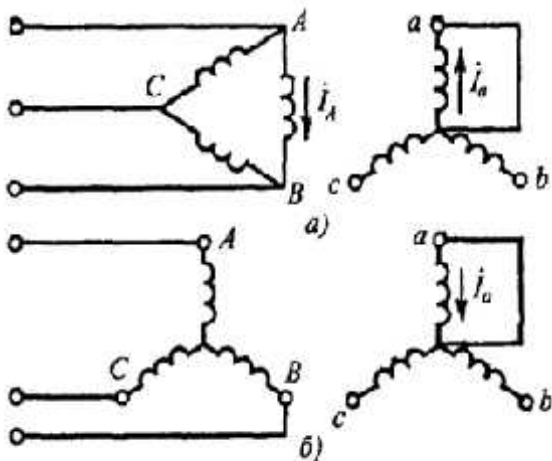


Рис. 8. Однофазные короткие замыкания в схемах Δ/Y и Y/Y

Расчет токов при несимметричных режимах имеет важное значение для эксплуатации силового оборудования энергосистем, настройки релейной защиты и автоматики.

Наибольшая несимметрия токов имеет место при однофазном коротком замыкании (рис. 8, а и б). Это крайний случай несимметричной нагрузки. Для схемы рис. 8, а

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_K}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_C = 0.$$

Для схемы рис. 7, б

$$\dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a0} = \frac{\dot{I}_A}{3}; \quad \dot{I}_{a0} = \frac{U_A}{z_0 + z_2 + z_k},$$

где $\dot{U}_A$ - фазное напряжение.

Из-за наличия нескомпенсированных токов нулевой последовательности при однофазном коротком замыкании в схеме Y/Y имеет место смещение нейтрали, что приводит к искажению звезды фазных напряжений за счет напряжения нулевой последовательности $\dot{U}_{A0}$ (рис. 9).

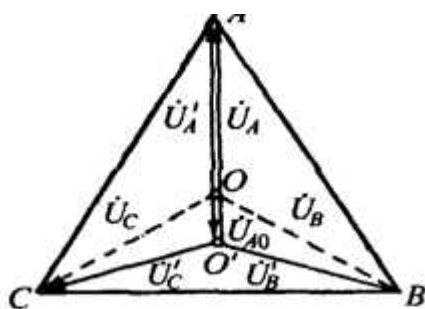


Рис. 9. Смещение нейтрали при однофазном коротком замыкании

В схеме Δ/Y смещения нейтрали при однофазном коротком замыкании нет, если короткое замыкание — на стороне обмотки, соединенной в звезду.

К несимметричным режимам работы трансформаторов относятся режимы работы при обрыве фазы. Как правило, это аварийные режимы, и трансформаторы отключаются от энергосистемы.

Выше были рассмотрены лишь наиболее типичные примеры несимметричных режимов работы трансформаторов. Более подробно несимметричные режимы рассматриваются в спецкурсах.

Лекция 9

Тема: Обмотки машин переменного тока

Учебные вопросы:

Введение.

1. Способы выполнения обмоток.
2. Классификация обмоток.
3. Принцип образования трёхфазной обмотки.
4. Однослойные обмотки.
5. Двухслойные обмотки.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. — М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 — 360 с., ч.2 — 332 с.

4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь, 1983.
5. Кацман М.М. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 364 с.

Введение.

Машины переменного тока подразделяются на два основных вида: асинхронные и синхронные.

Конструктивно как те, так и другие машины имеют неподвижную часть, называемую статором, вращающуюся часть, называемую ротором.

Обычно ротор располагается внутри статора.

Асинхронные и синхронные машины различаются по принципу действия, по устройству их роторов, но статоры этих машин в подавляющем большинстве случаев имеют одинаковую конструкцию.

Сердечник статора 1 (рис. 1) машин переменного тока представляет собой полый цилиндр, который для снижения потерь на вихревые токи собирается из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм.

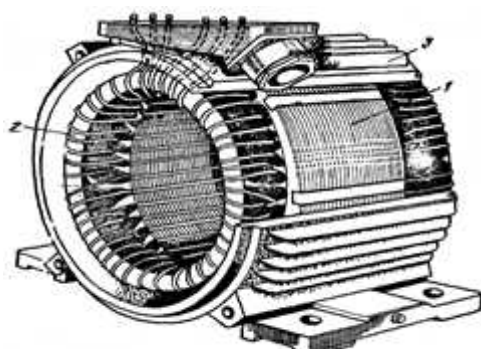


Рис. 1. Статор машины переменного тока

Для изоляции листов друг от друга они покрываются или лаком или оксидной пленкой.

На внутренней цилиндрической поверхности статора имеются пазы, в которых размещается обмотка 2. Сердечник 1 с обмоткой 2 закреплен в корпусе 3.

Вопросы устройства обмоток статора, наведения ЭДС в них и образования магнитных полей при прохождении по

обмоткам тока являются общими как для асинхронных, так и для синхронных машин.

1. Способы выполнения обмоток.

Пазы, в которых располагаются проводники обмоток статора, имеют трапециевидную или грушевидную форму у машин мощностью до 100 кВт и прямоугольную форму у машин большей мощности (рис. 2).

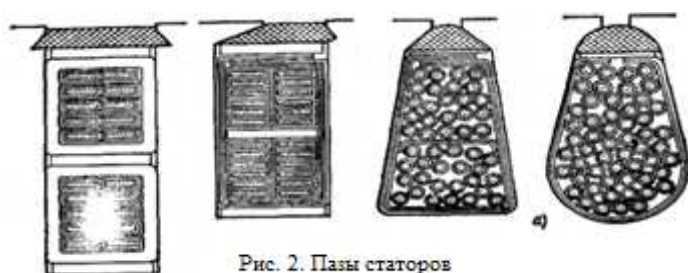


Рис. 2. Пазы статоров

Трапециевидные и грушевидные пазы со стороны, обращенной к зазору, полузакрыты, что позволяет снизить МДС возбуждения.

Кроме того, при таких пазах увеличивается ширина

зубца в самом узком его сечении, вследствие чего снижаются максимальные значения индукции и напряженности магнитного поля.

Это уменьшает магнитное напряжение зубца, что также способствует снижению МДС возбуждения.

В машинах мощностью до 100 кВт применяют насыпные обмотки из круглого изолированного провода. Для изоляции обмотки от корпуса в пазы закладывают выгнутые по форме паза короба, состоящие из одного или нескольких слоев изоляционного материала.

Проводники поочередно опускают (всыпают) в паз через шлиц, образованный между соседними зубцами. После укладки обмотки в пазы сердечника статора ее пропитывают в специальных лаках.

В процессе пропитки воздушные включения в обмотке и изоляции заполняют лаком, и обмотка приобретает монолитность, улучшаются ее теплопроводность, влагостойкость, электрическая и механическая прочность.

В машинах мощностью более 100 кВт и напряжением выше 660 В для повышения электрической и механической прочности изоляции обмотку выполняют из жестких секций (катушек), которые укладывают в прямоугольные пазы.

Секции наматывают на шаблонах из прямоугольного обмоточного провода, им придают окончательную форму со всеми характерными изгибами, затем изолируют, пропитывают, сушат и в готовом виде укладывают в пазы.

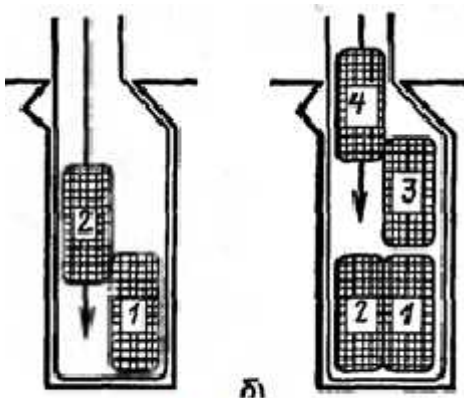


Рис. 3. Последовательность укладки полусекций в паз

В машинах мощностью более 100 кВт и напряжением менее 660 В секции по ширине паза подразделяют на две равные части. Последовательность их укладки в паз показана на рис. 3.

Обмотку также наматывают на шаблоне из прямоугольного изолированного обмоточного провода, но пазовую изоляцию ее выполняют такой, как у насыпной обмотки.

Для уменьшения ширины шлицы паза секции делят на две половины. Пазы на рис. 3 называются полуоткрытыми.

2. Классификация обмоток

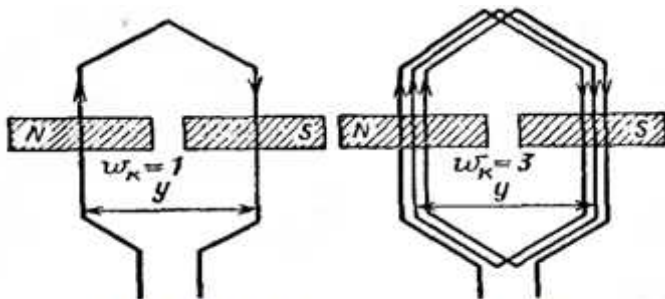


Рис. 4. Одновитковая и трёхвитковая секции обмотки статора

Обмотки состоят из секций. Секция может быть одновитковой (состоять из одного витка) и многовитковой (иметь несколько витков) (рис. 4).

Части секции, укладываемые в пазы, называются пазовыми или активными, а

располагаемые вне паза — лобовыми.

Ширина секции определяется шагом обмотки y . Для того чтобы ЭДС проводников двух активных сторон секции суммировались, эти активные стороны должны располагаться под полюсами разной полярности.

Поэтому шаг y должен быть примерно равен полюсному делению. Шаг y и полюсное деление τ_p задаются в зубцовых делениях.

Зубцовое (пазовое) деление — это длина дуги по внутренней окружности статора между серединами соседних зубцов или пазов.

Шаг y равен числу этих делений, расположенных между началом и концом секции.

Если $y = 5$, то это означает, что начало секции лежит, например, в пазу 1, а ее конец — в пазу 6 ($1+5$). Шаг y всегда равен целому числу.

Полюсное деление τ_p равно числу зубцовых (пазовых) делений, расположенных между серединами соседних полюсов. Полюсное деление τ_p может иметь как целое, так и дробное значение.

Если шаг равен полюсному делению: $y = \tau_p = Z / (2p)$ (где Z — общее число зубцов на статоре), то обмотка называется обмоткой с диаметральным шагом, а если $y < \tau_p$ — то с укороченным шагом.

Наибольшее распространение имеют обмотки с укороченным шагом, так как в такой обмотке за счет выбора соответствующего шага можно получить форму кривых индуцируемой ЭДС и поля, близкие к синусоидальным. Обычно $y \approx 0,8 \tau_p$.

По расположению секционных сторон в пазу обмотки делятся на однослойные и двухслойные. Если в пазу размещается только одна секционная сторона рис. 5, то обмотка будет однослойной, а если две (рис. 6), — двухслойной.

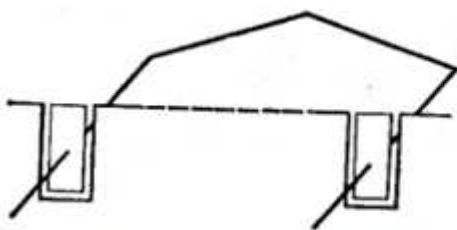


Рис. 5. Расположение в пазах секции однослойной обмотки



Рис. 6. Расположение в пазах секции двухслойной обмотки

Наибольшее применение находят двухслойные обмотки. Преимущество двухслойных обмоток состоит в том, у них можно выполнить укороченный шаг и за счет этого улучшить форму кривых ЭДС и МДС.

Кроме того уменьшается расход обмоточного провода. Различают: однофазные, двухфазные и трехфазные обмотки. Наибольшее распространение получили трехфазные обмотки.

Обмотка каждой фазы выполняется распределенной, т. е. она на каждом полюсном делении размещается в нескольких рядом лежащих пазах.

Число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{z}{2pt},$$

где p и t - число пар полюсов и число фаз.

Чаще всего q выбирается равным целому числу ($q = 2 \div 6$).

В крупных многополюсных машинах q может быть дробным.

Соседние q катушек (секций) одной фазы соединяются между собой последовательно, образуя катушечную группу.

По конфигурации катушек и последовательности соединения их друг с другом подразделяются на петлевые и волновые. На рис. 7 показаны катушки петлевой и волновой обмоток.

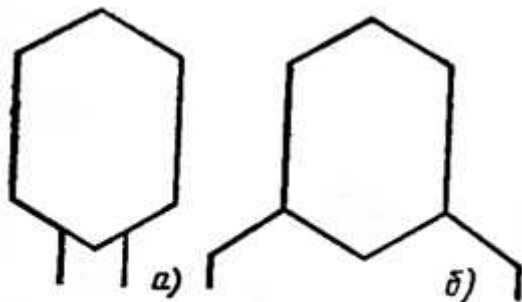


Рис. 7. Секции петлевой (а) и волновой (б) обмоток

Наибольшее распространение в машинах переменного тока получили петлевые обмотки. Волновые обмотки применяются в очень крупных машинах.

3. Принцип образования трёхфазной обмотки

Трёхфазная обмотка статора состоит из трех идентичных частей — фаз.

Индукцируемые в фазах ЭДС должны быть равны, но сдвинуты на электрический угол, равный 120° . Для этого обмотки располагают в пазах статора со сдвигом в пространстве на такой же угол.

На поперечном разрезе двухполюсной машины (рис. 8) показаны обмотки трех фаз ($q = 2$), начала которых (A_n, B_n, C_n) имеют сдвиг на 120° . Для момента времени, изображенного на рис. 8, максимальная ЭДС индуцируется в катушках фазы А.

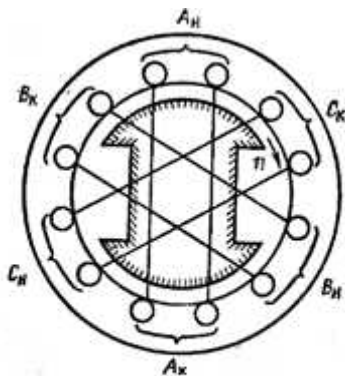


Рис. 8. К пояснению принципа образования трёхфазной обмотки

Максимальная ЭДС такого же направления в фазе В наступит через промежуток времени, соответствующий повороту ротора на 120° .

При повороте ротора еще на 120° максимальная ЭДС будет в фазе С. Следовательно, при таком размещении обмоток на статоре получится необходимый угол сдвига между ЭДС фаз.

Из рис. 8 следует, что при трёхфазной обмотке двухполюсной машины и равномерном распределении пазов по окружности статора последняя разбивается на шесть равных зон из q пазов в следующей последовательности: $A_n, C_k, B_n, A_k, C_n, B_k$.

В машинах с $2p > 2$ указанная разбивка будет повторяться на каждой паре полюсных делений.

4. Однослойные обмотки.

Существует целый ряд схем однослойных обмоток машин переменного тока. Все они одинаковы в электрическом и магнитном отношении и различаются только по форме лобовых частей катушек.

Для изображения схем обмоток машин широко применяются схемы-развертки, которые получаются, если статор разрезать по образующей и развернуть в плоскость.

На этой плоскости вертикальными линиями изображаются пазы. Начертив развертку статора и наметив пазы с проводниками, разбивают их по фазам и устанавливают границы полюсных делений.

На каждом полюсном делении располагаются $3q$ пазов. Затем условно задаются направлением ЭДС в проводниках.

Проводники, принадлежащие к одной фазе, соединяют в катушки, затем катушки соединяют между собой таким образом, чтобы их ЭДС складывались.

Рассмотрим схемы некоторых видов однослойных обмоток (рис. 9).

Концентрические обмотки.

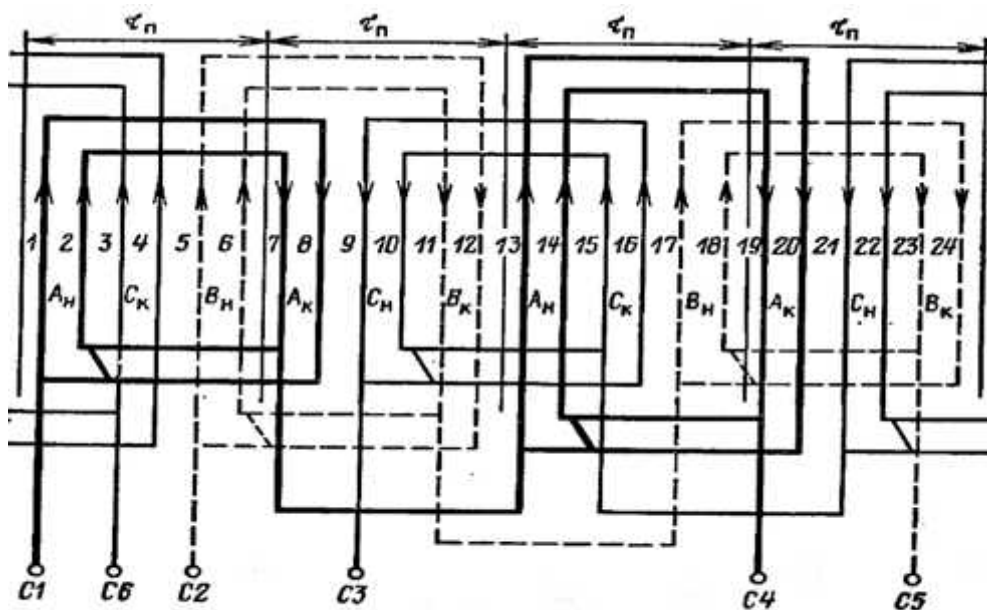


Рис. 9. Схема-развертка концентрированной двухплоскостной обмотки
($Z = 24$, $2p = 4$, $m = 3$)

Эти обмотки подразделяются на двухплоскостные и трёхплоскостные.

Построим двухплоскостную обмотку по следующим данным:
 $Z = 24$, $2p = 4$ и $m = 3$.

Число пазов на полюс и фазу:

$$q = Z / (2mp) = 24 / (4 \cdot 3) = 2.$$

Предположим что в данный момент времени первые $3q$ пазов (с 1 по 6) располагаются под полюсом одной полярности, следующие $3q$ пазов другой полярности (с 7 по 12) – под полюсом другой полярности и.т.

Для наглядности на рис. 9 катушки фаз А и С изображены линиями различной толщины, а фазы В — штриховой линией.

У двухплоскостной обмотки катушки каждой катушечной группы охватывают одна другую, т. е. являются концентрическими.

Кроме того, при четном p половина катушечных групп имеет длинные лобовые части, которые располагаются в одной плоскости, а другая половина — короткие лобовые части, располагающиеся в другой плоскости.

Поэтому такие обмотки называются двухплоскостными (рис. 10, а).

Катушки каждой фазы соединяются между собой так, чтобы их ЭДС суммировались.

Для того чтобы получить сдвиг между ЭДС фаз на 120° , нужно соответствующим образом выполнить отводы от обмоток.

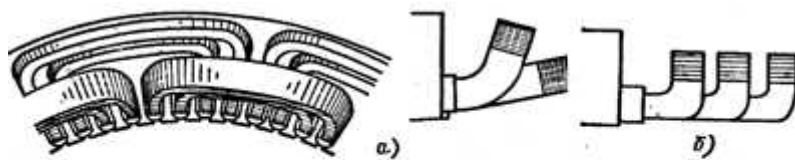


Рис. 10. Расположение лобовых частей трёхфазной двухплоскостной (а) и трёхплоскостной (б) обмоток

Обмотки каждой фазы начинаются с проводника, расположенного в одном из пазов с индексом начала данной фазы (A_n , B_n или C_n).

Вывод от этого проводника будет соответственно иметь одно из обозначений $C1$, $C2$ или $C3$.

На рисунке обмотка фазы А начинается с проводника первого паза, фазы В — с проводника пятого паза, фазы С с девятого паза.

Обычно между отводами от начал соседних фаз располагается $2q$ пазов. Заканчивается обмотка фазы проводником последней катушки, расположенным в пазу и имеющим один из индексов A_k , B_k или C_k .

Отводы от этих проводников фаз будут иметь обозначения $C4$, $C5$, $C6$.

Построение схем разверток других типов обмоток проводится аналогично.

5. Двухслойные обмотки.

Двухслойные обмотки находят более широкое применение из-за возможности выбора у них оптимального шага.

У этих обмоток стороны катушки располагаются сверху и внизу соответствующих пазов, отстоящих друг от друга на расстоянии шага у.

На схеме-развертке верхняя катушечная сторона изображается сплошной линией а нижняя — штриховой.

Построим схему-развертку двухслойной обмотки для машины с $Z = 24$, $2p = 4$, $q = 2$. Полюсное деление, выраженное в зубцовых делениях для этой машины, $\tau_n = Z/2p = 24/4 = 6$.

Шаг обмотки примем укороченным: $y \approx 0,8^2 \tau_n = 0,8 \cdot 6 \approx 5$. Распределим верхние стороны катушек в пазах на фазные зоны по $q = 2$ пазов в каждой зоне (первая строка таблицы на рис. 11).

Затем с шагом y соединяем их с соответствующими нижними сторонами. Прodeлав такие соединения, получим разбивку нижних катушечных сторон пазов по зонам (вторая строка таблицы).

Как видно из рис. 11, распределение нижних сторон катушек по фазным зонам будет иметь сдвиг по отношению к разбивке верхних слоев.

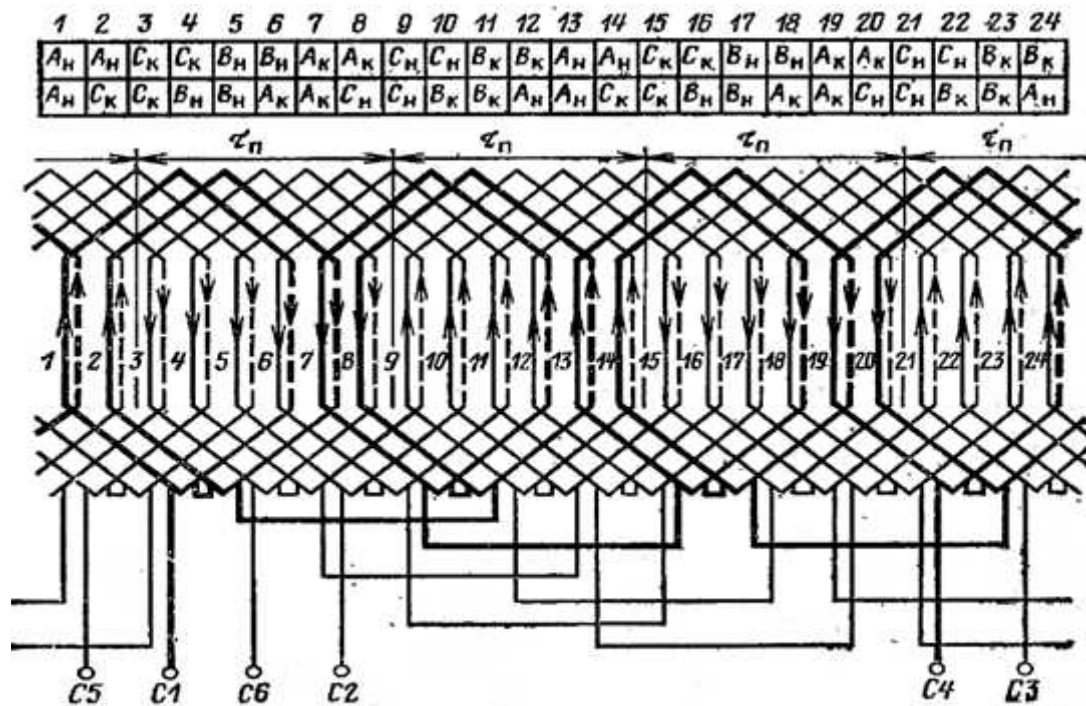


Рис. 11. Двухслойная петлевая обмотка
($Z = 24$, $2p = 4$, $m = 3$)

В общем случае сдвиг нижнего слоя относительно верхнего составляет $(1 - \beta)\tau_n$ пазов, где $\beta = y/\tau_n$ — укорочение обмотки.

Катушечные группы между собой должны соединяться таким образом, чтобы их ЭДС складывались. В двухслойной обмотке количество катушечных групп в 2 раза больше, чем у однослойной.

Обмотки с дробным числом q применяются в многополюсных машинах (например, в гидрогенераторах), в которых из-за ограниченных размеров полюсного деления q может быть небольшим.

Такие обмотки позволяют при сравнительно небольшом общем числе пазов машины получить приближающуюся к синусоиде кривую ЭДС.

Объясняется это тем, что последовательно соединенные группы катушек одной фазы, лежащие под разными полюсами, оказываются немного сдвинутыми относительно оси поля, что и ведет к уменьшению высших гармонических.

Чтобы двухслойная обмотка с дробными числом пазов на полюс и фазу была симметричной, т.е. в этой обмотке ЭДС фаз были бы равны и сдвинуты по фазе на один и тот же угол 120° , необходимо выполнение условия $Z/(3t) = \text{целое число}$, где t — общий наибольший делитель общего числа пазов машины Z и числа пар полюсов p .

ЛЕКЦИЯ 10

Тема: Устройство и принцип действия синхронных генераторов

Учебные вопросы.

Введение.

1. Назначение синхронной машины.
2. Принцип действия синхронной машины.
3. Устройство синхронной машины.
3. Особенности конструкции синхронных машин большой мощности.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь 1983г.
5. Кацман М.М. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 364 с.

1. Назначение синхронной машины.

Синхронные машины используют главным образом в качестве источников электрической энергии переменного тока; их устанавливают на мощных тепловых, гидравлических и атомных электростанциях, а также на передвижных электростанциях и транспортных установках (тепловозах, автомобилях, самолетах).

Конструкция синхронного генератора определяется в основном типом привода. В зависимости от этого различают турбогенераторы, гидрогенераторы и дизель-генераторы.

Турбогенераторы приводятся во вращение паровыми или газовыми турбинами, гидрогенераторы — гидротурбинами, дизель-генераторы — двигателями внутреннего сгорания.

Синхронные машины широко используют и в качестве электродвигателей при мощности 300 кВт и выше для привода насосов, компрессоров, вентиляторов и других механизмов, работающих при постоянной частоте вращения.

Для генерирования или потребления реактивной мощности с целью улучшения коэффициента мощности сети и регулирования ее напряжения применяют синхронные компенсаторы.

В электробытовых приборах (магнитофонах, проигрывателях, киноаппаратуре) и системах управления широкое применение получили различные синхронные микромашины — с постоянными магнитами, индукторные, реактивные, гистерезисные, шаговые.

Первый трехфазный синхронный генератор изобрел известный русский электротехник М. О. Доливо-Добровольский.

Этот генератор имел мощность 230 кВт·А, приводился во вращение от гидротурбины и обеспечивал электроснабжение международной электротехнической выставки в г. Франкфурте в 1891 г. по четырехпроводной электрической линии трехфазного тока.

Основная электромагнитная схема синхронных машин с тех пор оставалась неизменной, но усовершенствовалось их конструктивное выполнение и возросли электромагнитные нагрузки, что позволило значительно улучшить массогабаритные и энергетические показатели и нагрузочную способность синхронных машин.

Особенно большие выгоды в этом отношении дало применение в крупных машинах водородного и водяного охлаждения.

В настоящее время электропромышленностью для тепловых и атомных электростанций разработана и выпускается серия унифицированных турбогенераторов мощностью 63,125, 320,500 и 800 МВт и уникальные турбогенераторы мощностью 1000 МВт для атомных электростанций и 1200 МВт для тепловых электростанций.

Для высоковольтных линий электропередачи выпускаются синхронные компенсаторы мощностью до 350 МВ·А.

2. Принцип действия синхронной машины.

Статор 1 синхронной машины (рис. 1, а) выполнен так же, как и асинхронной: на нем расположена трехфазная (в общем случае многофазная) обмотка 3.

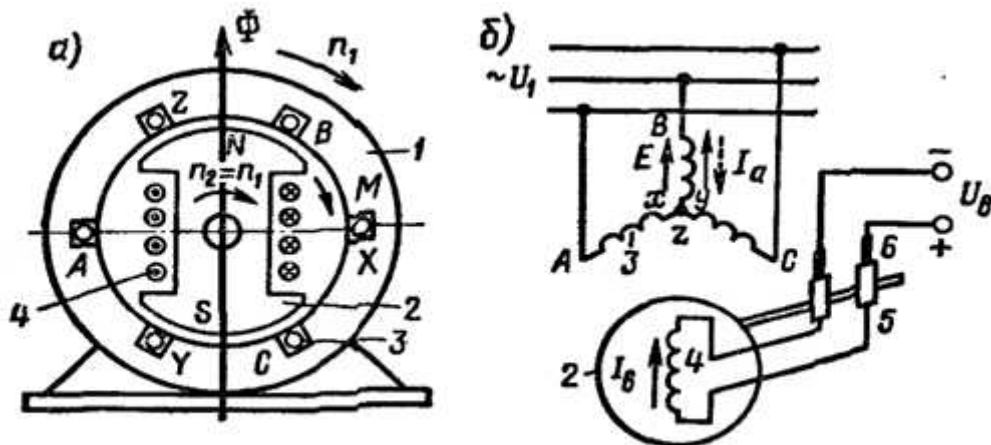


Рис. 1. Электромагнитная схема синхронной машины и схема её включения

Обмотку ротора 4, питаемую от источника постоянного тока, называют обмоткой возбуждения, так как она создает в машине магнитный поток возбуждения.

Вращающуюся обмотку ротора соединяют с внешним источником постоянного тока посредством контактных колец 5 и щеток 6 (рис. 1, б).

При вращении ротора 2 с некоторой частотой n_2 поток возбуждения пересекает проводники обмотки статора и индуцирует в ее фазах переменную ЭДС E , изменяющуюся с частотой

$$f_1 = pn_2 / 60. \quad (1)$$

Если обмотку статора подключить к какой-либо нагрузке, то проходящий по этой обмотке многофазный ток I_a создает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого

$$n_1 = 60 f_1 / p. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что $n_1 = n_2$, т. е. что ротор вращается с той же частотой, что и магнитное поле статора. Поэтому рассматриваемую машину называют синхронной.

Результирующий магнитный поток $\Phi_{\text{рез}}$ синхронной машины создается совместным действием МДС обмотки возбуждения и обмотки статора, и результирующее магнитное поле вращается в пространстве с той же частотой, что и ротор.

В синхронной машине обмотку, в которой индуцируется ЭДС и проходит ток нагрузки, называют обмоткой якоря, а часть машины, на которой расположена обмотка возбуждения, — индуктором.

Для принципа действия и теории работы машины не имеет значения — вращается якорь или индуктор, поэтому в некоторых случаях применяют синхронные машины с обратной конструктивной схемой: обмотку якоря, к которой подключают нагрузку, располагают на роторе, а обмотку возбуждения, питаемую постоянным током, — на статоре.

Такую машину называют обращенной. Обращенные машины имеют сравнительно небольшую мощность, так как у них затруднен отбор мощности от обмотки ротора.

Синхронная машина может работать автономно в качестве генератора, питающего подключенную к ней нагрузку, или параллельно с сетью, к которой присоединены другие генераторы.

При работе параллельно с сетью она может отдавать или потреблять электрическую энергию, т. е. работать генератором или двигателем.

При подключении обмотки статора к сети с напряжением U и частотой f_1 проходящий по обмотке ток создает, так же как в асинхронной машине, вращающееся магнитное поле, частота вращения которого определяется по формуле (2).

В результате взаимодействия этого поля с током $I_{\text{в}}$, проходящим по обмотке ротора, создается электромагнитный момент M , который при работе машины в двигательном режиме является вращающим, а при работе в генераторном режиме — тормозным.

В рассматриваемой машине поток возбуждения (холостого хода) создается обмоткой постоянного тока, расположенной обычно на роторе.

В установившемся режиме ротор неподвижен относительно магнитного поля и вращается с частотой вращения $n_1 = n_2$ независимо от механической нагрузки на валу ротора или электрической нагрузки.

Таким образом, для установившихся режимов работы синхронной машины характерны следующие особенности:

а) ротор машины, работающей как в двигательном, так и в генераторном режимах, вращается с постоянной частотой, равной частоте вращающегося магнитного поля, т.е. $n_2 = n_1$;

б) частота изменения ЭДС E , индуцируемой в обмотке якоря, пропорциональна частоте вращения ротора;

в) в установившемся режиме ЭДС в обмотке возбуждения не индуцируется; МДС этой обмотки определяется только током возбуждения и не зависит от режима работы машины.

2. Устройство синхронной машины

Конструктивная схема машины.

Синхронные машины выполняют с неподвижным или вращающимся якорем. Машины большой мощности для удобства отвода электрической энергии со статора или подвода ее выполняют с неподвижным якорем (рис. 2, а).

Поскольку мощность возбуждения невелика по сравнению с мощностью, снимаемой с якоря (0,3 – 2 %), подвод постоянного тока к обмотке возбуждения с помощью двух колец не вызывает особых затруднений.

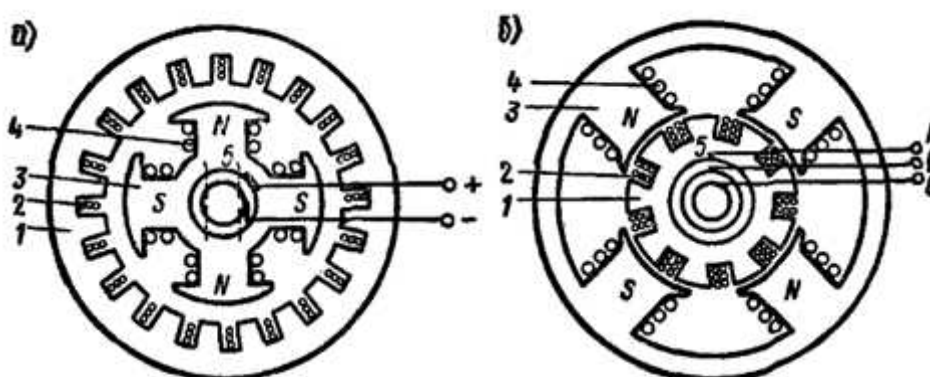


Рис. 2. Конструктивная схема синхронной машины с неподвижным и вращающимся якорем

1 - якорь; 2 - обмотка якоря; 3 - полюсы индуктора; 4 - обмотка возбуждения; 5 - кольца и щётки.

Синхронные машины небольшой мощности выполняют как с неподвижным, так и с вращающимся якорем.

В обращенной синхронной машине с вращающимся якорем и неподвижным индуктором (рис. 2, б) нагрузка подключается к обмотке якоря посредством трех колец.

Конструкция ротора.

В синхронных машинах применяют две различные конструкции ротора:

- неявнополюсную — с неявновыраженными полюсами (рис. 3, а);
- явнополюсную — с явновыраженными полюсами (рис. 3, б).

Двух- и четырехполюсные машины большой мощности, работающие при частоте вращения ротора 1500 и 3000 об/мин, изготовляют, как правило, с неявнополюсным ротором.

Применение в них явнополюсного ротора невозможно по условиям обеспечения необходимой механической прочности крепления полюсов и обмотки возбуждения.

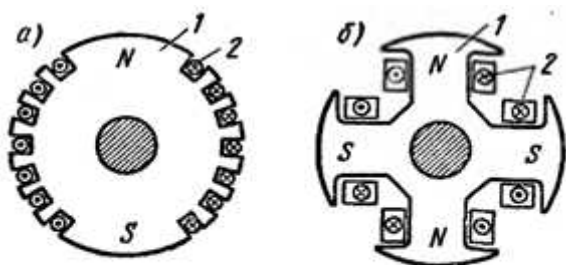


Рис. 3. Роторы синхронных неявнополюсной и явнополюсной машин

1 - сердечник ротора; 2 - обмотка возбуждения

Обмотку возбуждения в такой машине размещают в пазах сердечника ротора, выполненного из массивной стальной поковки, и укрепляют немагнитными клиньями.

Лобовые части обмотки, на которые воздействуют значительные центробежные силы, крепят с помощью стальных массивных бандажей.

Для получения приблизительно синусоидального распределения магнитной индукции обмотку возбуждения укладывают в пазы, занимающие $2/3$ полюсного деления.

Явнополюсный ротор обычно используют в машинах с четырьмя полюсами и более. Обмотку возбуждения в этом случае выполняют в виде цилиндрических катушек прямоугольного сечения, которые размещают на сердечниках полюсов и укрепляют с помощью полюсных наконечников.

Ротор, сердечники полюсов и полюсные наконечники изготавливают из листовой стали.

В синхронной машине (рис. 4) сердечник статора собирают из изолированных листов электротехнической стали и на нем располагают трехфазную обмотку якоря.

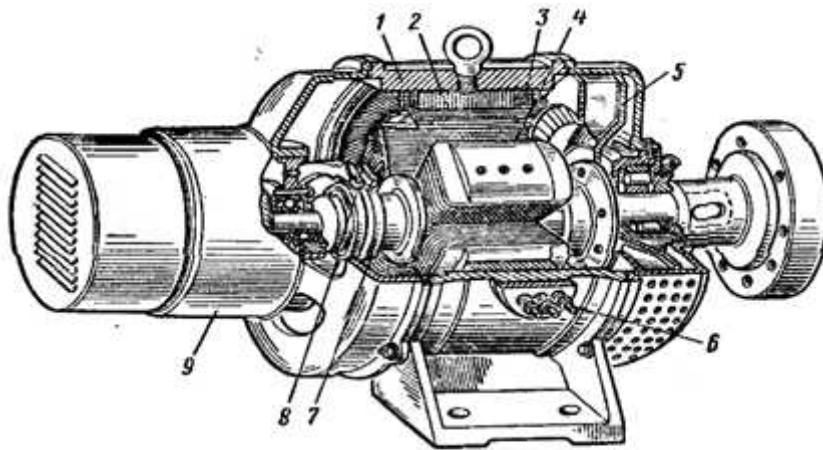


Рис. 4. Устройство явнополюсной машины

1 - корпус; 2 - сердечник статора; 3 - обмотка статора; 4 - ротор;
5 - вентилятор; 6 - выводы обмоток; 7 - контактные кольца; 8 - щётки;
9 - возбудитель

На роторе размещают обмотку возбуждения. В явнополюсных машинах полюсным наконечникам обычно придают такой профиль, чтобы воздушный зазор между полюсным наконечником и статором был минимальным под серединой полюса и максималь-

ным у его краев, благодаря чему кривая распределения индукции в воздушном зазоре приближается к синусоиде.

В полюсных наконечниках синхронных двигателей с явнополюсным ротором размещают стержни пусковой обмотки (рис. 5), выполненной из материала с повышенным удельным электрическим сопротивлением (латуни).

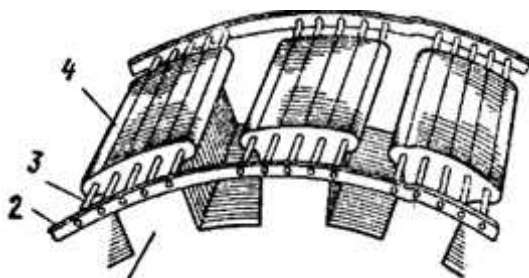


Рис. 5. Устройство пусковой обмотки в синхронном двигателе:

1 - полюс ротора; 2 - короткозамыкающие кольца;
3 - стержни беличьей; 4 - полюсные наконечники.

Такую же обмотку (типа «беличья клетка»), состоящую из медных стержней, применяют и в синхронных генераторах; ее называют успокоительной или демпферной обмоткой, так как она обеспечивает быстрое затухание колебаний ротора, возникающих в переходных режимах работы синхронной машины.

Если синхронная машина выполнена с массивными полюсами, то при пуске и переходных режимах в них возникают вихревые токи, действие которых эквивалентно действию тока в короткозамкнутой обмотке.

Питание обмотки возбуждения.

В зависимости от способа питания обмотки возбуждения различают системы независимого возбуждения и самовозбуждения.

При независимом возбуждении в качестве источника для питания обмотки возбуждения служит генератор постоянного тока (возбудитель), установленный на валу ротора синхронной машины (рис. 6, а), либо отдельный вспомогательный генератор, приводимый во вращение синхронным или асинхронным двигателем.

При самовозбуждении обмотка возбуждения питается от обмотки якоря через управляемый или неуправляемый выпрямитель — обычно полупроводниковый (рис. 6, б).

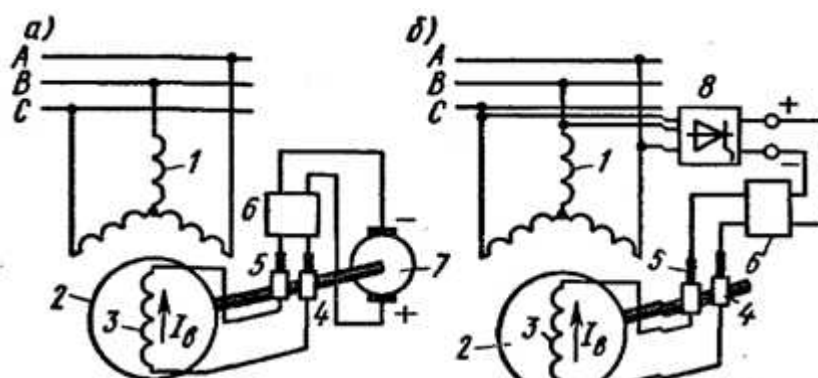


Рис. 6. Схема возбуждения синхронных машин:
1 - обмотка якоря; 2 - ротор генератора; 3 - обмотка возбуждения;
4 - кольца; 5 - щетки; 6 - регулятор напряжения; 7 - возбудитель;
8 - выпрямитель.

Мощность, необходимая для возбуждения, сравнительно невелика и составляет 0,3 - 3 % от мощности синхронной машины.

В мощных генераторах кроме возбудителя обычно применяют подвозбудитель — небольшой генератор постоянного тока, служащий для возбуждения основного возбудителя.

Основным возбудителем в этом случае может служить синхронный генератор совместно с полупроводниковым выпрямителем.

Питание обмотки возбуждения через полупроводниковый выпрямитель, собранный на диодах или на тиристорах, широко применяют как в двигателях и генераторах небольшой и средней мощности, так и в мощных турбо- и гидрогенераторах (тиристорная система возбуждения).

Регулирование тока возбуждения I_b осуществляется автоматически специальными регуляторами возбуждения, однако в машинах небольшой мощности применяется регулировка и вручную реостатом, включенным в цепь обмотки возбуждения.

В современных синхронных генераторах применяют так называемую бесщеточную систему возбуждения (рис. 7, в).

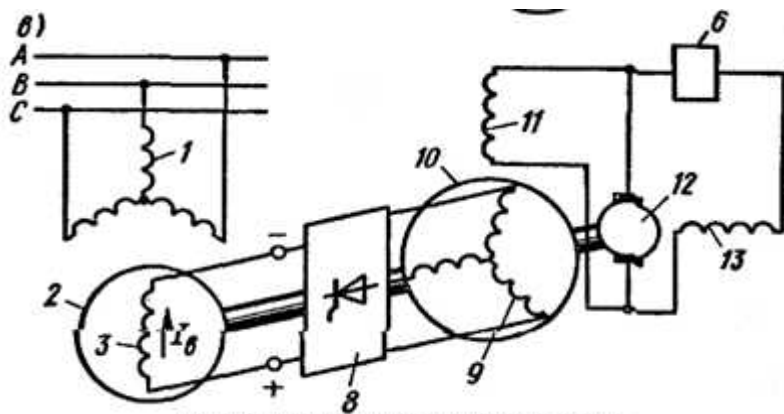


Рис. 7. Схема возбуждения синхронной машины:

- 1 - обмотка якоря; 2 - ротор генератора; 3 - обмотка возбуждения; 4 - кольца;
5 - щетки; 6 - регулятор напряжения; 7 - возбудитель; 8 - выпрямитель;
9 - обмотка якоря возбудителя; 10 - ротор возбудителя; 11 - обмотка возбуждения
возбудителя; 12 - подвозбудитель; 13 - обмотка возбуждения подвозбудителя

При этом в качестве возбудителя используют синхронный генератор, у которого обмотка якоря расположена на роторе, а выпрямитель укреплен непосредственно на валу.

Обмотка возбуждения возбудителя получает питание от подвозбудителя, снабженного регулятором на-

пряжения.

При таком способе возбуждения в цепи питания обмотки возбуждения генератора отсутствуют скользящие контакты, что существенно повышает надежность системы возбуждения.

ЛЕКЦИЯ 11

Тема: Реакция якоря СГ

Учебные вопросы:

Введение.

1. Магнитное поле обмотки возбуждения.
2. Продольная и поперечная реакция якоря.
3. Магнитные поля и ЭДС продольной и поперечной реакции якоря.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь 1983г.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1987. - 832 с.

Введение.

При нагрузке обмотки якоря синхронной машины током она создает собственное магнитное поле, которое называется **полем реакции якоря**.

В отличие от машин постоянного тока в синхронной машине влияние реакции якоря на магнитный поток весьма значительно.

Это обусловлено прежде всего тем, что в синхронной машине в общем случае возникает также значительная продольная реакция якоря, усиливающая или ослабляющая поток полюсов.

Кроме того, поле поперечной реакции якоря синхронной машины также индуцирует значительную ЭДС в обмотке якоря.

Поэтому реакция якоря синхронной машины оказывает весьма значительное влияние на характеристики и поведение синхронной машины как при установившихся, так и при переходных режимах работы.

Индуктор (ротор) явнополусной машины имеет магнитную несимметрию, так как из-за большого междуполусного пространства магнитное сопротивление потоку, действующему по направлению поперечной оси q , т. е. по оси междуполусного пространства, значительно больше магнитного сопротивления потоку, действующему по продольной оси d .

Поэтому одинаковая по значению н.с. якоря при ее действии по продольной оси создает больший магнитный поток, чем при действии по поперечной оси.

Кроме того, как ротор явнополусной, так и ротор неявнополусной машины имеют также электрическую несимметрию, так как их обмотки возбуждения расположены только по продольной оси d , т. е. создают поток, действующий по оси d , и сами сцепляются только с потоком якоря, действующим по этой же оси.

Электрическая несимметрия индукторов синхронных машин существенным образом проявляется при несимметричных и переходных режимах их работы.

Ввиду несимметричного устройства индуктора возникает необходимость рассматривать действие реакции якоря по продольной и поперечной осям в отдельности.

Метод такого рассмотрения впервые был предложен французским электротехником А. Блонделем в 1895 г. и называется методом или теорией двух реакций.

Метод двух реакций основан на принципе наложения, при котором предполагается, что магнитные потоки, действующие по поперечной оси, не влияют на значение потоков, действующих по продольной оси, и наоборот.

Вследствие определенного насыщения участков магнитной цепи это предположение не вполне правильно. Однако учет влияния насыщения очень сложен, а определенные коррективы могут быть внесены дополнительно.

1. Магнитное поле обмотки возбуждения СГ.

1.1. Явнополюсная машина

Обмотка возбуждения создает магнитный поток возбуждения синхронной машины (рис. 1), который сцепляется с обмоткой якоря и индуцирует в ней ЭДС.

Магнитная характеристика $\Phi = f(i_f)$ синхронной машины имеет такой же вид, как и у других электрических машин.

Рассмотрим особенности магнитного поля, создаваемого обмоткой возбуждения, и индуктивности этой обмотки.

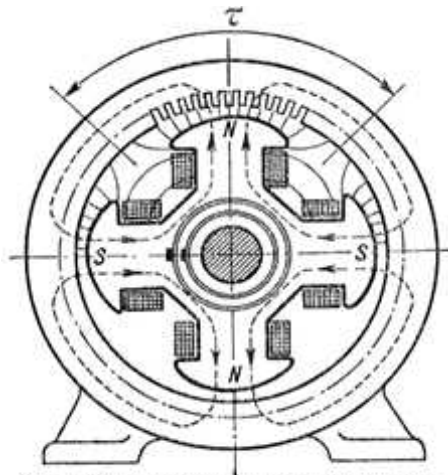


Рис. 1. Магнитное поле обмотки возбуждения синхронной машины

Величины, относящиеся к обмотке возбуждения синхронной машины, будем обозначать индексом f , как это принято в большинстве литературных источников.

На рис. 2, а изображена картина магнитного поля обмотки возбуждения в воздушном зазоре явнополюсной синхронной машины на протяжении одного полюсного деления.

На рис. 2, б кривая 1 представляет собой распределение магнитной индукции поля возбуждения B_f на поверхности якоря (статора).

При проектировании синхронных машин принимаются меры к тому, чтобы эта кривая по возможности приближалась к синусоиде.

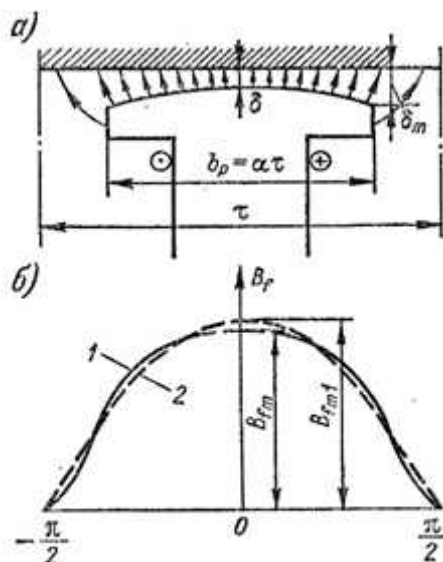


Рис. 2. Магнитное поле обмотки возбуждения явнополюсной синхронной машины в воздушном зазоре

Однако вполне синусоидального распределения B_f достичь невозможно и поле возбуждения (кривая 1 на рис. 2, б) можно разложить на основную (кривая 2) и высшие гармоники, которые индуцируют в обмотке якоря соответственно основную и высшие гармоники ЭДС.

Высшие гармоники э.д.с. относительно малы, так как малы соответствующие гармоники поля и, кроме того, выбором шага и числа пазов на полюс и фазу обмотки якоря достигается уменьшение высших гармоник ЭДС.

Поэтому в теории синхронных машин учитывается только основная гармоника ЭДС якоря и соответственно потоком вза-

имной индукции между индуктором и якорем считается основная гармоника поля возбуждения (кривая 2 на рис. 2, б).

Отношение амплитуды основной гармоники поля возбуждения B_{fm1} к действительному максимальному значению этого поля B_{fm} (см. рис. 2, б)

$$k_f = B_{fm1} / B_{fm} \quad (1)$$

называется **коэффициентом формы кривой поля возбуждения**.

Н.с. обмотки возбуждения на один полюс

$$F_f = \frac{w_f i_f}{2p}, \quad (2)$$

где w_f - число витков всей обмотки возбуждения; i_f - ток возбуждения.

1.2. Неявнополюсная машина

На рис. 3, а представлена картина магнитного поля возбуждения в воздушном зазоре неявнополюсной машины на протяжении полюсного деления.

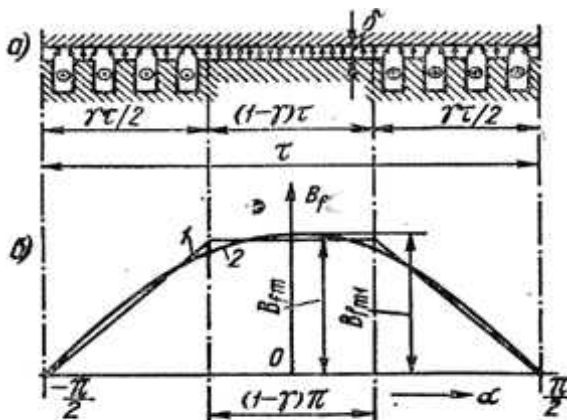


Рис. 3. Магнитное поле возбуждения неявнополюсной синхронной машины в воздушном зазоре

В этих машинах ширина открытия паза по сравнению с величиной зазора δ относительно невелика, а число пазов ротора велико ($Z_2 = 20 \div 40$).

Поэтому влияние пазов также невелико и можно принять, что кривая распределения индукции поля возбуждения вдоль зазора имеет вид трапеции (кривая 1 на рис. 3, б).

Величина γ на рис. 3, б и ниже представляет собой отношение обмотанной части ротора ко всей окружности ротора или отношение числа обмотанных пазов к полному числу пазовых делений.

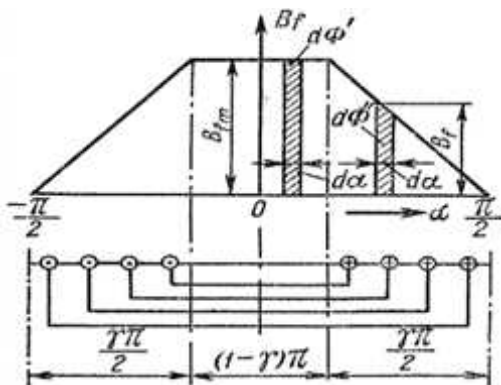


Рис. 4. Определение потокоцепления самоиндукции обмотки возбуждения неявнополюсной синхронной машины

В связи со сказанным обмотку возбуждения неявнополюсной машины (см. рис. 4, б) можно рассматривать как распределенную однофазную обмотку с полным шагом.

Величина

$$k_{оф} = \frac{\sin \frac{\gamma\pi}{2}}{\gamma\pi/2} \quad (3)$$

представляет собой **коэффициент распределения, или обмоточный коэффициент**,

этой обмотки.

На рис. 4 изображена кривая индукции B_f вдоль зазора на протяжении полюсного деления.

2. Продольная и поперечная реакция якоря.

Рассмотрим действие реакции якоря многофазной синхронной машины при установившейся симметричной нагрузке (рис. 5).

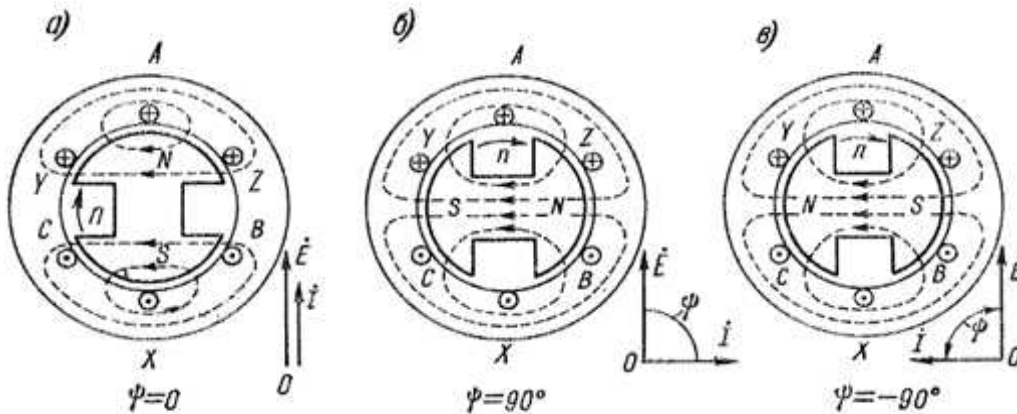


Рис. 5. Поперечная (а), продольно-размагничивающая (б) и продольно-намагничивающая (в) реакция якоря синхронной машины

Для наглядности будем иметь в виду двухполюсную машину и предположим, что она работает в режиме генератора. Получаемые результаты нетрудно распространить также на двигательный режим работы.

Ради простоты и наглядности на рис. 5 каждая фаза обмотки изображена в виде одного витка с полным шагом ($A - X$, $B - Y$, $C - Z$), буквами N , S указана полярность поля возбуждения, а магнитные линии этого поля не показаны.

Сначала рассмотрим случай, когда угол сдвига фаз Ψ между током якоря $\vec{I}$ и ЭДС $\vec{E}$, индуцируемой в обмотке якоря током или полем возбуждения, равен нулю (рис. 5, а).

Ротор вращается с электрической угловой скоростью

$$\omega_f = 2\pi f_1 = 2\pi n_1 p,$$

и при положении ротора, изображенном на рис. 5, а, ЭДС фазы A максимальна.

Так как $\Psi = 0$, то ток этой фазы также максимален и

$$i_a = I_m; \quad i_b = i_c = -\frac{1}{2}I_m.$$

Направления токов i_a , i_b , i_c нетрудно установить по правилу правой руки, и они указаны на рис. 5, а крестиками и точками.

При этих направлениях токов магнитные линии поля реакции якоря в полюсах и теле якоря направлены, как показано на рис. 5, а, поперек оси полюсов d .

Следовательно, поток реакции якоря Φ_a действует по поперечной оси. Такой характер поля реакции якоря при $\Psi = 0$ сохраняется при любом положении вращающегося ротора, так как ротор и поле реакции якоря вращаются синхронно.

Следовательно, при $\Psi = 0$ реакция якоря синхронной машины является **чисто поперечной**.

Если ток $\dot{I}$ отстает от э. д. с. $\dot{E}$ на $\Psi = 90^\circ$, то максимум тока в фазе А наступает по сравнению со случаем на рис. 5, а на четверть периода позднее, когда ротор повернется на 90° по часовой стрелке (рис. 5, б).

Токи фаз на рис. 5, б имеют такие же значения, как и на рис. 5, а, вследствие чего и ориентация магнитного потока якоря в пространстве является такой же.

Как видно из рис. 5, б, при отстающем токе и $\Psi = 90^\circ$ реакция якоря действует по продольной оси и является по отношению к полю возбуждения чисто размагничивающей (**продольная размагничивающая реакция якоря**).

Если ток $\dot{I}$ опережает ЭДС $\dot{E}$ на $\Psi = -90^\circ$, то максимум тока в фазе А наступает по сравнению со случаем на рис. 5, а на четверть периода раньше и в этот момент времени ротор занимает по сравнению с рис. 5, а положение, повернутое на 90° против направления вращения (рис. 5, в).

Токи фаз на рис. 5, в имеют такие же значения, как и на рис. 5, а.

Из рис. 5, в видно, что при опережающем токе и $\Psi = -90^\circ$ реакция якоря также действует по продольной оси, но является по отношению к полю возбуждения чисто намагничивающей, т. е. она увеличивает поток по продольной оси машины (**продольная намагничивающая реакция якоря**).

Как следует из рис. 6, ток $\dot{I}$, совпадающий по фазе с ЭДС $\dot{E}$, создает

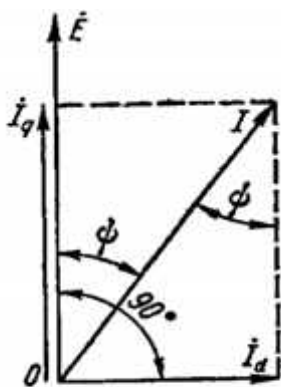


Рис. 6. Разложение тока якоря I на продольную I_d и поперечную I_q составляющие

поперечную реакцию якоря, а ток $\dot{I}$, сдвинутый относительно $\dot{E}$ на $\Psi = 90^\circ$, создает продольную реакцию якоря.

Поэтому в общем случае, когда $\alpha \neq 0$ и $\alpha \neq 90^\circ$, ток $\dot{I}$ можно разложить на две составляющие (рис. 6):

$$I_d = I \sin \alpha ; \quad (4)$$

$$I_q = I \cos \alpha , \quad (5)$$

первая из которых называется продольной составляющей тока или продольным током якоря и создает продольную реакцию якоря, а вторая называется поперечной составляющей тока или поперечным

током якоря и создает поперечную реакцию якоря.

Угол Ψ считается положительным, когда $\dot{I}$ отстает от $\dot{E}$.

3. Магнитные поля и ЭДС продольной и поперечной реакции якоря.

Рассмотрим основные гармоники н.с. якоря при симметричной нагрузке.

Продольный ток I_d создает продольную н.с. якоря с амплитудой

$$F_{ad} = \frac{m\sqrt{2}}{\textcircled{R}} \cdot \frac{wk_{об}}{p} I_d, \quad (6)$$

а поперечный ток I_q создает поперечную н.с. якоря с амплитудой

$$F_{aq} = \frac{m\sqrt{2}}{\textcircled{R}} \cdot \frac{wk_{об}}{p} I_q \quad (7)$$

Н.с. F_{ad} и F_{aq} можно также рассматривать как составляющие полной н.с. якоря

$$F_a = \frac{m\sqrt{2}}{\textcircled{R}} \cdot \frac{wk_{об}}{p} I \quad (8)$$

По осям d и q , причём

$$F_{ad} = F_a \sin \alpha \quad (9)$$

Максимум волны н.с. F_{ad} совпадает с продольной, а максимум волны н.с. F_{aq} – с поперечной осью (рис. 7, кривые 1).

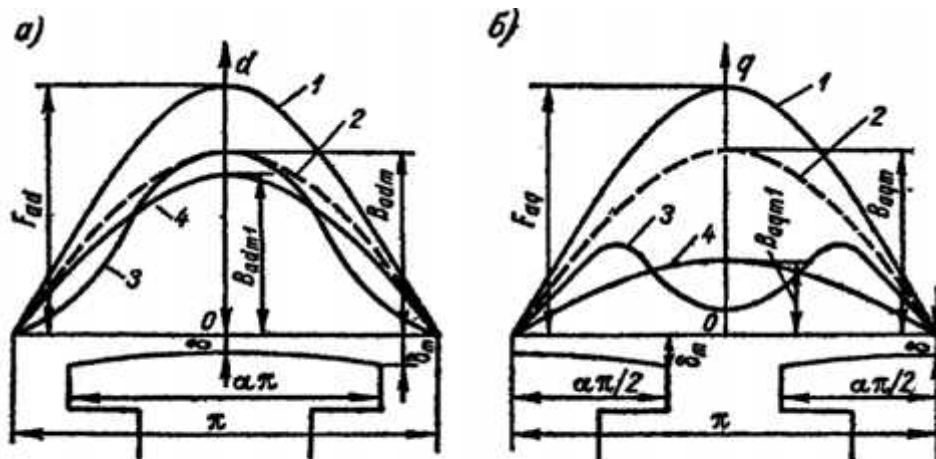


Рис. 7. Кривые поля реакции якоря явнополюсной синхронной машины по продольной (а) и поперечной (б) осям

Если бы величина зазора была по всей окружности одинакова и равна его значению под серединой полюсного наконечника, то н.с. F_{ad} и F_{aq} создали бы синусоидальные пространственные волны магнитного поля (кривые 2 на рис. 7).

Вследствие неравномерности воздушного зазора действительные кривые индукции 3 на рис. 7, создаваемой синусоидальными волнами н.с. F_{ad} и F_{aq} , не будут синусоидальными.

Эти кривые можно разложить на гармоники $\nu = 1, 3, 5...$, причем на рис. 7 в виде кривых 4 представлены основные гармоники ($\nu = 1$) поля продольной и поперечной реакции якоря с амплитудами B_{adm1} , B_{aqm1} .

Все указанные гармоники поля вращаются синхронно с ротором и индуцируют в обмотке якоря ЭДС с частотами $f_{\omega} = \omega f_1$.

Высшие гармоники ЭДС относительно малы, так как относительно малы соответствующие гармоники поля и, кроме того, укорочение шага и распределение обмотки якоря способствуют уменьшению этих гармоник ЭДС.

Опыт показывает, что ЭДС, индуцируемые полями реакции якоря, в действительности практически синусоидальны.

Поэтому в теории синхронных машин учитываются только основные гармоники поля (кривые 4 на рис. 7).

Основные гармоники полей продольной и поперечной реакции якоря (кривые 4 на рис. 7) создают потоки реакции якоря

$$\Phi_{ad} = \frac{2}{\pi} B_{adm1}^2 l_{\zeta} = \frac{2}{\pi} k_{ad} B_{adm}^2 l_{\zeta};$$

$$\Phi_{aq} = \frac{2}{\pi} B_{aqm1}^2 l_{\zeta} = \frac{2}{\pi} k_{aq} B_{aqm}^2 l_{\zeta}.$$

Потоки Φ_{ad} и Φ_{aq} вращаются синхронно с ротором и индуцируют в обмотке якоря ЭДС самоиндукции.

$$E_{ad} = \omega \sqrt{2} f_1 w k_{об} \Phi_{ad};$$

$$E_{aq} = \omega \sqrt{2} f_1 w k_{об} \Phi_{aq}, \quad (10)$$

которые называются ЭДС продольной и поперечной реакции якоря.

ЛЕКЦИЯ 12

Тема: Векторные диаграммы и характеристики СГ

Учебные вопросы:

Введение.

1. Векторные диаграммы неявнополюсных синхронных генераторов.
2. Векторные диаграммы синхронных явнополюсных генераторов.
3. Характеристики синхронных генераторов генераторов.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.

3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь, 1983.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1987. - 832 с.

Введение.

Процессы электромеханического преобразования энергии в синхронной неявнополюсной машине описываются в установившемся режиме уравнениями, полученными из представления машины в виде четырехполюсника.

В неявнополюсной синхронной машине зазор по продольной и поперечной осям машины одинаковый и поэтому $x_d = x_q = x_c$.

Для ненасыщенной неявнополюсной синхронной машины уравнения могут быть записаны в следующем виде:

$$\dot{U}_a = \dot{E}_0 - jx_c \dot{I}_a, \quad (1)$$

где $\dot{E}_0$ - ЭДС при холостом ходе.

Уравнения неявнополюсной синхронной машины (1) можно представить следующим образом:

$$\dot{U}_a = \dot{E}_0 - jx_a \dot{I}_a - jx_{\pm a} \dot{I}_a - r_a \dot{I}_a \quad (2)$$

Здесь x_a - индуктивное сопротивление реакции якоря; $x_c = x_a + x_{\pm a}$; $\dot{E}_0 - jx_a \dot{I}_a - jx_{\pm a} \dot{I}_a = \dot{E}_\phi$ - ЭДС воздушного зазора, которая также равна $\dot{U}_a + jx_{\pm a} \dot{I}_a + r_a \dot{I}_a$.

Измерить $\dot{E}_\phi$ нельзя, но ее нетрудно представить как напряжение на выходе машины плюс падение напряжения на внутреннем сопротивлении машины $z_a = r_a + jx_{\pm a}$, состоящем из активного r_a и индуктивного сопротивления рассеяния $x_{\pm a}$ обмотки якоря.

С учетом сказанного из (2)

$$\dot{U}_a = \dot{E}_\phi - jx_a \dot{I}_a - r_a \dot{I}_a \quad (3)$$

1. Векторные диаграммы неявнополюсных синхронных генераторов

Для (2) и (3) может быть построена векторная диаграмма, показанная на рис. 1.

При холостом ходе на выводах генератора имеет место напряжение $\dot{E}_0$.

При нагрузке напряжение изменяется из-за реакции якоря, что характеризуется вектором $j\dot{I}_a x_a$.

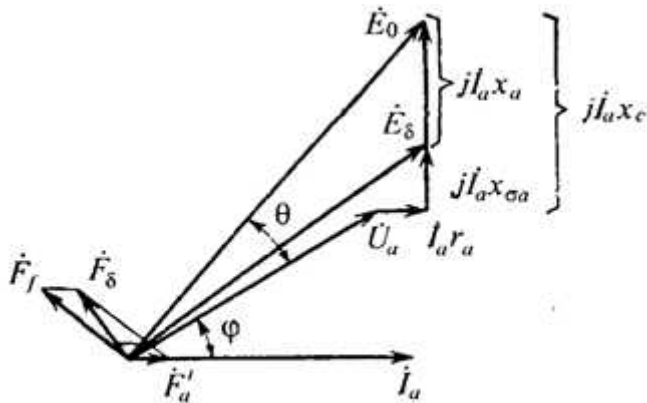


Рис. 1. Векторная диаграмма неявнополюсного генератора без учета насыщения

Напряжение на выводах генератора $\dot{U}_a$ получается, если учесть падение напряжения на сопротивлении обмотки якоря z_a .

Падение напряжения на обмотке якоря состоит из падения напряжения на активном сопротивлении $\dot{I}_a r_a$ и индуктивном сопротивлении рассеяния $j\dot{I}_a x_{\pm a}$.

Падение напряжения на выводах машины в большой степени зависит от характера нагрузки. Векторная диаграмма рис. 1 построена для смешанной индуктивно-активной нагрузки. Со стороны нагрузки $\dot{U}_a = \dot{I}_a z_n$.

Векторная диаграмма неявнополюсной машины построена без учета насыщения и соответствует (3).

Диаграмму МДС можно построить, если известна МДС якоря $\vec{F}_a'$, которая совпадает с током $\vec{I}_a$.

Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения перпендикулярна $\vec{E}_0$, а результирующая МДС равна геометрической сумме $\vec{F}_f$ и $\vec{F}_a'$.

Различный характер распределения МДС обмотки в воздушном зазоре якоря и обмотки возбуждения вдоль поверхности статора не позволяет геометрически складывать МДС этих обмоток; МДС $\vec{F}_a'$ и $\vec{F}_f$ можно сложить только после приведения их к единой базе — одинаковому виду распределения.

В качестве базовой можно взять любую обмотку — якоря или возбуждения. В теории электрических машин равноправно используются оба подхода.

Векторные диаграммы дают возможность определить изменение напряжения при изменении нагрузки, ток возбуждения, необходимый для получения заданного напряжения при изменении I_a , и $\cos\varphi$, а также построить внешние и регулировочные характеристики.

Чтобы построить внешние и регулировочные характеристики, необходимо построить векторные диаграммы для нескольких значений токов нагрузки.

2. Векторные диаграммы синхронных явнополюсных генераторов.

В явнополюсных синхронных машинах зазоры по продольной и поперечной осям машины различны, поэтому амплитуда поля зависит от по-

ложения оси поля относительно оси полюсов. Смещение оси поля определяется реакцией якоря.

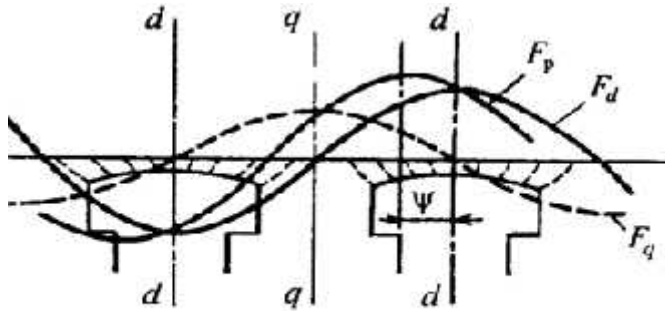


Рис. 2. Разложение регулировочной МДС F_p на продольную F_d и поперечную F_q составляющие

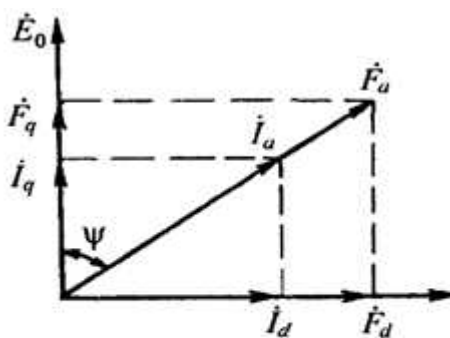


Рис. 3. К определению МДС и токов по продольной и поперечной осям машины

Для учета влияния реакции якоря в явнополюсных машинах А. Блонделем был предложен метод двух реакций.

Метод двух реакций основан на разложении МДС якоря на две МДС – продольную и поперечную, действующие соответственно по продольной и поперечной осям машины (рис. 2).

Чтобы найти сосредоточенные МДС реакции якоря, действующие по продольной и поперечной осям машины, разложим ток, протекающий в якоре машины на две составляющие: продольную и поперечную (рис. 3).

Соответственно найдем продольную и поперечную составляющие реакции якоря $\dot{F}_d$ и $\dot{F}_q$.

Чтобы определить приведенные продольные и поперечные составляющие реакции якоря, надо $\dot{F}_d$ и $\dot{F}_q$ умножить на коэффициенты приведения по продольной и поперечной осям машины:

$$\begin{aligned} F_{ad} &= F_d k_{ad} = F_a \sin \alpha k_{ad}; \\ F_{aq} &= F_q k_{aq} = F_a \sin \alpha k_{aq}. \end{aligned} \quad (4)$$

где F_d и F_q – МДС по продольной и поперечной осям машины с равномерным воздушным зазором.

Коэффициенты приведения по продольной k_{ad} и поперечной k_{aq} осям машины учитывают неравномерность воздушного зазора и геометрию зубцовой зоны.

В книгах по проектированию синхронных машин приводятся их значения в зависимости от отношения длины полюсного наконечника b_p к длине полюсного деления τ , числа полюсов p , формы полюсов.

Коэффициенты k_{ad} и k_{aq} определяют как расчетным, так и опытным путем.

Векторная диаграмма явнополюсной машины может быть построена по уравнениям (1) – (4).

При известных значениях $\dot{U}$, $\dot{I}_a$ и $\cos \varphi$, откладываем $\dot{I}_a r_a$ (рис. 4).

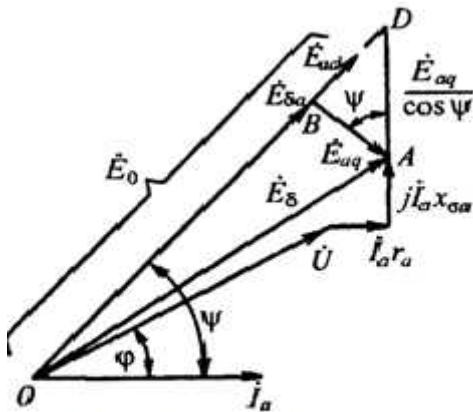


Рис. 4. Векторная диаграмма явнополюсного синхронного генератора

На продолжении отрезка $j \dot{I}_a x_{\pm a}$ (рис. 4) откладываем отрезок AD , равный

$$AD = \frac{E_{aq}}{\cos \varphi} = \frac{I_a x_{aq}}{\cos \varphi} = \dot{I}_a x_{aq}.$$

Значение AD можно найти из характеристики холостого хода (рис. 5).

Магнитодвижущей силе $F_a k_{aq}$ соответствует ЭДС $\frac{E_{aq}}{\cos \varphi}$ (рис. 5).

После того, как найдена точка D ее соединяют с началом диаграммы.

На линии OD лежат векторы ЭДС

$\dot{E}_{\phi d}$, $\dot{E}_0$ и $\dot{E}_{ad}$.

Чтобы найти модули этих векторов, из точки A на линию OD опускают перпендикуляр AB . Из треугольника OAB следует, что отрезок AB представляет собой ЭДС $\dot{E}_{ad}$.

Зная $\dot{E}_{\phi d}$, по характеристике холостого хода определяют $F_{\phi d}$. Затем находят $F_{ad} = k_{ad} F_a \sin \varphi$.

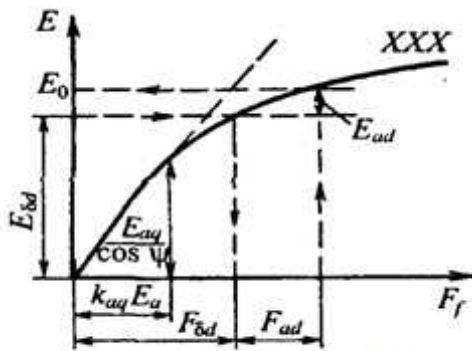


Рис. 5. К определению E_{ad} , F_{ad} , $F_{\phi d}$ и ЭДС холостого хода E_0

После этого по характеристике XXX, зная $F_{\phi d}$ и F_{ad} определяют $\dot{E}_{\phi d}$, $\dot{E}_0$ и $\dot{E}_{ad}$ (рис. 5) и достраивают векторную диаграмму (рис. 4).

Векторная диаграмма явнополюсной машины построена с учетом насыщения. Из нее можно определить $F_f = F_{\pm d} + F_{ad}$, необходимую для того, чтобы при нагрузке в обмотке якоря протекал ток нагрузки I_a при напряжении U и заданном $\cos \varphi$.

В явнополюсной синхронной машине имеют место падения напряжения за счет продольной $\dot{E}_{ad}$ и поперечной $\dot{E}_{aq}$ реакций якоря и на сопротивлениях обмотки якоря r_a и $x_{\pm a}$.

В соответствии с методом двух реакций ЭДС обмотки якоря на векторной диаграмме представлена ЭДС по продольной и поперечной осям $\dot{E}_{ad}$ и $\dot{E}_{aq}$.

Диаграмма на рис. 4 построена для индуктивно-активной нагрузки. Аналогично можно построить диаграммы и для активной и активно-емкостной нагрузок.

3. Характеристики синхронных генераторов

Характеристики дают наглядное представление о ряде основных свойств синхронных генераторов.

Они могут быть построены по расчетным данным, с помощью векторных диаграмм, или по данным соответствующих опытов.

Основными характеристиками синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку, являются:

- характеристика холостого хода;
- внешняя характеристика;
- регулировочная характеристика;
- характеристика короткого замыкания.

3.1. Характеристика холостого хода

Характеристика холостого хода XXX показана на рис. 6.

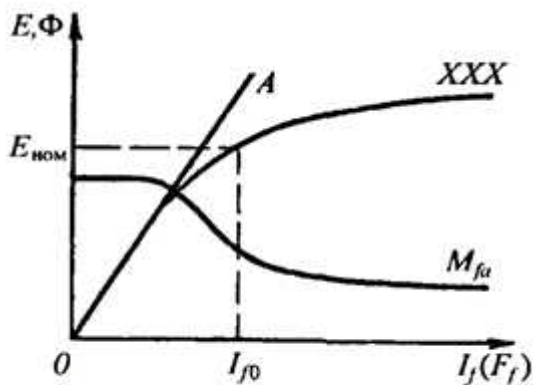


Рис. 6. Характеристика холостого хода синхронного генератора

Характеристика холостого хода имеет начальную прямолинейную часть ОА, когда магнитная цепь не насыщена. Машина начинает насыщаться вблизи номинального значения ЭДС.

При глубоком насыщении XXX снова становится линейной. По XXX можно определить взаимную индуктивность между обмотками возбуждения и обмоткой якоря.

Опытным путем характеристику холостого хода снимают при постоянной номинальной частоте вращения при изменении I_f и разомкнутой обмотке якоря ($I_a = 0$).

При исследовании характеристики холостого хода сначала строят восходящую ветвь, а затем при уменьшении I_f — нисходящую. При расчетах используется средняя кривая.

3.2. Внешняя характеристика

Внешними характеристиками синхронного генератора называются зависимости $U = f(I_a)$ при $n = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$, снятые при неизменном токе возбуждения $I_f = \text{const}$.

На рис. 7 показаны внешние характеристики синхронного генератора в относительных единицах при чисто активной R , индуктивной L и емкостной C нагрузках.

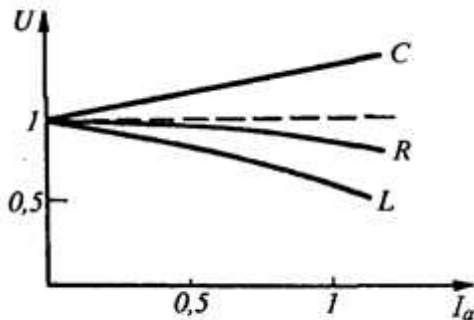


Рис. 7. Внешние характеристики синхронных генераторов

При активной нагрузке при увеличении тока нагрузки I_a напряжение на выходе генератора уменьшается вследствие падения напряжения на внутреннем сопротивлении машины $z_a = r_a + jx_{\pm a}$ и влияния поперечной реакции якоря.

При индуктивной нагрузке за счет более сильного размагничивающего действия продольной реакции якоря внешняя характеристика при чисто индуктивной нагрузке идет ниже внешней характеристики при активной нагрузке.

При емкостной нагрузке реакция якоря подмагничивающая, поэтому с ростом нагрузки растет напряжение на выводах генератора.

Номинальным изменением напряжения синхронного генератора $\Delta U_{ном}$ называется изменение напряжения при изменении нагрузки от нуля до номинальной при неизменном токе возбуждения (рис. 8)

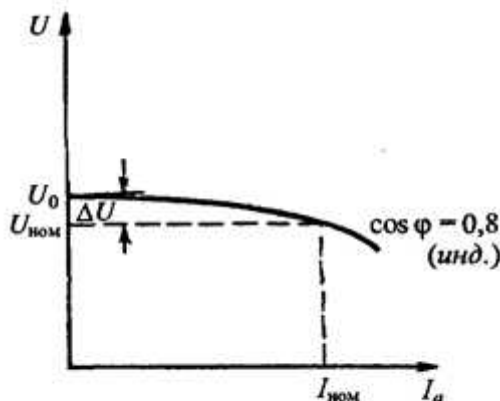


Рис. 8. К определению $\Delta U_{ном}$

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} 100\% \quad (5)$$

Как правило, генераторы работают при отстающем токе с $\cos \varphi = 0,8$. ΔU обычно равно 20 - 30 %, $\Delta U_{ном}$ тем больше, чем больше x_d . ГОСТ не лимитирует значения $\Delta U_{ном}$.

Регулировочная характеристика.

Регулировочная характеристика

— это зависимость тока возбуждения от тока якоря $I_f = f(I_a)$ при постоянном напряжении, постоянной частоте вращения и неизменном $\cos \varphi$ нагрузки.

Регулировочные характеристики показывают, как нужно изменять ток возбуждения при изменении нагрузки, чтобы напряжение на выводах генератора оставалось постоянным (рис. 9).

Регулировочные характеристики могут быть построены, если известны внешние характеристики.

При увеличении нагрузки при индуктивной нагрузке напряжение уменьшается (рис. 7). Чтобы напряжение оставалось неизменным, надо увеличивать ток возбуждения.

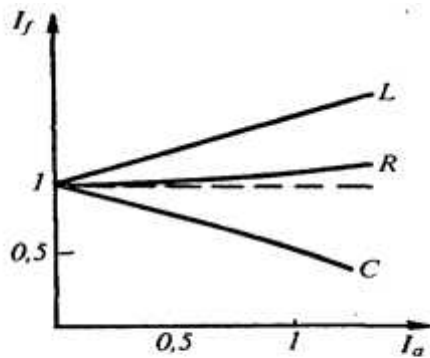


Рис. 9. Регулировочные характеристики синхронных генераторов

При емкостной нагрузке при увеличении тока в якоре машины напряжение на выводах генератора растет (рис. 7). Чтобы оно оставалось неизменным, надо уменьшать ток возбуждения (рис. 9).

Так же, как и внешние характеристики, регулировочные характеристики при небольших нагрузках линейны.

При нагрузках, близких к номинальному значению, из-за насыщения регулировочные характеристики становятся нелинейными (рис. 9).

Характеристика короткого замыкания

Одной из важных характеристик синхронной машины является **характеристика короткого замыкания** — зависимость тока якоря от тока возбуждения $I_k = f(I_f)$ при симметричном коротком замыкании на выводах якоря при номинальной частоте вращения (рис. 10).

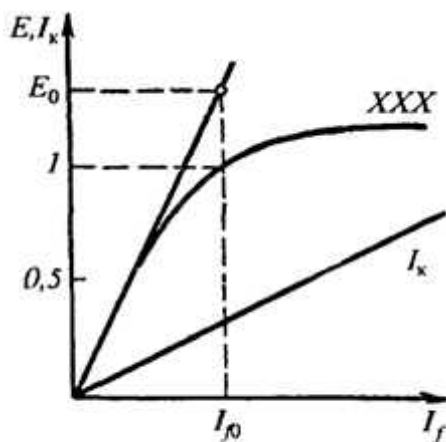


Рис. 10. Характеристика короткого замыкания

Эта зависимость линейная, так как генератор не насыщен (работает при размагничивающей реакции якоря).

Индуктивный характер тока при коротком замыкании определяется индуктивным сопротивлением обмотки якоря, которое значительно больше активного сопротивления обмотки (в относительных единицах $R = 0,01 \div 0,001$, а $x_d = 1,0 \div 2,5$).

Ток короткого замыкания может быть определен как

$$I_k = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + x_d^2}}, \quad (6)$$

где E_0 - ЭДС, соответствующая току возбуждения I_{f0} , которая определяется по спрямленной характеристике холостого хода.

Пренебрегая активным сопротивлением, ток короткого замыкания можно определить

$$I_k = \frac{E_0}{x_d}. \quad (7)$$

В относительных единицах ток короткого замыкания обратно пропорционален x_d .

Таким образом, можно по характеристике холостого хода и характеристике короткого замыкания определить опытным путем x_d .

Отношение тока короткого замыкания к номинальному току в относительных единицах при токе возбуждения I_{f0} , при котором $E_0 = U_{ном}$, называется **отношением короткого замыкания (ОКЗ)** и для ненасыщенной явнополусной машины

$$ОКЗ = \frac{U_{ном}}{x_d I_{ном}} = \frac{1}{x_d}. \quad (8)$$

Чем больше ОКЗ, тем больше предельная нагрузка; ОКЗ тем больше, чем больше воздушных зазор, т.е. при той же мощности меньше концентрация энергии магнитного поля.

3.5. Нагрузочная характеристика.

Нагрузочная характеристика — это зависимость напряжения на генераторе от тока возбуждения $U = f(I_f)$ при постоянных токе якоря, cosφ нагрузки и частоте вращения (рис. 11).

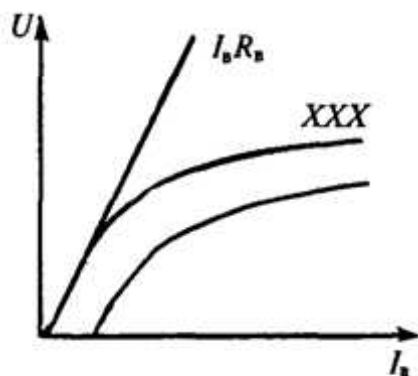


Рис. 11. Нагрузочная характеристика

При изменении напряжения ток в якоре поддерживается неизменным путем регулирования сопротивления нагрузки.

Нагрузочные характеристики снимают только при индуктивной нагрузке. Поэтому и называют зависимость $U = f(I_f)$ при $\cos\varphi = \text{const}$ индукционной нагрузочной характеристикой.

Индукционная нагрузочная характеристика является вспомогательной характеристикой и используется для определения индуктивного сопротивления рассеяния.

Для этого необходимо иметь характеристику холостого хода XXX и индукционную нагрузочную характеристику, снятые опытным путем (рис. 12).

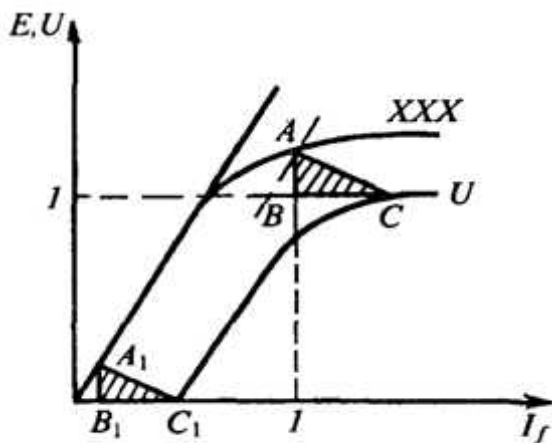


Рис. 12. К построению реактивного треугольника

Имея эти характеристики, можно построить реактивный треугольник ABC. В треугольнике ABC катет AB равен падению напряжения в сопротивлении рассеяния якоря $I_a x_{\pm a}$, а горизонтальный катет BC равен МДС реакции якоря в масштабе тока возбуждения, в котором построены характеристика холостого хода и нагрузочная характеристика (рис. 12).

Реактивный треугольник показывает, что уменьшение напряжения

при снятии нагрузочной характеристики происходит вследствие падения напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния $x_{\pm a}$ (катет AB) и размагничивающего действия реакции якоря (катет BC).

Если известны катеты реактивного треугольника, то по характеристике холостого хода ХХХ можно построить нагрузочную характеристику, передвигая реактивный треугольник параллельно самому себе (треугольник $A_1B_1C_1$).

Если имеются снятые опытным путем ХХХ и нагрузочная характеристика, можно определить $x_{\pm a}$, зная продольную реакцию якоря (катет BC в масштабе тока возбуждения).

Приближенно катеты реактивного треугольника определяются по спрямленной ХХХ так, как это показано на рис. 12.

ЛЕКЦИЯ 13

Тема: Параллельная работа СГ

Учебные вопросы:

Введение.

1. Включение на параллельную работу синхронных генераторов.
2. Синхронные режимы параллельной работы синхронных машин.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь, 1983.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1987. – 832 с.

Введение.

В настоящее время мощные энергосистемы состоят из большого числа электрических станций, работающих параллельно друг с другом.

Благодаря этому повышаются надежность и экономичность производства и распределения электрической энергии, появляется возможность маневрирования работой отдельных станций с учетом наиболее рациональных условий преобразования различных видов энергии уменьшается мощность аварийного и ремонтного резервов и т. д.

Так как на каждой из станций установлены десятки генераторов, то в энергосистеме на параллельную работу будет включено несколько сотен машин.

При этом условии, несмотря на то что мощности синхронных генераторов установленных на станциях, велики, а в ряде случаев являются предельными, по сравнению с общей мощностью системы они будут малы.

При любых изменениях режима работы отдельного генератора, включенного в систему, напряжение в ней U_c и частота f остаются постоянными. Они поддерживаются всеми остальными генераторами системы.

В дальнейшем при рассмотрении параллельной работы синхронного генератора будем исходить из условия, что $U_c = \text{const}$ и $f = \text{const}$.

1. Включение на параллельную работу синхронных генераторов

Нагрузка в энергосистеме изменяется в течение суток, недели и года. Поэтому есть блоки, покрывающие постоянную нагрузку, а другие включаются для покрытия пиков нагрузки.

Постоянную нагрузку несут атомные станции, а турбогенераторы тепловых электростанций и гидрогенераторы на гидроэлектростанциях в течение года могут подключаться и отключаться от сети десятки и сотни раз в год.

Процесс разгона синхронной машины большой мощности и ее синхронизация оказывают значительное влияние на срок службы машины.

Процесс пуска крупных турбо- и гидрогенераторов длится несколько десятков минут.

Процессы пуска и синхронизации, хотя и занимают по времени небольшую часть по сравнению с длительной работой параллельно с сетью, которая может продолжаться без отключения в течение нескольких месяцев, снижают надежность работы синхронных машин больше, чем длительная работа.

Процесс включения генератора на параллельную работу с сетью — синхронизация машины — может быть точной и грубой.

При точной синхронизации необходимо соблюдать следующие условия:

- 1) частота сети и частота генератора должны быть одинаковыми;
- 2) напряжения сети и генератора совпадают по фазе и имеют одинаковые амплитуды;
- 3) порядки следования фаз сети и генератора должны совпадать.

При соблюдении этих условий генератор включается в сеть практически без бросков токов.

Равенство напряжений достигается путем регулирования тока возбуждения синхронного генератора, а равенство частот — путем регулирования частоты вращения ротора генератора.

На станции частота вращения изменяется за счет изменения частоты вращения паровой или гидравлической турбин или за счет изменения частоты вращения приводного двигателя.

При этих условиях в контуре сеть — машина сумма ЭДС равна нулю (рис. 1). Говорят, что при синхронизации ЭДС находятся в противофазе, имея в виду, что они уравнивают друг друга: $\dot{U}_c + \dot{E}_0 = 0$.

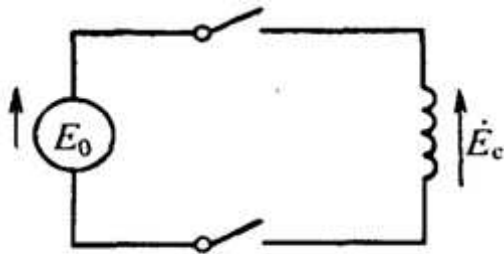


Рис. 1. Контур сеть — машина:
 E_0 — ЭДС генератора;
 E_c — ЭДС сети

Порядок следования фаз, равенство частот и напряжений сети и генератора и фазовый сдвиг между $\dot{U}_c$ и $\dot{E}_0$ определяются синхроскопом СН (рис. 2).

При правильном чередовании фаз сети и генератора лампы на рис. 2 гаснут одновременно. Если чередование фаз не соблюдается, на лампах имеет место бегущий огонь, когда лампы попеременно зажигаются и гаснут.

Равенство напряжений и сети фиксируется вольтметром, о расхождении напряжений можно также судить по яркости ламп.

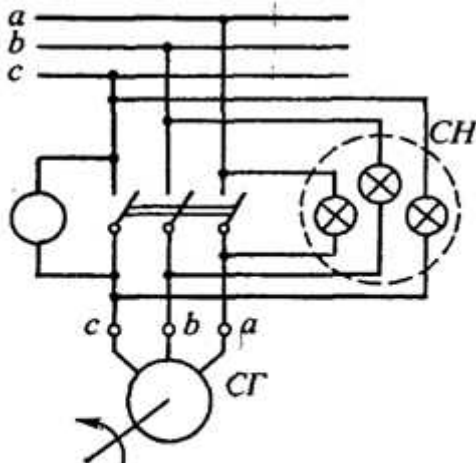


Рис. 2. Схема включения синхронной машины на параллельную работу с сетью

Расхождение частот сети и генератора можно определить по частоте мигания ламп. Схема с лампами используется при включении на параллельную работу синхронных генераторов в лабораториях учебных заведений, на станциях используются специальные приборы.

На электростанциях широко применяется способ грубой синхронизации или самосинхронизации синхронных генераторов СГ.

При этом способе включения генераторов на параллельную работу частота вращения невозбужденного генератора доводится до примерно синхронной, а затем генератор подключается к сети при быстром вслед за этим включении возбуждения.

После этого синхронный генератор сам втягивается в синхронизм под действием синхронизирующего момента.

При самосинхронизации имеют место сложные электромеханические переходные процессы.

Кратковременно в обмотках машины протекают переходные токи, превышающие номинальные значения, что сопровождается механическими воздействиями на обмотки и муфту, соединяющую генератор с турбиной.

Способом самосинхронизации включаются на параллельную работу генераторы мощностью до 500 МВт.

Влияние переходных процессов на надежность машин учитывается при проектировании синхронных генераторов.

При самосинхронизации сокращается время, необходимое для подключения генератора к сети, а это важно для обеспечения надежной и экономичной работы энергосистемы.

Для мощных генераторов пользуются электромагнитным синхроскопом, к которому подаются напряжения генератора и сети.

Этот прибор работает на принципе вращающегося магнитного поля, и при $f_1 \neq f_c$ его стрелка вращается с частотой $f_1 - f_c$ в ту или иную сторону в зависимости от того, какая частота больше.

При правильном моменте включения стрелка синхроскопа обращена вертикально вверх.

При высоком напряжении приборы синхронизации включаются через трансформаторы напряжения. При этом необходимо позаботиться о том, чтобы фазировка (чередование фаз) этих трансформаторов была правильной.

Синхронизация генераторов является весьма ответственной операцией и требует от эксплуатационного персонала большого внимания.

В особенности это важно в случае различных аварий, когда персонал работает в напряженной обстановке. В то же время именно при авариях необходима максимальная оперативность в производстве различных переключений и в синхронизации резервных или отключившихся во время аварий генераторов.

Опыт показывает, что наибольшее количество ошибочных действий персонала падает как раз на период аварий.

Для исключения ошибок персонала и облегчения его работы пользуются автоматическими синхронизаторами, которые осуществляют автоматическое регулирование U_1 и f_1 синхронизируемых генераторов в нужных направлениях и при достижении необходимых условий автоматически включают генераторы на параллельную работу.

Однако подобные автоматические синхронизаторы также обладают недостатками (сложность, необходимость непрерывного и квалифицированного обслуживания и т. д.).

К тому же во время аварии напряжение и частота в системе нередко беспрерывно и быстро меняются и поэтому процесс синхронизации с помощью автоматических синхронизаторов сильно затягивается (до 5 - 10 мин и даже более), что с точки зрения ликвидации аварии крайне нежелательно.

2. Синхронные режимы параллельной работы синхронных машин

Режим работы синхронной машины параллельно с сетью при синхронной скорости вращения называется синхронным.

Рассмотрим особенности этого режима подробнее, причем предположим для простоты, что сеть, к которой приключена рассматриваемая машина, является бесконечно мощной, т. е. в ней $U = \text{const}$ и $f = \text{const}$.

Практически это означает, что суммарная мощность всех приключенных к этой сети синхронных генераторов настолько велика по сравнению с мощностью приключаемой машины, что изменение режима работы машины не влияет на напряжение и частоту сети.

Напряжение параллельно работающего генератора равно напряжению сети на зажимах генератора.

Для простоты предположим также, что включаемая на параллельную работу машина является неявнополюсной и сопротивление якоря $r_a = 0$.

Тогда ток якоря машины определяется простой зависимостью

$$\dot{I} = \frac{\dot{E} - \dot{U}}{jx_d} = \frac{\Delta \dot{U}}{jx_d}. \quad (1)$$

Предположим, что при включении на параллельную работу условия синхронизации возбужденного генератора были соблюдены в точности, т. е. $\dot{U}_r = \dot{U}_c$ или $\dot{E}_r = \dot{U}_c = \dot{U}$.

Тогда $I = 0$, т. е. машина не примет на себя никакой нагрузки.

Предположим теперь, что ток возбуждения после синхронизации был увеличен и поэтому $\dot{E}_r > \dot{U}$.

Тогда (рис. 3, а) возникает ток I , отстающий от $\Delta \dot{U}$, а также от $\dot{E}_r$ и $\dot{U}$ на 90° .

Машина, таким образом, будет отдавать в сеть чисто индуктивный ток и реактивную мощность.

Если ток возбуждения уменьшить, так что $\dot{E}_r < \dot{U}$ (рис. 3, б), то ток I также будет отставать от $\Delta \dot{U}$ на 90° , но будет опережать $\dot{E}_r$ и $\dot{U}$ на 90° , т. е. машина будет отдавать в сеть емкостный ток и потреблять из сети реактивную мощность.

Таким образом, изменение тока возбуждения синхронной машины вызовет в ней только реактивные токи или изменение реактивного тока и реактивной мощности.

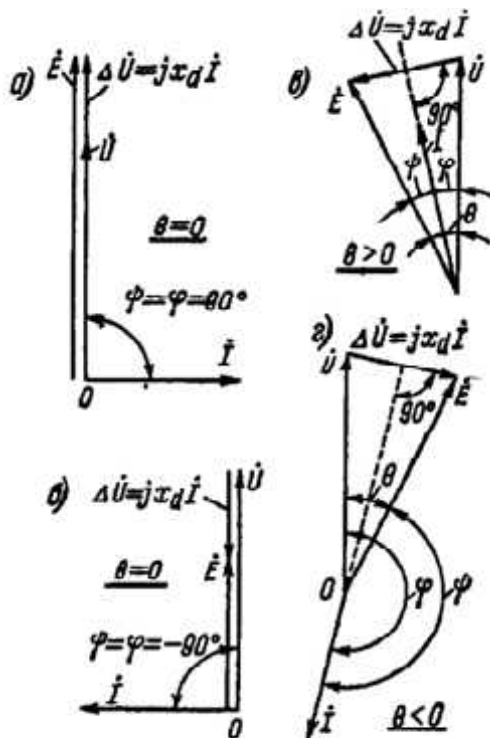


Рис. 3. Векторные диаграммы СМ при работе в режиме компенсатора (а, б), генератора (в) и двигателя (г)

При $\dot{E}_r > \dot{U}$ синхронная машина называется перевозбужденной, а при $\dot{E}_r < \dot{U}$ — недовозбужденной.

При равенстве активной мощности нулю перевозбужденная синхронная машина по отношению к сети эквивалентна емкости, а недовозбужденная — индуктивности.

Синхронная машина, не несущая активной нагрузки и загруженная реактивным током, называется синхронным компенсатором.

Такие компенсаторы применяются для повышения коэффициента мощности и поддержания нормального уровня напряжения в сетях.

Если, например, такой компенсатор установить в районе большой промышленной нагрузки и перевозбудить его, то он будет снабжать асинхронные двигатели промышленных предприятий реактивной мощностью, питающая сеть и генераторы электрических станций будут полностью или частично разгружены от этой мощности, коэффициент мощности генераторов и сети повысится, потери мощности и падения напряжения в них уменьшатся и напряжение сети у потребителей сохранится на нормальном уровне.

Из сказанного выше следует, что изменение тока возбуждения не вызывает появления активной нагрузки или ее изменения.

Чтобы включенная на параллельную работу машина приняла на себя активную нагрузку и работала в режиме генератора, необходимо увеличить движущий механический вращающий момент на ее валу, увеличив, например, поступление воды или пара в турбину.

Тогда равенство моментов на валу нарушится, ротор генератора, а следовательно, и вектор ЭДС генератора E забегают вперед на некоторый угол θ (рис. 3, в).

При этом возникнет ток I , отстающий, как и ранее, от $\Delta U = \dot{E}_r - \dot{U}$ на 90° . Но, как следует из рис. 3, в, в данном случае — $90^\circ < \varphi < 90^\circ$ и

$$P = m\dot{U}I \cos'' > 0$$

т. е. машина отдает в сеть активную мощность.

Если, наоборот, притормозить ротор машины, создав на его валу механическую нагрузку, то ЭДС $\dot{E}_r$ отстанет от $\dot{U}$ на некоторый угол θ , ток I будет отставать от $\dot{U}$ на угол $90^\circ < \varphi < 270^\circ$.

При этом мощность машины $P = m\dot{U}I \cos'' < 0$ и машина будет работать в режиме двигателя, потребляя активную мощность из сети (рис. 3, г).

Как следует из рис. 3, в и г, у генератора вектор $\dot{U}$ отстает от вектора $\dot{E}_r$, а у двигателя — наоборот. Угол нагрузки θ в первом случае будем считать положительным, а во втором — отрицательным.

Характер магнитного поля в зазоре между статором и ротором в режимах генератора и двигателя изображен на рис. 4.

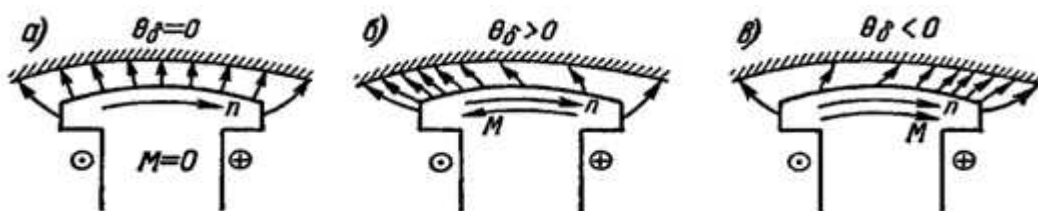


Рис. 4. Характер магнитного поля в воздушном зазоре при работе СМ на холостом ходу (а), в режиме генератора (б) и двигателя (в)

У генератора ось полюсов сдвинута относительно оси потока на поверхности статора на угол θ_δ вперед, по направлению вращения ($\theta_\delta > 0$), а у двигателя — против направления вращения ($\theta_\delta < 0$).

Угол θ_δ можно назвать внутренним углом нагрузки. Образование электромагнитного вращающего момента M и направление его действия согласно рис. 4 можно объяснить также тяжением магнитных линий.

ЛЕКЦИЯ 14

Тема: Устойчивость генератора при работе с сетью

Учебные вопросы:

1. Общие положения.
2. Статическая устойчивость работы генератора с сетью.
3. Динамическая устойчивость.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь, 1983.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1987. - 832 с.

1. Общие положения

Под устойчивостью электрической системы следует понимать её способность сохранять нормальное функционирование при воздействии различных возмущений.

Основным определяющим условием устойчивости энергосистемы является устойчивость параллельной работы генераторов.

Наглядное представление об устойчивости можно получить из механических аналогий. На рис. 1 показаны два равновесных положения шара на поверхности.

В случае (а) точка (О) для шара является точкой устойчивости равновесия, а (О) в случае (б) – точкой неустойчивого равновесия.

Во втором случае достаточно малейшего возмущения в виде отклонения положения шара от точки равновесия (О), как появляются силы, стремящиеся увеличить это отклонение.

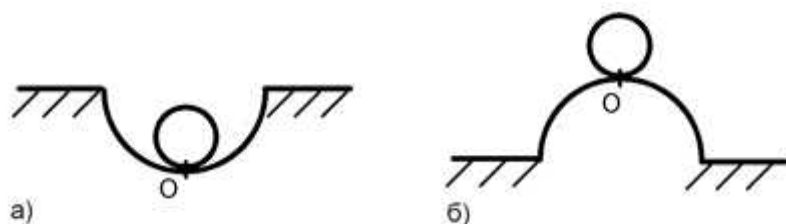


Рис. 1

В первом случае от точки равновесия (О) для шара приводит к возникновению сил, стремящихся возвратить его в первоначальное положение.

Здесь имеем случай статической устойчивости (рис. 1, а) и статической неустойчивости (рис. 1, б).

Рассмотрим случай динамической устойчивости на примере подобных аналогий (рис. 2).

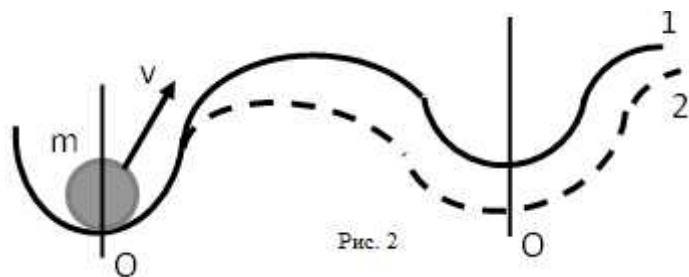


Рис. 2

Положение «О» статически устойчивое, если поместить шар в точку О, то в равном положении статическая устойчивость будет иметь место.

Если даже дать шару начальную скорость V , то он может сказаться в точке O' или же проскочить эту точку, но поколебавшись около её, как около нового положения равновесия, остановиться в точке O' .

Таким образом, система шар-поверхность испытыв сильное возмущающее воздействие, перешла к новому равновесному положению.

Данная система сохранила динамическую устойчивость. Но это утверждение относительное, условное.

Действительно, если увеличить скорость (V) или при прежней скорости сделать поверхность справа от точки (О) более полой (2), то вероятен и другой исход, а именно, шар пройдет точку (O') и, перевалив через второй горб не возвратится в нее.

Получается что хотя он и пройдет точку статического равновесия, в этом статическом положении он не остается.

Об устойчивости работы генератора судят по характеру изменения параметров режима при конечных возмущениях, которые могут быть вызваны определенными факторами: КЗ в той или иной точке системы, отклю-

чением или подключением линий и т.д. При этом существенное значение приобретают характер и размеры возмущений.

Динамическая устойчивость – это способность энергосистемы вернуться к установившемуся режиму, близкому к исходному, после больших возмущений.

Этот вид устойчивости получил также более точное название – **синхронная динамическая устойчивость**.

Как было отмечено, динамическая устойчивость ЭС рассматривается при **больших возмущениях**. Большим возмущением в ЭС является всякое изменение схемы системы.

Изменение в системе генерации или потребления приводит к новому состоянию системы, при котором возникает существенный небаланс мощности $P_0 \neq P$.

Если при возникновении небаланса ЭС приходит к новому устойчивому режиму при завершении некоторых качаний, то **ЭС считается динамически устойчивой**.

Если возмущение в ЭС приводит к такому изменению скорости (возмущения) вращения ротора генератора, при котором небаланс мощности увеличивается и колебания мощности не прекращаются, то произошло **нарушение динамической устойчивости параллельной работы генератора**.

Колебания, возникшие в цепи генератора, потерявшего устойчивость, распределяются на всю систему и могут привести к потере устойчивости других генераторов. Развивается тяжелая авария системы. Поэтому генератор, потерявший устойчивость, должен быть отключен.

2. Статическая устойчивость работы генератора с сетью

Рассмотрим нормальный режим работы СГ на шины ЭЭС бесконечной мощности (рис. 3).

Под системой бесконечной мощности понимают систему достаточно большой мощности, режим работы которой практически не зависит от поведения рассматриваемого генератора.

В схемах замещения сопротивление такой системы приравнивается к нулю, а синусоидальное напряжение узла системы, куда присоединяется генератор, считается неизменным по амплитуде и фазе при любых изменениях, происходящих в ветви с исследуемым генератором.

Последнее записывается в виде $U = const$.

В схеме замещения генератор представляется в виде ЭДС и реактивного сопротивления.

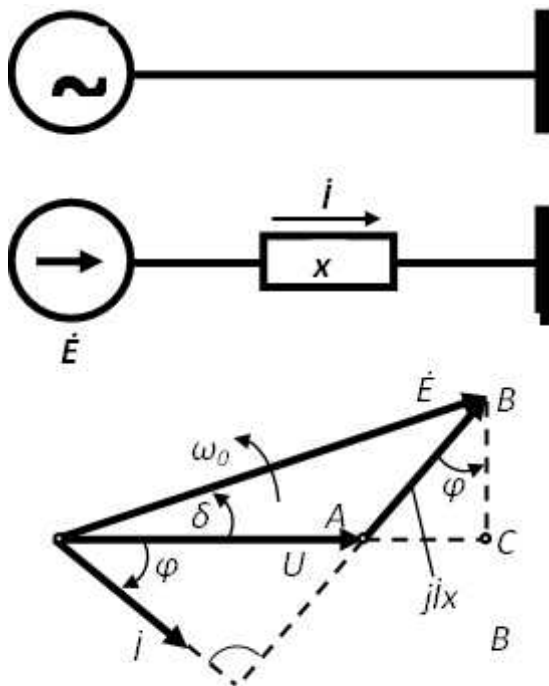


Рис. 3. Векторная диаграмма работы ТГ на шины бесконечной мощности

Для ненасыщенной машины в о.е. ЭДС генератора пропорциональна току возбуждения:

$$E_* = I_{f*}$$

Векторная диаграмма параллельной работы генератора с системой бесконечной мощности показана на рис. 3, где угол δ является углом сдвига между ЭДС генератора и напряжением системы.

Сопротивление между шинами системы и генератором в общем случае равно:

$$x = x_d + x_{вш},$$

где x_d - синхронное индуктивное сопротивление генератора; $x_{вш}$ - сопротивление линии электропередачи (внешнее).

Из векторной диаграммы видно,

что $BC = Ix \cos \varphi = E \sin \delta$.

Умножив обе части равенства на U , получим $xUI \cos \varphi = EU \sin \delta$, т.е.

$$P = \frac{EU}{x} \sin \varphi. \quad (1)$$

Это соотношение называют угловой характеристикой мощности генератора (рис. 4).

Угловая характеристика показывает, какая мощность может быть передана в зависимости от угла между ЭДС генератора и напряжением системы.

Так как угол δ жестко связан с геометрическим положением ротора генератора в пространстве, то соотношение (1) связывает электрические характеристики генератора с его механическим движением.

Если мощность генератора и электромагнитный момент на его валу выразить в о.е.,

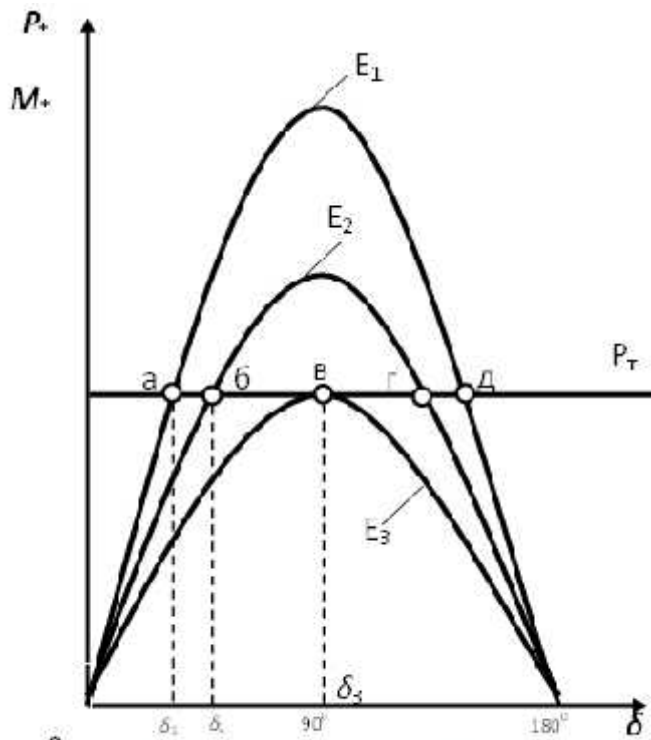


Рис. 4. Угловая характеристика мощности ТГ при разных ЭДС

приняв за базовые величины их собственные номинальные значения, то при синхронной частоте вращения, очевидно,

$$\frac{P}{P_{ном}} = \frac{\mu_c M}{\mu_c M_{ном}} = P_* = M_*, \quad (2)$$

т.е. относительные значения активной мощности и электромагнитного момента на валу генератора (рис. 4) равны друг другу.

При изменении угла положения ротора значение момента изменяется также в соответствии с (1) по синусоиде, если ЭДС остается постоянной.

Устойчивый режим работы турбогенератора устанавливается при равенстве вращающего момента турбины и тормозящего электромагнитного момента генератора.

Равенство названных моментов имеет место как в точках *a* и *д* (при ЭДС генератора E_1), так и в точках *б* и *г* (при ЭДС генератора E_2). Однако устойчивое равновесие моментов создаётся только в точках *a* и *б*.

Случайные малые увеличения угла δ в этом случае вызывают в соответствии с угловой характеристикой увеличение тормозящего момента генератора, что приводит к уменьшению угла δ .

Случайное малое уменьшения угла δ приводит к тому, что момент турбины оказывается больше момента генератора, что приводит к увеличению угла и сохранению прежнего устойчивого равновесия моментов.

*Способность электроэнергетической системы восстанавливать исходный режим после малого его возмущения или режим близкий к исходному, называют **статической устойчивостью системы**.*

Режимы, соответствующие точкам *a* и *б*, устойчивы.

В точках *г* и *д* случайные малые увеличения угла δ приводят к тому, что момент генератора становится меньше момента турбины, и это способствует дальнейшему увеличению угла δ .

Случайное уменьшение угла вызовет увеличение момента генератора, которое будет способствовать дальнейшему уменьшению угла δ . В этих точках режимы неустойчивые.

Режим в точке **в** на рис. 4 при ЭДС генератора, равной E_3 , отвечает пределу статической устойчивости.

Для рассмотренного примера работы генератора на шины мощной системы (см. рис. 3, 4) при условии $P_T = P_G = const$ **критерий статической устойчивости** выражается в форме

$$\frac{dP}{d\phi} > 0,$$

что характерно для области $\delta = 0 \div 90^\circ$.

Предельное значение угла между напряжением шин системы и ЭДС генератора по условию статической устойчивости составляет 90° .

Для надёжного обеспечения устойчивости параллельной работы генератора и системы максимум характеристики мощности должен быть больше номинальной активной мощности генератора.

Это достигается уменьшением результирующего значения x и увеличения ЭДС генератора действием регуляторов возбуждения.

3. Динамическая устойчивость параллельной работы синхронных генераторов

В отличие от статической устойчивости **динамическая устойчивость** представляет собой способность системы восстанавливать исходное состояние после значительного нарушения режима.

Под значительными нарушениями режима ЭЭС понимается явление КЗ, отключение мощных генераторов, отключение линий и т.п.

Для анализа динамической устойчивости угловая характеристика генератора должна строиться по параметрам, свойственным переходному процессу.

В качестве таких параметров принимаются переходная ЭДС E' и переходное сопротивление x'_d , которые можно считать неизменными в течение переходного процесса, вызванного большими возмущениями в системе.

При этом угловая характеристика генератора с учетом внешнего сопротивления связи с системой может быть выражена в виде

$$M_* = P_* = \frac{E'U}{x'_d + x_{\text{вн}}} \sin \phi, \quad (3)$$

Рассмотрим влияние больших возмущений (КЗ в точке $K1$, расположенной вблизи шин высокого напряжения и последующее отключение поврежденной линии) на поведение генератора и пути обеспечения его динамической устойчивости.

Для наглядности на угловых характеристиках (рис. 5) указано, при какой ЭДС (переходная E' или предельная $E_{\text{пр}}$, полученная в результате форсировки возбуждения) и при каком внешнем сопротивлении они построены.

При трёхфазном КЗ в точке $K1$ напряжение на шинах снизится до нуля. В соответствии с этим снизится до нуля и синхронный электромагнитный момент генератора.

Равновесие моментов нарушится, угол δ будет увеличиваться. Ускорение ротора генератора при этом определяется моментом турбины и механической постоянной агрегата T_a :

$$M_T = T_a \frac{d^2 \phi}{dt^2}. \quad (4)$$

Через промежуток времени t_1 , когда угол станет $\delta_{откл}$, действием защиты поврежденный участок К1 отключается, восстановятся напряжение на шинах подстанции и электромагнитный синхронный момент генератора.

Но так как ротор приобрёл запас кинетической энергии, угол δ будет продолжать увеличиваться. Избыточная кинетическая энергия, приобретенная ротором за время КЗ, равна площадке $AA'B'B$ (рис. 5):

$$\int_{\phi_0}^{\phi_{откл}} M_T d\phi. \quad (5)$$

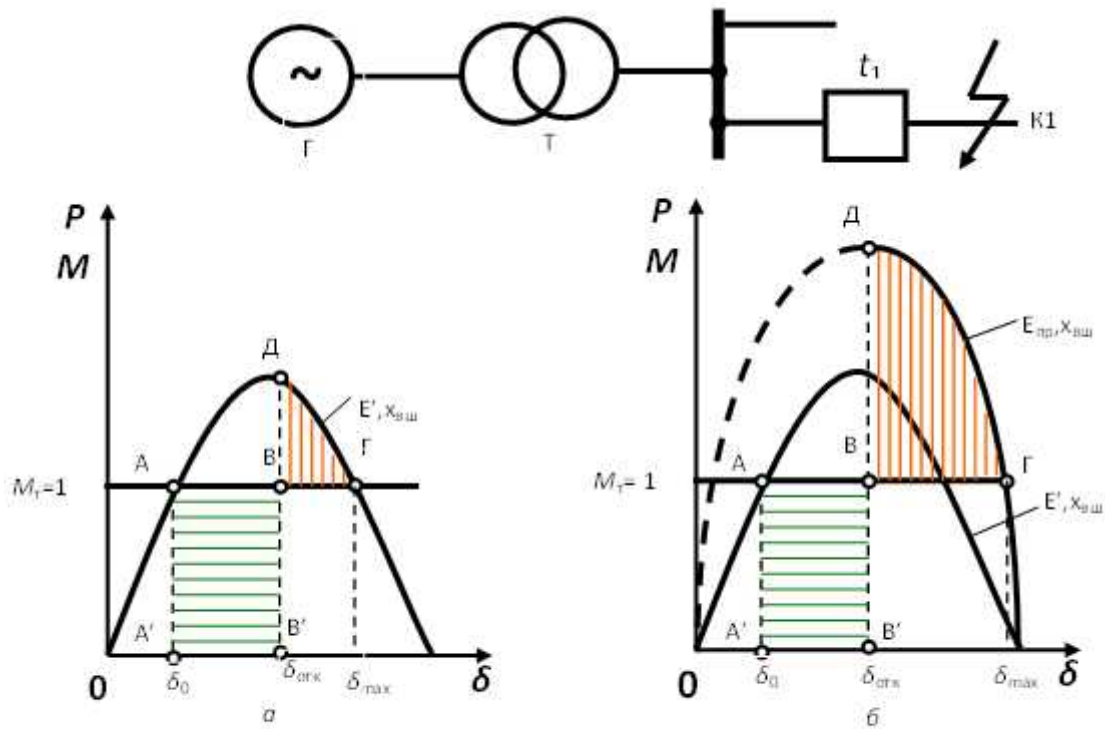


Рис. 5. Схема передачи активной мощности от станции в систему и угловые характеристики:
а - КЗ в точке К1, форсировка генератора не работает, генератор выходит из синхронизма;
б - КЗ в точке К1, форсировка генератора работает, генератор сохраняет устойчивость работы

После отключения КЗ момент генератора (ордината $B'D$ на рис. 5, а) уже больше момента турбины, и ротор генератора будет затормаживаться с ускорением:

$$M_T - M_C = T_a \frac{d^2\phi}{dt^2}. \quad (6)$$

Энергия торможения при этом будет равна площадке $B'D\Gamma$:

$$\int_{\phi_{откл}}^{\phi_{max}} (M_C - M_T) d\phi. \quad (7)$$

Если в некоторый момент времени площадка торможения станет равной площадке ускорения, то избыточная кинетическая энергия ротора станет равной нулю, угол перестанет увеличиваться.

После этого ротор генератора, совершив ряд качаний, снова займет положение устойчивого равновесия при угле δ_0 .

В рассмотренном случае (рис. 5, а) однако, площадка ускорения больше площадки торможения, поэтому угол будет продолжать возрастать по инерции, генератор выйдет из синхронизма.

Для того чтобы площадка торможения стала больше площадки ускорения, надо сократить время t_1 (применить быстродействующую релейную защиту) или увеличить ЭДС генератора (применить форсировку возбуждения генератора).

На рис. 5. б показано, что форсировка возбуждения (увеличение ЭДС) приводит к увеличению площадки торможения и обеспечивает динамическую устойчивость параллельной работы генератора.

Из изложенного следует, что для обеспечения динамической устойчивости параллельной работы генераторов необходимо предъявлять определенные требования к быстродействию релейных защит, к системам возбуждения СГ и устройствам их автоматического регулирования, исходя из возможных аварийных ситуаций в проектируемой схеме системы.

ЛЕКЦИЯ 15

Тема: Переходные процессы в синхронных машинах

Учебные вопросы:

Введение.

1. Трехфазное короткое замыкание на выводах машины.
2. Нахождение параметров синхронной машины в ПП.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь, 1983.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1987. - 832 с.

Введение.

Переходные процессы в синхронных машинах возникают при изменении нагрузки, синхронизации машины и различных аварийных режимах.

Изучение переходных процессов необходимо для проектирования и эксплуатации синхронных машин.

Процессы, возникающие в синхронных машинах при переходных режимах, например при внезапном коротком замыкании или резком изменении нагрузки, весьма сложны, что вызывает значительные трудности при их точном количественном расчете.

Однако поведение синхронной машины при указанных режимах имеет очень большое практическое значение, так как переходные процессы могут вызвать повреждение машины, а следовательно, и значительные убытки, связанные с перерывом энергоснабжения объектов, получающих питание от генератора, или прекращением работы электроприводов с синхронными двигателями.

Поэтому необходимо иметь общее представление о физических процессах, возникающих при переходных режимах, и установить хотя бы приближенно значение аварийных токов, возникающих при коротком замыкании.

1. Трехфазное короткое замыкание на выводах машины.

Рассмотрим явления при трехфазном коротком замыкании на выводах машины.

Симметричное трехфазное короткое замыкание обмотки якоря происходит при работе машины на холостом ходу, а частота вращения, насыщение и напряжение, приложенное к обмотке возбуждения, не изменяются.

При внезапном коротком замыкании можно считать, что потокосцепление обмотки якоря остается неизменным.

Активное сопротивление обмотки якоря значительно меньше индуктивного, поэтому в уравнении

$$- \frac{d\alpha}{dt} = ri, \quad (1)$$

при $r = 0$ $\frac{d\alpha}{dt} = 0$ и $\alpha = const$.

В первый момент короткого замыкания ток якоря создает магнитный поток, который начинает проникать в ротор.

Исходя из постоянства потокосцепления при изменении тока в статоре, можно сделать вывод, что в обмотках ротора возникает дополнительный ток, препятствующий проникновению потока статора в ротор.

На рис. 1 показано два состояния, качественно характеризующих процессы в синхронной машине по оси d при переходном процессе.

При изменении тока в якоре в первый момент демпферная обмотка препятствует проникновению потока в обмотку возбуждения.

Это положение определяется сверхпереходным сопротивлением x_d'' (рис. 1, а). После того, как поток проник в демпферную обмотку, изменению его препятствует обмотка возбуждения. Это состояние машины характеризуется переходным сопротивлением x_d' (рис. 1, б).

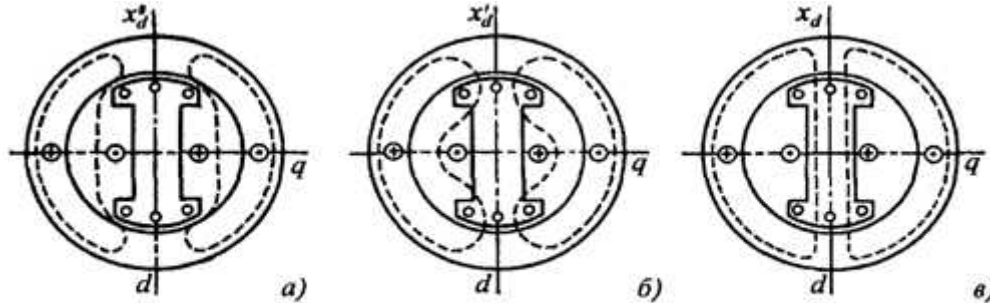


Рис. 1. Состояния синхронной машины в оси d при переходном процессе

В установившемся режиме машина имеет по продольной оси сопротивление x_d (рис. 1, в).

Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси x_d'' и переходное сопротивление x_d' характеризуется соответствующими схемами замещения, показанными на рис. 2.

Во всех схемах замещения сопротивления приведены к обмотке якоря. Сверхпереходное сопротивление x_d'' определяется параллельным соединением индуктивного сопротивления $x_{2\pm d}$, учитывающего влияние демп-

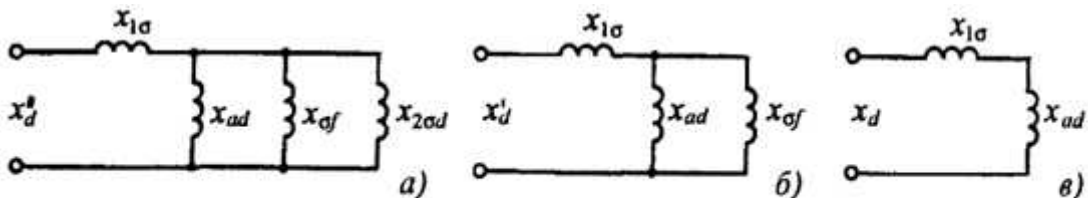


Рис. 2. Схемы замещения, характеризующие состояния машины в переходном процессе по оси d

ферной обмотки, и сопротивления $x_{\pm f}$, учитывающего влияние обмотки возбуждения на переходный процесс.

При отсутствии демпферной обмотки переходное сопротивление x_d' определяется установившимся сопротивлением реакции якоря x_{ad} и сопротивлением $x_{\pm f}$, учитывающим демпфирующие свойства обмотки возбуждения.

Сопротивления $x_{\pm f}$ и $x_{2\pm d}$ значительно меньше x_{ad} , поэтому $x_d'' < x_d' < x_d$.

В относительных единицах $x_d'' = 0,1 \div 0,3$, $x_d' = 0,25 \div 0,4$.

По поперечной оси машины при активном токе в обмотке якоря в процессе изменения тока в обмотках при постоянстве потокосцепления процессы протекают подобно тому, как они протекают по продольной оси.

В начальный момент машина с демпферной обмоткой характеризуется сверхпереходным индуктивным сопротивлением x_q'' (рис. 1, а).

Переходное индуктивное сопротивление по поперечной оси машины x_q' характеризует машину в переходном процессе без демпферной обмотки (рис. 3, б).

Сопротивление $x_{2\pm q}$ характеризует демпфирующее влияние демпферной обмотки по оси q .

Для сверхпереходного и переходного сопротивлений по поперечной оси, так же, как и для соответствующих сопротивлений по продольной оси, могут быть предложены эквивалентные схемы замещения (рис. 3, а, б).

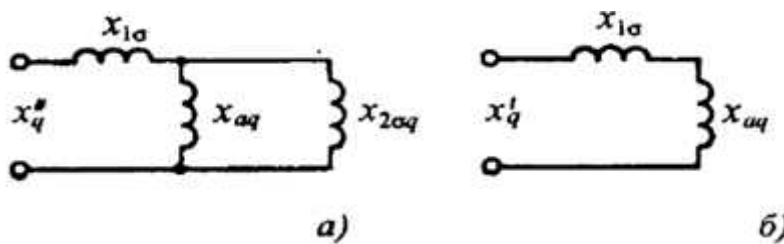


Рис. 3. Схемы замещения, характеризующие состояния машины по оси q

Хотя $x_d > x_q$, обычно $x_d'' \leq x_q''$. Это объясняется тем, что по поперечной оси меньше демпфирующих контуров.

Для турбогенераторов $x_q'' = 0,12 \div 0,25$, а

для гидрогенераторов $x_q'' = 0,15 \div 0,35$.

2. Нахождение параметров синхронной машины в ПП.

Опытным путем параметры x_d'' и x_q'' могут быть найдены по данным следующих опытов:

- 1) внезапного трехфазного короткого замыкания;
- 2) опыта восстановления напряжения;
- 3) при пульсирующем поле обмотки статора и произвольном положении ротора;
- 4) при пульсирующем поле обмотки статора и установке ротора в продольном и поперечном направлениях.

В последнем опыте осуществляют медленное вращение ротора в пульсирующем поле статора при замкнутой амперметром обмотке возбуждения (рис. 4).

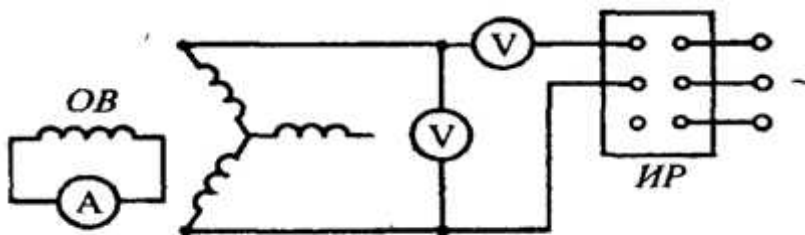


Рис. 4. Схема опытного определения x_d'' и x_q''

При проведении опыта на машину подают пониженное напряжение и по максимальному и минимальному значениям токов находят сверхпереходные сопротивления:

$$x_d'' = \frac{U}{2I_{\max}}, \quad (2)$$

$$x_q'' = \frac{U}{2I_{\min}}. \quad (3)$$

При повороте ротора ось поля попеременно совпадает с продольной и поперечной осями машины и ток определяется сопротивлениями по продольной и поперечной осям машины.

Ближкие процессы имеют место и при коротком замыкании.

В машине без демпферной обмотки таким образом определяются x_d' и x_q' .

Определение опытным путем индуктивного сопротивления обратной последовательности и сверхпереходных параметров отличается лишь тем, что при определении x_2 частота вращения номинальная, а при определении x_d'' и x_q'' — близка к нулю.

Значения x_2 и x_d'' обычно близки друг другу.

При коротком замыкании в токах обмотки якоря есть периодические и аperiodические составляющие (рис. 5).

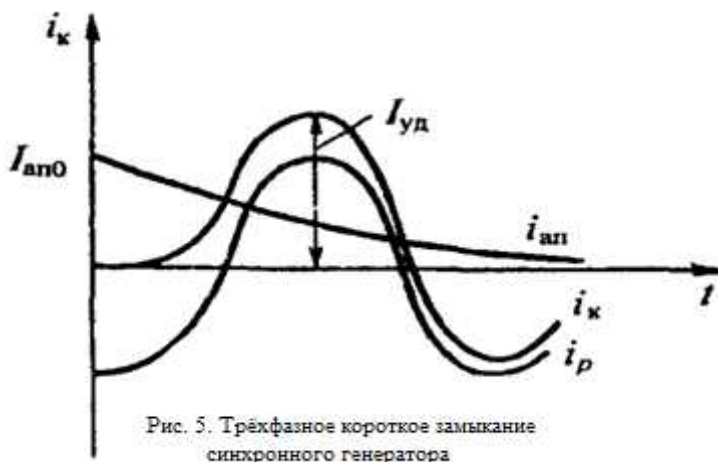


Рис. 5. Трёхфазное короткое замыкание синхронного генератора

Периодические составляющие i_n создают вращающееся поле, неподвижное относительно ротора.

Аперидические составляющие i_{an} создают неподвижное относительно обмоток статора магнитное поле, которое в обмотках ротора наводит переменные токи частоты сети.

Начальное значение аперидических токов в фазах обмотки статора зависит от момента, когда произошло короткое замыкание. На рис. 5 показан момент короткого замыкания, когда аперидический ток максимален.

Наиболее опасно для синхронной машины ударное значение тока короткого замыкания, которое для машины с демпферной обмоткой может быть принято равным:

$$I_{уд} = 1,8 \frac{\sqrt{2} \cdot 1,05 U_{ном}}{x_d''} \quad (4)$$

а для машин без демпферной обмотки

$$I_{y\partial} = 1,8 \frac{\sqrt{2} \cdot 1,05 U_{\text{ном}}}{x'_d}. \quad (5)$$

Иногда вводят понятие кратности ударного тока

$$k_{y\partial} = \frac{I_{y\partial}}{\sqrt{2} I_{\text{ном}}}. \quad (6)$$

В (4) - (5) коэффициент 1,8 учитывает затухание апериодической составляющей и принимается на 5% завышенное значение номинального напряжения.

Наибольшему воздействию токов короткого замыкания подвергаются лобовые части обмоток статора, которые в турбогенераторах имеют большую длину.

Для уменьшения деформаций лобовые части обмоток крупных синхронных машин имеют усиленное крепление.

Электродинамические усилия в обмотках пропорциональны квадрату токов. Эти усилия стремятся отогнуть лобовые части обмотки к торцевым частям магнитопровода.

ГОСТ ограничивает амплитуду токов короткого замыкания $I_{y\partial}$. Для машин мощностью больше 2 МВт $I_{y\partial}$ не должно быть больше 15.

На рис. 6, а — в представлено изменение токов в обмотках синхронной машины при коротком замыкании.

Токи в фазах якоря имеют периодическую и апериодическую со-

ставляющие, затухающие каждая со своей постоянной времени.

На рис. 6, а показано изменение тока фазы i_a , когда апериодическая составляющая отсутствует.

Переходные токи в обмотке возбуждения и демпферной обмотке изменяются по разным законам, зависящим от постоянных времени обмоток (рис. 6, б и в).

При анализе переходных процессов в синхронных машинах можно говорить о достаточно большом числе постоянных времени.

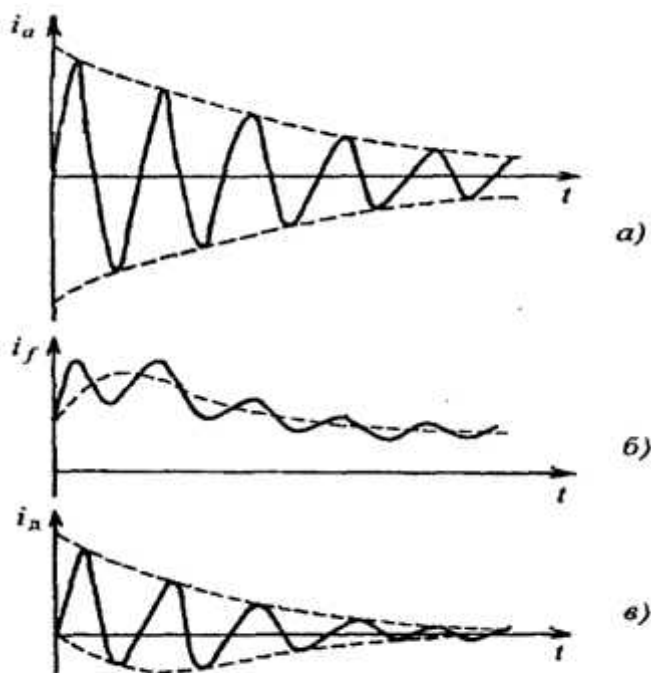


Рис. 6. Токи синхронного генератора при трёхфазном коротком замыкании

Так, для обмотки якоря постоянная времени для среднего значения x_d'' и x_q'' :

$$T_a = \frac{x_d'' + x_q''}{2\omega r_a} \quad (7)$$

при отсутствии демпферной обмотки

$$T_a = \frac{x_d' + x_q'}{2\omega r_a} \quad (8)$$

Вычисляют также постоянные времени обмоток якоря при разомкнутых и замкнутых поочередно обмотках ротора.

Обмотки ротора имеют свои постоянные времени, а в явнополусной машине рассматриваются еще и постоянные времени по продольной и поперечной осям машины. Наиболее важные постоянные времени машины указываются в каталогах.

Апериодические токи обмотки якоря наводят в обмотках ротора переменные токи, затухающие в обмотке возбуждения (рис. 6, б) и в демпферной обмотке (рис. 6, в), с разными постоянными времени.

Демпферная обмотка сглаживает колебания токов в обмотке возбуждения, предохраняя возбудитель от перегрузок по току и перенапряжений.

Затухание апериодических токов зависит, в основном, от активных сопротивлений контуров.

При коротком замыкании токи, протекающие в обмотках статора и ротора, создают ударные моменты, действующие на вал машины.

Знакопеременные моменты ускоряют и замедляют ротор (рис. 7).

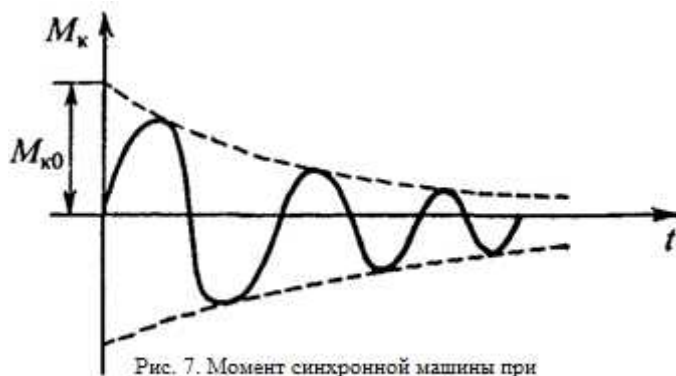


Рис. 7. Момент синхронной машины при коротком замыкании

При этом

$$M_k = M_{k0} e^{-\frac{t}{T_M}} \sin \omega t, \quad (9)$$

где T_M — постоянная времени, определяющая затухание ударного момента, зависящая от постоянной времени обмотки возбуждения и обмотки якоря.

Так как момент пропорционален токам в статоре и роторе, то

$$\frac{M_{k0}}{M_{ном}} \approx 5 \div 15. \quad (10)$$

Такое увеличение момента в переходных процессах необходимо учитывать при расчете на прочность валов и муфт, соединяющих синхронные генераторы с турбинами.

Ударный момент, так же, как и электромагнитный момент в установившемся режиме, приложен и к ротору, и к статору, поэтому болты, крепящие машину к фундаменту, должны быть рассчитаны на эти усилия.

Механические воздействия при коротком замыкании более опасны для машины, чем тепловые, так как эти процессы кратковременные.

Переходные процессы в синхронной машине связаны не только с электромагнитными, но и электромеханическими процессами, сопровождающимися колебаниями частоты вращения.

Исследование переходных процессов в синхронных машинах с учетом изменения частоты вращения возможно только с применением ЭВМ и рассматривается в спецкурсах.

ЛЕКЦИЯ 16

Тема: Устройство и принцип действия асинхронных двигателей

Учебные вопросы:

Введение.

1. Назначение и области применения асинхронных машин.
2. Устройство трёхфазного АД.
3. Принцип действия АД.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь, 1983.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1987. - 832 с.

1. Назначение и области применения асинхронных машин.

На предыдущих лекциях мы рассматривали вопросы, касающиеся устройства и принципа действия синхронных машин.

Теперь рассмотрим другой тип электрических машин переменного тока - асинхронные машины.

Асинхронные машины используются в основном как двигатели; в качестве генераторов они применяются крайне редко.

Асинхронные двигатели являются наиболее распространенным типом двигателя переменного тока.

В промышленности на транспорте АД применяются главным образом в качестве электроприводов насосов, вентиляторов, шпилей, кранов, лебедок и других механизмов.

Причина столь широкого распространения – достоинства этих электрических двигателей, а именно:

- простота конструкции;
- малая стоимость и отлаженная технология их производства;
- большая надежность в работе.

Асинхронной машиной называется такая машина переменного тока, у которой частота вращения ротора отличается от частоты вращения невидимого кругового магнитного поля статора, созданного токами трёхфазной обмотки статора.

Т.е. ротор вращается по отношению к полю статора с другой скоростью – асинхронно. Отсюда и пошло название – асинхронные машины.

Асинхронная машина может работать, как генератором, так и двигателем.

Выпускаемые заводами асинхронные двигатели предназначаются для работы в определенных условиях с определенными техническими данными, называемыми номинальными.

К числу номинальных данных асинхронных двигателей, которые указываются в заводской табличке машины, укрепленной на ее корпусе, относятся:

- механическая мощность, развиваемая двигателем, $P_n = P_{2n}$;
- частота сети f_1 ;
- линейное напряжение статора $U_{1лн}$;
- линейный ток статора $I_{1ли}$;
- частота вращения ротора n_n ;
- коэффициент мощности $\cos \varphi_{1н}$;
- коэффициент полезного действия η_n .

Если у трехфазной обмотки статора выведены начала и концы фаз и она может быть включена в звезду или треугольник, то указываются линейные напряжения и токи для каждого из возможных соединений (Y/Δ) в виде дроби $U_{лY} / U_{лΔ}$ и $I_{лY} / I_{лΔ}$.

Номинальные данные асинхронных двигателей варьируются в очень широких пределах.

Номинальная мощность — от долей ватта до десятков тысяч киловатт.

Номинальная синхронная частота вращения $n_{1н} = 60 f_1 / p$ при частоте сети 50 Гц от 3000 до 500 об/мин и менее в особых случаях; при повышен-

ных частотах – до 100 000 об/мин и более (номинальная частота вращения ротора обычно на 2 - 5 % меньше синхронной).

Номинальное напряжение от 24 В до 10 кВ (большие значения при больших мощностях).

Номинальный КПД асинхронных двигателей возрастает с ростом их мощности и частоты вращения; при мощности более 0,5 кВт он составляет 0,65 - 0,95, в микродвигателях 0,2 - 0,65.

Номинальный коэффициент мощности асинхронных двигателей, равный отношению активной мощности к полной мощности, потребляемой из сети, также возрастает с ростом мощности и частоты вращения двигателей; при мощности более 1 кВт он составляет 0,7 - 0,9; в микродвигателях 0,3 - 0,7.

Принцип действия АД основан на явлении вращающегося магнитного поля.

К открытию явления вращающегося магнитного поля в современном его понимании пришли независимо друг от друга в 1888 г. итальянский ученый Г. Феррарис и югославский ученый и изобретатель Н. Тесла, работавший большую часть жизни в Америке.

Им удалось показать, что две катушки, расположенные под прямым углом друг к другу и питаемые двумя одинаковыми переменными синусоидальными токами, сдвинутыми по фазе на 90° , образуют вращающееся магнитное поле.

Вектор индукции этого магнитного поля в точке пересечения осей катушек будет равномерно вращаться, не изменяясь по амплитуде.

Изобретение трехфазных асинхронных двигателей с принципиальными конструктивными особенностями, сохранившимися без изменения до наших дней, связано с именем М. О. Доливо-Добровольского.

В необычайно короткий срок интенсивная деятельность в этом направлении завершилась изобретением наиболее важных узлов трехфазных асинхронных двигателей: ротора с обмоткой в виде беличьей клетки (1889 г.); статора с распределенной барабанной трехфазной обмоткой; ротора с распределенной трехфазной обмоткой, выведенной на контактные кольца; пускового реостата, вводимого в цепь обмотки ротора при пуске двигателя (1890 г.).

2. Устройство трёхфазного АД

Асинхронные двигатели по устройству подразделяются на два основных типа:

- двигатели с короткозамкнутым ротором.
- двигатели с фазным ротором.

Рассмотрим устройство АД с короткозамкнутым ротором.

Трёхфазные АД состоят из двух частей:

- неподвижной части - статора;
- вращающейся части - ротора;

Статор состоит:

- из корпуса;
- сердечника;
- трёхфазной обмотки;
- переднего и заднего подшипниковых щитов.

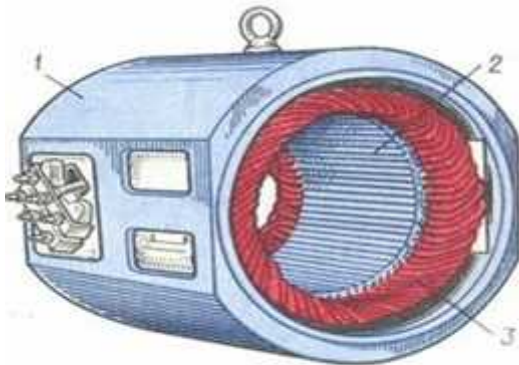


Рис. 1. Корпус асинхронного двигателя

Корпус служит для крепления всех частей двигателя. Он изготавливается из алюминиевого сплава (рис. 1).

Магнитопроводом является сердечник (рис. 2, б), который, с целью уменьшения потерь, набирается из листов электротехнической стали, покрытых с обеих сторон изоляционным лаком.

Сердечник имеет пазы, в которые укладывается обмотка статора. Начала и концы фазных обмоток выведены к клеммам коробки (рис. 3), где обмотки соединяются между собой и с внешней сетью.

К корпусу привариваются лапы, предназначенные для крепления двигателя к фундаменту.

Короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя состоит:

- из сердечника;
- обмотки;
- вала.

Сердечник ротора (см. рис. 2, а) набирается из отдельных листов электротехнической стали, изолированных друг от друга лаком.

В пазах сердечника размещается обмотка ротора (рис. 4)

Короткозамкнутая обмотка ротора выполняется из отдельных неизолированных стержней, замкнутых по торцам токопроводящими кольцами. Стержни и кольца изготавливаются из меди или алюминия.

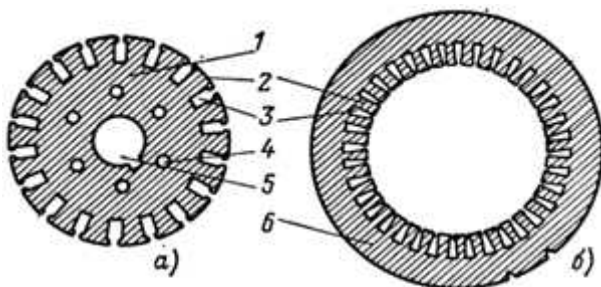


Рис. 2. Кольцевые пластины магнитопроводов ротора (а) и статора (б):

- 1 - ядро ротора; 2 - зубец; 3 - паз; 4 - аксиальный вентиляционный канал; 5 - отверстие для вала; 6 - ядро статора.

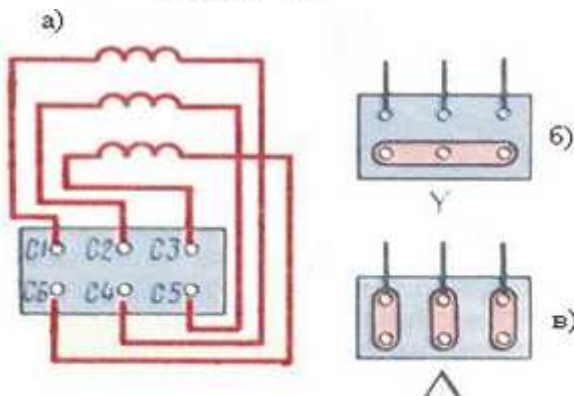


Рис. 3. Клеммная коробка асинхронного двигателя

- а - выведение фаз в клеммную коробку;
б - соединение фаз звездой;
в - соединение фаз треугольником.

Обмотка из алюминия выполняется путем заливки расплавленного металла в пазы сердечника ротора. Это дает возможность получить целиком стержни вместе с короткозамкнутыми кольцами и вентиляционными лопатками.

На валу ротора закрепляется вентилятор, прогоняющий охлаждаю-

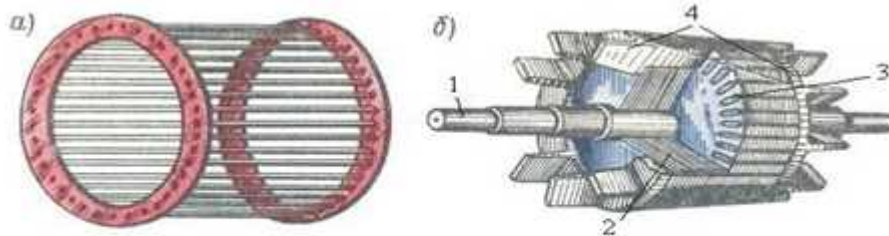


Рис. 4. Устройство короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя.
а - обмотка типа беличья клетка; б - разрез короткозамкнутого ротора

щий воздух вдоль внешней поверхности корпуса статора.

Корпус статора, в этом случае для увеличения охлаждающей поверхности, выполняется ребристым.

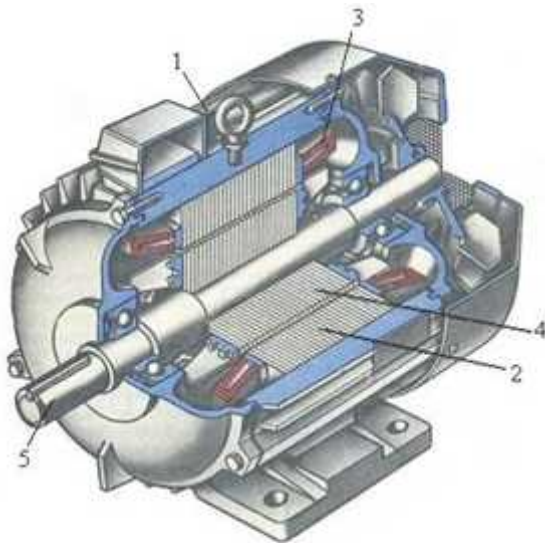


Рис. 5. Вид асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в разрезе:
1 - станина; 2 - сердечник ротора; 3 - обмотка статора; 4 - сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой; 5 - вал.

Вал ротора асинхронного двигателя устанавливается в подшипниках, которые располагаются в подшипниковых щитах машины. Подшипниковые щиты крепятся к корпусу статора (рис. 5).

3. Принцип действия АД.

Нарисуем принципиальную схему трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (рис. 6).

Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя основан на взаимодействии кругового вращающегося магнитного поля статора с токами, которые наводятся этим полем в обмотке ротора.

При прохождении по обмотке статора трехфазного переменного тока, создается вращающееся магнитное поле, частота которого n_1 - называется *синхронной* и определяется формулой

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p_1}, \quad (1)$$

где f_1 - частота тока в обмотке статора; p - число пар полюсов вращающегося магнитного поля статора.

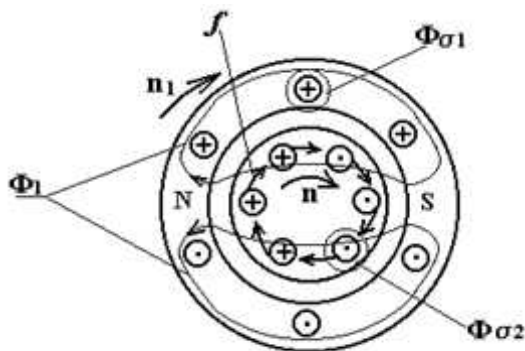


Рис. 6

Магнитный поток Φ_1 поля статора, при своем вращении, будет пересекать проводники обмотки ротора, индуцируя в них ЭДС.

Под действием этих ЭДС в замкнутой обмотке ротора пойдет ток.

В результате взаимодействия проводников с током ротора и магнитного потока Φ_1 , возникают электромагнитные силы f .

Силы f создают электромагнитный момент, под действием которого, ротор придет во вращение.

Установившейся режим, характеризуемый постоянной частотой вращения ротора n , наступит тогда, когда электромагнитный вращающий момент будет уравновешен моментом сопротивления, приложенным к валу двигателя и действующим в направлении, противоположном направлению электромагнитного момента.

Ротор, при этом, будет вращаться в ту же сторону, что и магнитное поле статора.

Очевидно, что ЭДС и ток в обмотке ротора и, следовательно, электромагнитный момент на валу двигателя имеют место лишь в том случае, когда частота ротора n не равна частоте вращения магнитного поля статора n_1 .

Если $n = n_1$, то не будет пересечения проводников обмотки ротора магнитными силовыми линиями поля статора.

ЭДС, ток и электромагнитный момент ротора окажется равным нулю и двигатель, под действием момента сопротивления на валу ротора, уменьшит свою частоту вращения до значения $n < n_1$.

Таким образом, ротор двигателя вращается всегда асинхронно с магнитным полем статора, вследствие чего двигатель и называется **асинхронным**.

Разность между синхронной частотой вращения магнитного поля статора и частотой вращения ротора, отнесенная к синхронной частоте вращения, называется скольжением.

По определению будем иметь

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad (2)$$

откуда

$$\boxed{n = n_1(1 - S)}. \quad (3)$$

Скольжение можно так же выразить в процентах:

$$S\% = \frac{n_1 - n}{n_1} 100\%. \quad (4)$$

В начальный момент пуска двигателя ротор еще неподвижен:

$$n = 0, \quad S = 1.$$

При синхронной частоте вращения ротора: $n_1 = n, \quad S = 0$.

Следовательно, при работе асинхронного двигателя, скольжение изменяется в пределах: $0 < S < 1$.

Обычно в установившихся режимах работы двигателя:

$$S = (2 - 6)\%.$$

Изменение нагрузки двигателя, т.е. изменение момента сопротивления на валу ротора, неизбежно влечет соответствующее изменение электромагнитного момента, поскольку установившейся режим работы характеризуется равенством этих моментов.

Величина электромагнитного момента зависит от тока в обмотке ротора, а ток определяется ЭДС, индуцируемой Φ_1 .

В свою очередь, величина указанной ЭДС зависит от скорости пересечения потоком Φ_1 , проводников обмотки ротора, т.е. от скольжения.

Таким образом, каждому значению нагрузки асинхронного двигателя соответствует определенное скольжение.

Таким образом, как видно из устройства и принципа действия АД, его обмотки статора и ротора электрически не связаны. Между ними существует только магнитная связь.

Энергия из обмотки статора передаётся в обмотку ротора магнитным полем. В этом отношении АД подобен трансформатору, в котором обмотка статора является первичной обмоткой, а обмотка ротора – вторичной.

ЛЕКЦИЯ 17

Тема: Работа асинхронных двигателей при неподвижном роторе

Учебные вопросы:

Введение.

1. Холостой ход асинхронной машины при $n = 0$.
2. Короткое замыкание асинхронной машины.
3. Заторможенная асинхронная машина при нагрузке.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.

3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. — М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 — 360 с., ч.2 — 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь, 1983.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для вузов. — Л.: Энергия, 1987. - 832 с.

Введение.

В этой лекции покажем, что при неподвижном роторе асинхронная машина представляет собой трансформатор, отличающийся от трансформатора нормального исполнения только в конструктивном отношении (распределенная обмотка на статоре и роторе, наличие зазора и т. п.).

Что же касается физической сущности явлений, то в том и в другом случае она имеет ряд сходных положений.

Поэтому целесообразно начать изучение асинхронных машин, так же как и трансформаторов, с рассмотрения предельных режимов работы машины — холостого хода и короткого замыкания — с тем, чтобы в последующем распространить представление об асинхронной машине как о трансформаторе также и на машину с вращающимся ротором.

В дальнейшем будем иметь в виду трехфазную асинхронную машину с кольцами, ротор которой мы могли бы по желанию размыкать, замыкать накоротко или на некоторое сопротивление.

Все переменные величины условимся считать синусоидальными функциями времени или пространства, рассматривая роль высших гармонических в дальнейшем особо.

Напряжения, ЭДС и токи определяются их действующими значениями, а н.с. и потоки — их наибольшими значениями. Фазы обмотки считаются симметричными.

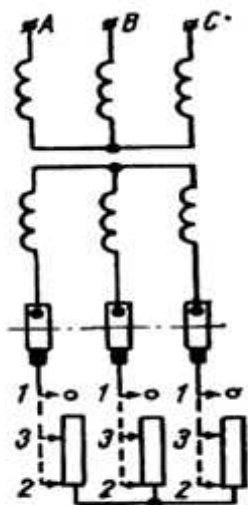


Рис. 1. Схема двигателя с контактными кольцами и реостатом

1. Холостой ход асинхронной машины при $n = 0$.

Предположим, что ротор асинхронной машины разомкнут (рис. 1) и неподвижен, а статор включен на сеть с напряжением U_1 и частотой f_1 .

В этом случае асинхронная машина представляет собой трансформатор при холостом ходе. Первичной обмоткой является статор машины, а вторичной — неподвижный ротор.

Соответственно все величины, относящиеся к статору, условимся называть первичными и обозначать индексом 1, а все величины, относящиеся к ротору, — вторичными и обозначать индексом 2.

Ход рассуждения в данном случае принципиально тот же, что и для трансформаторов.

Под действием напряжения U_1 по обмотке статора протекает ток холостого хода I_0 .

Образуемая этим током н.с. F_1 создает поток, одна часть которого Φ_m сцеплена с обмотками обеих частей машины, а другая часть $\Phi_{\pm 1}$ — только с обмоткой статора (рис. 2).

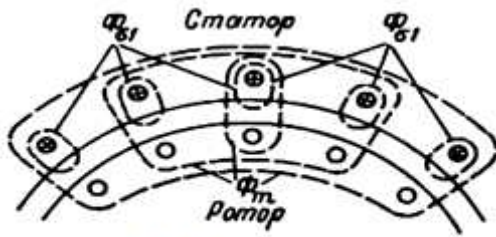


Рис. 2. Магнитные потоки при разомкнутой обмотке ротора

Первый поток является основным, а второй — потоком рассеяния.

Если p — число пар полюсов машины, то скорость вращения n_1 н.с. F_1 и соответственно потока Φ_m

$$n_1 = f_1 / p, \text{ об/с.} \quad (1)$$

Основной поток при неподвижном двигателе создает в обмотках статора и ротора э.д.с. E_1 и E_2 , определяемые формулами

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{2} \omega f_1 w_1 k_{об1} \Phi_m; \\ E_2 &= \sqrt{2} \omega f_1 w_2 k_{об2} \Phi_m. \end{aligned} \quad (2)$$

Поток рассеяния $\Phi_{\pm 1}$ создает в обмотке статора ЭДС рассеяния $E_{\pm 1}$, причем

$$\dot{E}_{\pm 1} = -j \dot{I}_0 x_1,$$

где x_1 — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора.

Кроме того, обмотка статора имеет активное сопротивление r_1 учитывая его действие в форме падения напряжения $I_0 r_1$, мы можем написать уравнение напряжений первичной обмотки асинхронной машины в том же виде, что и для трансформаторов, а именно:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1. \quad (3)$$

Напомним, что в этом уравнении $-\dot{E}_1$ и $\dot{I}_0 Z_1$ — составляющие напряжения U_1 , каждая из которых находится в равновесии с соответствующими ЭДС.

Одинаковым уравнениям ЭДС первичной обмотки для трансформатора и асинхронной машины соответствуют принципиально одинаковые диаграммы холостого хода.

Но в количественном отношении между обеими диаграммами существует заметная разница. Действительно, в асинхронной машине имеется относительно большой воздушный зазор.

Поэтому в асинхронных машинах ток I_0 составляет обычно от 20 до 50 % от I_n , т. е. он значительно больше, чем ток холостого хода трансформатора (3 - 10 % от I_n).

Кроме того, сопротивления обмоток асинхронных машин тоже относительно больше, чем в трансформаторах. Поэтому падение напряжения в обмотке статора асинхронной машины при холостом ходе составляет 2 - 5 % от номинального напряжения машины, тогда как в трансформаторах оно обычно не превышает 0,1 - 0,4 % от последнего.

Токи холостого хода трехфазной асинхронной машины образуют симметричную систему, так как магнитные сопротивления на пути всех трехфазных потоков одинаковы.

С другой стороны, по форме ток холостого хода близок к синусоиде, так как при наличии относительно большого воздушного зазора третья гармоническая тока или соответственно потока не может получить заметного значения.

Коэффициент трансформации ЭДС асинхронной машины k_e , представляющий собой отношение ЭДС E_1 и E_2 равен

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\sqrt{2} f_1 w_1 k_{o61} \Phi_m}{\sqrt{2} f_1 w_2 k_{o62} \Phi_m} = \frac{w_1 k_{o61}}{w_2 k_{o62}}. \quad (4)$$

В асинхронных машинах, как и в трансформаторах, вторичную обмотку приводят к первичной, т. е. заменяют действительную вторичную обмотку другой, имеющей такое же число фаз и число витков, шаг обмотки и количество пазов на полюс и фазу, как и первичная.

При этом параметры вторичной обмотки должны быть надлежащим образом пересчитаны, чтобы сохранить реальные энергетические соотношения в машине.

ЭДС приведенной вторичной обмотки

$$E'_2 = k_e E_2 = E_1. \quad (5)$$

При разомкнутом неподвижном роторе в машине имеются только потери в меди статора $m_1 I_0^2 r_1$ где m - число фаз статора, и потери в стали статора и ротора $p_{c1} + p_{c2}$.

На покрытие этих потерь идет мощность P_{10} , потребляемая машиной из сети. Таким образом,

$$P_{10} = m_1 I_0^2 r_1 + p_{c1} + p_{c2}. \quad (6)$$

Так как в асинхронных машинах ток I_0 и сопротивление r_1 относительно велики, то потери в меди p_{m1} составляют заметную часть мощности P_{10} , тогда как в трансформаторах мы всегда можем ими пренебречь.

Зная P_{10} , мы можем определить активную составляющую тока I_{0a} по формуле

$$I_{0a} = \frac{P_{10}}{m_1 U_1}.$$

Активная составляющая тока I_{0a} обычно невелика по сравнению с реактивной составляющей этого тока I_{0r} , и угол $\varphi_0 = 70 \div 80^\circ$.

Схема замещения асинхронной машины при холостом ходе не отличается от соответствующей схемы трансформатора.

2. Короткое замыкание асинхронной машины.

Если мы переместим при заторможенном роторе ($n = 0$) подвижный контакт реостата в цепи ротора (рис. 1) из положения 1 в положение 2, то будем иметь режим короткого замыкания асинхронной машины.

По своей физической сущности такое короткое замыкание подобно короткому замыканию трансформатора, но имеет некоторые отличия, вытекающие из конструктивных особенностей асинхронных машин.

Если мы хотим, чтобы при коротком замыкании токи I_1 и I_2 в обмотках статора и ротора были ограничены их номинальными значениями, то, так же как и в трансформаторах, мы должны понизить подводимое к статору напряжение до значения U_k , составляющего примерно 15 - 25 % от U_n (по сравнению с 5 - 17 % в трансформаторах).

Токи I_1 и I_2 создают н.с. статора и ротора, из которых мы выделим первые гармонические н.с. F_1 и F_2 .

При $n = 0$ частота тока в роторе равна частоте тока в статоре f_1 .

Если p — число пар полюсов машины, то н.с. F_1 и F_2 вращаются относительно неподвижных статора и ротора в одинаковом направлении с одинаковыми скоростями $n_1 = f_1 / p$, т.е. они неподвижны относительно

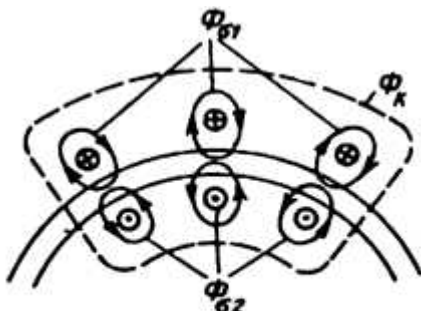


Рис. 3. Магнитные потоки асинхронной машины при коротком замыкании

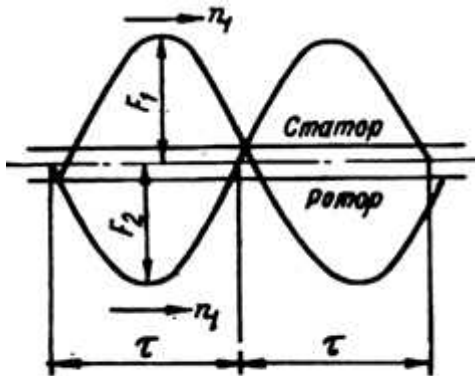


Рис. 4. Намагничивающие силы статора и ротора при коротком замыкании

друг друга и образуют результирующую, вращающуюся со скоростью n_1 н.с. F_k , которая создает основной вращающийся поток Φ_k , сцепленный с обмотками статора и ротора.

Кроме того, н.с. F_1 создает первичный поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$, сцепленный только с первичной обмоткой, а н.с. F_2 — вторичный поток рассеяния $\Phi_{\sigma 2}$, сцепленный только со вторичной обмоткой (рис. 3).

Как и в трансформаторе, н.с. F_1 и F_2 при коротком замыкании действуют навстречу друг другу.

Поэтому, несмотря на значительную величину токов I_1 и I_2 и создаваемых ими н.с. F_1 и F_2 , результирующая н.с. F_k при коротком замыкании относительно мала, вследствие чего и поток Φ_k мал, и, следовательно, основная магнитная цепь в этом случае не насыщена (рис. 4).

Первичный ток I_1 можно представить себе как сумму двух составляющих, из которых одна (I_m) создает н.с. $\dot{F}_m$, а вторая ($-I_2$) создает н.с. $(-\dot{F}_2)$, компенсирующую н.с. $\dot{F}_2$ вторичного тока $\dot{I}_2$.

Таким образом, имеем

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}_2).$$

Или

$$\dot{I}_1 + (-\dot{I}_2) = \dot{I}_m \quad (7)$$

Соответственно

$$\dot{F}_1 = \dot{F}_m + (-\dot{F}_2)$$

Или

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_m \quad (8)$$

Следовательно

$$\frac{m_1 \sqrt{2}}{\textcircled{R}} \frac{w_1 k_{o61}}{p} \dot{I}_1 + \frac{m_2 \sqrt{2}}{\textcircled{R}} \frac{w_2 k_{o62}}{p} \dot{I}_2 = \frac{m_1 \sqrt{2}}{\textcircled{R}} \frac{w_1 k_{o61}}{p} \dot{I}_m.$$

Подставив сюда $\dot{I}_1 = \dot{I}_m - \dot{I}_2$ получим:

$$-m_1 w_1 k_{o61} \dot{I}_2' + m_2 w_2 k_{o62} \dot{I}_2 = 0,$$

откуда найдем коэффициент трансформации токов:

$$k_i = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_2'} = \frac{m_1 w_1 k_{o61}}{m_2 w_2 k_{o62}} \quad (9)$$

Следовательно, приведенный ток ротора

$$\dot{I}_2' = \frac{1}{k_i} \dot{I}_2. \quad (10)$$

Пользуясь коэффициентами трансформации э.д.с. и токов, мы можем определить приведенные активное и индуктивное сопротивления ротора r_2' и x_2' .

При приведении r_2 будем исходить из того, что потери в меди обмотки ротора не зависят от приведения. Следовательно,

$$m_2 \dot{I}_2^2 r_2 = m_1 \dot{I}_2'^2 r_2',$$

откуда

$$r_2' = \frac{m_2}{m_1} \frac{\dot{I}_2^2}{\dot{I}_2'^2} r_2 = \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{m_1 w_1 k_{o61}}{m_2 w_2 k_{o62}} \right)^2 r_2 = \quad (11)$$

$$\frac{w_1 k_{o61} m_1 w_1 k_{o61}}{w_2 k_{o62} m_2 w_2 k_{o62}} r_2 = k_e k_i r_2 = k r_2,$$

где

$$k = k_e k_i \quad (12)$$

называется коэффициентом приведения сопротивлений.

При приведении индуктивного сопротивления рассеяния x_2 будем исходить из того, что угол α_2 между ЭДС E_2 и током I_2 тоже не зависит от приведения. Следовательно,

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{x_2}{r_2} = \frac{x'_2}{r'_2},$$

откуда

$$x'_2 = \frac{r'_2}{r_2} x_2 = k x_2. \quad (13)$$

Уравнения первичных и вторичных напряжений асинхронной машины при коротком замыкании пишутся совершенно так же, как и для трансформаторов, а именно:

$$\dot{U}_{1к} = -\dot{E}_{1к} + \dot{I}_1 Z_1 \quad (14)$$

и

$$\dot{E}_{2к}' - \dot{I}_2' Z_2' = 0. \quad (15)$$

Здесь $Z_1 = r_1 + jx_1$ и $Z_2' = r_2' + jx_2'$ — полные сопротивления обмоток статора и ротора.

Принимая во внимание, что $\dot{E}_2' = \dot{E}_1$ и $\dot{I}_2' \approx -\dot{I}_1$ и решая уравнения (14) и (15) относительно $\dot{I}_1$, получим

$$\dot{I}_1 \approx \frac{\dot{U}_{1к}}{Z_1 + Z_2'}, \quad (16)$$

соответственно чему мы имеем для короткозамкнутой асинхронной машины ту же схему замещения, что и для трансформатора, и те же параметры короткого замыкания, а именно:

$$r_k \approx r_1 + r_2'; \quad x_k \approx x_1 + x_2'. \quad (17)$$

3. Заторможенная асинхронная машина при нагрузке.

Переведем подвижный контакт реостата в цепи заторможенного ротора на рис. 1 в положение 3.

В этом случае асинхронную машину можно рассматривать как трансформатор под нагрузкой. В общем случае нагрузка может носить смешанный характер.

Физические процессы здесь совершенно те же, что и в трансформаторах, с той не имеющей существенного значения разницей, что в данном случае мы имеем вращающиеся н.с.

Соответственно этому имеют тот же вид, что и в трансформаторах, уравнения равновесия ЭДС и н.с., векторная диаграмма и схемы замещения.

Уравнение ЭДС статора повторяет уравнение ЭДС трансформатора, а именно:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1. \quad (18)$$

Предполагая, что ротор приведен к статору и что в цепь ротора введено добавочное приведенное к статору сопротивление Z'_D , напомним уравнение ЭДС ротора, а именно:

$$\dot{I}'_2 (Z'_2 + Z'_D) = \dot{E}'_2. \quad (19)$$

Уравнение н.с. асинхронной заторможенной машины повторяет уравнение н.с. для трансформаторных связей первичной и вторичной систем:

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_m \quad (20)$$

или

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_m \quad (21)$$

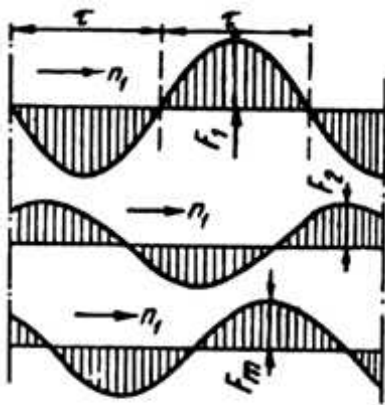


Рис. 5. Намагничивающие силы неподвижной асинхронной машины при нагрузке

На рис. 5 показаны синусоиды н.с. F_1, F_2 и F_m , вращающиеся в одинаковом направлении и с одинаковой скоростью $n_1 = f_1 / p$; при этом синусоида F_2 сдвинута относительно синусоиды F_1 на такой угол, что сумма н.с. F_1 и F_2 дает н.с. F_m , необходимую для создания основного магнитного потока Φ_m .

Решая совместно уравнения э.д.с. и н.с. относительно тока I_1 , можем получить для него то же выражение, что и для трансформатора, и соответственно схему замещения (рис. 6), повторяющую собой схему замещения трансформатора в предположении,

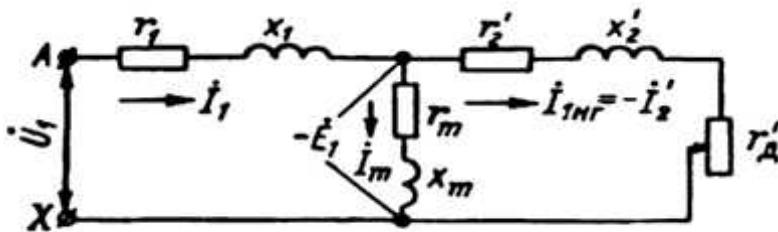


Рис. 6. Схема замещения неподвижной асинхронной машины

что в цепь ротора асинхронной машины введено только активное сопротивление ($Z_D = r_D$), как это обычно бывает в двигателях.

Векторная диаграмма, соответствующая схеме замещения на рис. 6, построена на рис. 7.

При построении мы совмещаем с положительным направлением оси ординат нагрузочную составляющую первичного тока $I_{1HГ} = -I_2$.

Асинхронную машину можно рассматривать как трансформатор не только при неподвижном роторе, но и при вращении последнего.

В этом случае она представляет собой трансформатор обобщенного типа, т. е. такой, в котором преобразовываются не только напряжения, токи и число фаз, но частота и род энергии.

В результате, написав уравнения для асинхронной машины и решив их в отношении тока, получим принципиально те же схемы замещения, что и для трансформатора.

При этом мы условимся:

1) иметь в виду, так же как и раньше, только первые гармонические переменных величин — напряжений, токов и т.д., так как они охватывают и определяют основной круг процессов в асинхронной машине;

2) рассматривать процессы в роторе, вращающемся с любой скоростью, независимо от причины, приводящей ротор во вращение, с тем, чтобы придать анализу возможно большую общность.

Предположим, что статор асинхронной машины включен в сеть с заданным напряжением U_1 и постоянной частотой f_1 .

Основной поток Φ_m , вращающийся со скоростью $n_1 = f_1 / p$, создает в обмотке статора основную ЭДС E_1 .

В этой же обмотке первичный поток рассеяния $\Phi_{\pm 1}$ индуцирует ЭДС рассеяния $\dot{E}_{\pm 1} = -j\dot{I}_1 x_2$.

Если, кроме того, учесть активное сопротивление обмотки статора r_1 , то можно видеть, что в статоре асинхронной машины при вращении ротора имеются те же ЭДС, что и в машине с заторможенным ротором; соответственно этому уравнение напряжений пишется в обоих случаях одинаково, а именно:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1. \quad (1)$$

По условию ротор может вращаться в том же направлении, что и поле, и в обратном. В первом случае будем считать скорость вращения ротора n положительной, во втором — отрицательной.

Рассмотрим процессы, происходящие в роторе, считая, что цепь ротора пока разомкнута.

1. Основные явления, происходящие в асинхронной машине при вращении ротора.

А. Частота ЭДС, индуцируемой в обмотке ротора.

При вращении ротора со скоростью n в магнитном поле, вращающемся со скоростью n_1 все происходит так, как если бы ротор был неподвижен, а поток Φ_m вращался относительно него со скоростью

$$n_2 = n_1 - n.$$

Следовательно, частота ЭДС, индуцируемой в обмотке ротора,

$$f_2 = pn_2 = p(n_1 - n) = n_1 p \frac{n_1 - n}{n_1} = f_1 s, \quad (2)$$

где f_1 - частота питающей сети; s - скольжение.

Мы видим, что при заданной частоте ЭДС в роторе изменяется прямо пропорционально скольжению. Для краткости частоту f_2 называют частотой скольжения.

Б. ЭДС ротора.

Согласно общему выражению для э.д.с. ротора имеем:

$$E_{2s} = 4,44 f_2 w_2 k_{об2} \Phi_m = 4,44 f_1 s w_2 k_{об2} \Phi_m = E_2 s, \quad (3)$$

т. е. при заданном основном потоке Φ_m ЭДС, индуцируемая в роторе при его вращении, равна ЭДС E_2 при неподвижном роторе, умноженной на скольжение.

В. Сопротивление обмотки ротора.

Предположим, что ротор замкнут на некоторое добавочное сопротивление. Условимся считать это сопротивление активным, так как это ближе всего соответствует эксплуатационным условиям работы асинхронной машины с контактными кольцами.

Тогда активное сопротивление цепи ротора будет

$$R_2 = r_2 + r_d,$$

где r_2 - активное сопротивление собственно обмотки ротора; r_d - добавочное сопротивление, включенное в цепь ротора через контактные кольца.

Если не принимать во внимание явления вытеснения тока в проводниках обмотки ротора и изменения активного сопротивления обмотки в связи с изменением ее температуры, то можно считать, что

$$R_2 = r_2 + r_d = const$$

или при приведении этих сопротивлений к обмотке статора

$$R'_2 = r'_2 + r'_d = const.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния неподвижного ротора

$$x_2 = 2\omega f_1 L_{\pm 2},$$

где $L_{\pm 2}$, — индуктивность, определяемая вторичным потоком рассеяния.

Так как потоки рассеяния проходят главным образом по воздуху, то $L_{\pm 2} \approx const$.

Следовательно, индуктивное сопротивление ротора при вращении

$$x_{2s} = 2\omega f_2 L_{\pm 2} = 2\omega f_1 s L_{\pm 2} = x_2 s \quad (4)$$

или при приведении к обмотке статора

$$x'_{2s} = x'_2 s, \quad (5)$$

т. е. индуктивное сопротивление обмотки ротора при его вращении равно индуктивному сопротивлению неподвижного ротора, умноженному на скольжение.

2. Уравнение ЭДС ротора и ток ротора.

Если цепь ротора замкнута, то по ней протекает ток I_2 , создающий поток рассеяния $\Phi_{\sigma 2}$ (рис. 1, а) и встречающий сопротивление r_2 .

Соответственно этому в обмотке ротора существуют ЭДС $\dot{E}_{2s} = \dot{E}_2 s$, создаваемая основным потоком Φ_m , и ЭДС рассеяния

$$\dot{E}_{\pm 2} = -jI_2 x_{2s} = -jI_2 x_2 s.$$

Тогда по второму закону Кирхгофа имеем

$$\dot{E}_{2s} + \dot{E}_{\pm 2} = \dot{E}_2 s - jI_2 x_2 s = I_2 r_2.$$

или

$$\dot{E}_2 s = \dot{I}_2 Z_{2s}. \quad (6)$$

где $Z_{2s} = r_2 + jx_2 s$. — полное сопротивление реального ротора.

Следовательно

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{\dot{E}_2 s}{r_2 + jx_2 s}. \quad (7)$$

и

$$I_2 = \frac{E_2 s}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2 s^2}}. \quad (8)$$

3. Скорость вращения н.с. ротора.

Протекая по обмотке ротора, ток I_2 создает н.с. F_2 , вращающуюся относительно ротора со скоростью n_2 , соответствующей частоте тока в роторе f_2 .

Кроме того, сам ротор вращается со скоростью n . Следовательно, н.с. F_2 ротора вращается относительно какой-нибудь неподвижной точки в пространстве, а стало быть, и относительно статора со скоростью $n_2 + n$.

$$\text{Но } n_2 = \frac{f_2}{p} = \frac{f_1 s}{p} = n_1 s = n_1 \frac{n_1 - n}{n_1} = n_1 - n.$$

Таким образом,

$$n_2 + n = n_1 - n + n = n_1,$$

т. е. н.с. ротора вращается в пространстве всегда (т. е. независимо от режима работы) с той же скоростью и в том же направлении, что и н.с. статора.

4. Векторная диаграмма и эквивалентная схема асинхронного двигателя.

При работе двигателя в обмотке его ротора протекает переменный ток, частота которого $f_2 = sf_1$.

Так как обмотка ротора многофазная, то этот ток создает магнитное поле, вращающееся относительно ротора с частотой, зависящей от частоты тока: $60 f_2 / p = s 60 f_1 / p = sn_1 = n_s$.

Имея в виду, что ротор вращается с частотой n_2 , получим частоту вращения магнитного поля ротора в пространстве: $n_1 = n_2 + n_s$.

Таким образом, магнитные поля, создаваемые токами в статоре и роторе, вращаясь в пространстве синхронно, остаются неподвижными друг относительно друга, и между этими полями имеет место установившееся взаимодействие.

Пренебрегая падением напряжения в активном и реактивном сопротивлениях обмотки статора, можно считать, что приложенное напряжение сети уравновешено ЭДС, созданной в обмотке статора: $\dot{U}_1 = -E_1$.

Поэтому при неизменном приложенном напряжении U_1 ЭДС E_1 а значит и магнитный поток, создающий эту ЭДС, остаются практически неизменными.

Следовательно, в результате совместного действия н.с. обмоток статора и ротора устанавливается практически неизменный магнитный поток, равный магнитному потоку при х.х.

При х.х. (без учета потерь) $S = 0$ и тока в роторе нет, по обмотке статора протекает ток х.х. I_0 , а н.с. $m_1 k_{o61} w_1 I_0$ создает вращающееся магнитное поле.

На основании равновесия н.с. можно записать следующее уравнение:

$$m_1 k_{o61} w_1 \dot{I}_1 + m_2 k_{o62} w_2 \dot{I}_{2s} = m_1 k_{o61} w_1 \dot{I}_0$$

или

$$m_1 k_{o61} w_1 \dot{I}_1 = m_1 k_{o61} w_1 \dot{I}_0 - m_2 k_{o62} w_2 \dot{I}_{2s}.$$

Откуда

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - m_2 k_{o62} w_2 \dot{I}_{2s} / (m_1 k_{o61} w_1) = \dot{I}_0 - \dot{I}'_{2s}. \quad (9)$$

Выражение (9) показывает, что ток в обмотке статора I_1 создает неизменный магнитный поток (составляющая I_0) и уравновешивает размагничивающее действие тока обмотки ротора I'_{2s} .

Поэтому всякое изменение тока в роторе будет вызывать соответствующее изменение тока статора. Если, например, увеличить нагрузку на валу двигателя, то увеличатся скольжение, токи в обмотке ротора и, следовательно, в обмотке статора.

Уравнение равновесия ЭДС для фазы обмотки статора имеет следующий вид:

1. Ток холостого хода в асинхронных машинах значительно больше, чем в трансформаторах. В асинхронных машинах ток х.х. составляет 25 - 40 %, а при очень малых мощностях достигает 70 % и выше.

Такое большое значение тока х.х. в машине объясняется наличием воздушного зазора между статором и ротором, резко увеличивающим магнитное сопротивление, что вызывает увеличение потребления реактивного намагничивающего тока, создающего магнитный поток.

2. Реактивные сопротивления обмоток статора и ротора асинхронной машины значительно больше реактивных сопротивлений обмоток трансформатора.

Это объясняется тем, что в трансформаторах потоки рассеяния, замыкаясь через воздух, встречают на своем пути большие магнитные сопротивления, поэтому невелики.

В машинах обмотки статора и ротора, помещаемые в пазах, окружены сталью и потоки рассеяния значительно больше.

3. Активные сопротивления обмоток асинхронной машины также несколько больше активных сопротивлений обмоток трансформатора.

Это объясняется тем, что в машине лучше условия охлаждения, чем в трансформаторах, за счет наличия вращающихся частей, и, следовательно, допускаются большие плотности тока.

Приняв $Z_2 = r_1 + jx_1$ и $Z'_2 = r'_2/s + jx'_2$, запишем уравнения (9), (10) и (12) в следующем виде

$$\dot{I}'_{2s} = \dot{I}_0 + \dot{I}_1; \quad (13)$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \quad (14)$$

$$\dot{E}'_2 = \dot{I}'_{2s} Z'_{2s}. \quad (15)$$

Обозначим

$$-\dot{E}_1 = -\dot{E}'_2 = \dot{I}_0 Z_0, \quad (16)$$

где $Z_0 = r_0 + jx_0$ - активное сопротивление, эквивалентное потерям в стали сердечника статора; X_0 - индуктивное сопротивление, эквивалентное действию основного магнитного потока на обмотку статора.

Из (13), (15) и (16) получим

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 Z'_{2s} / (Z_0 + Z'_{2s}). \quad (17)$$

и из (14), (16) и (17) имеем

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 [Z_1 + Z_0 Z'_{2s} / (Z_0 + Z'_{2s})]. \quad (18)$$

Выражение (18) показывает, что каждая фаза асинхронного двигателя может быть представлена полной эквивалентной схемой (рис. 2, а), состоящей из двух последовательно соединенных сопротивлений, — полного сопротивления фазы обмотки статора Z_1 и сопротивления $Z_0 Z'_{2s} / (Z_0 + Z'_{2s})$, состоящего из двух параллельных ветвей с сопротивлениями Z_0 и Z'_{2s} .

В дальнейшем для упрощения выражения вращающего момента двигателя мы будем пренебрегать током I_0 , считая $\dot{I}_1 = -\dot{I}'_{2s}$.

Упрощенная эквивалентная схема фазы двигателя показана на рис. 2, б).

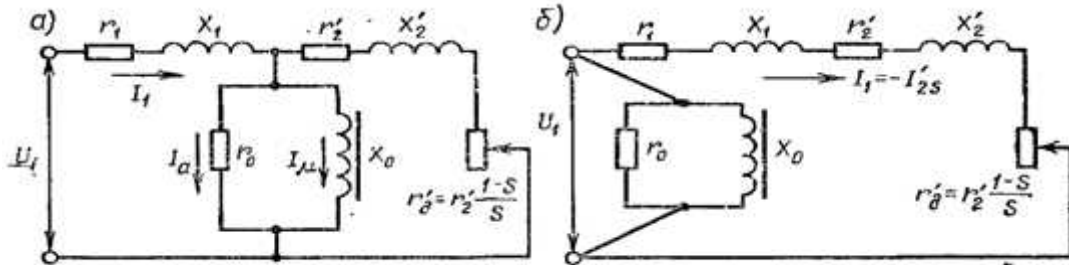


Рис. 2. Эквивалентные схемы асинхронного двигателя

Из этой схемы приведенный ток фазы обмотки ротора

$$\dot{I}'_{2s} = U_1 / \sqrt{(r_1 + r'_2/s)^2 + (x_1 + x'_2)^2}. \quad (19)$$

Из упрощенной эквивалентной схемы, пренебрегая падением напряжения в сопротивлении обмотки статора $Z_1 = r_1 + jx_1$, т.е. считая $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1$, построим упрощенную векторную диаграмму асинхронного двигателя (рис. 3, а).

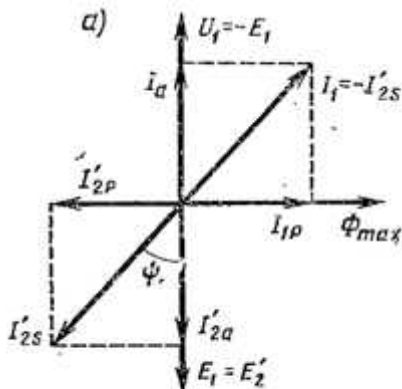


Рис. 3. Упрощенная векторная диаграмма асинхронного двигателя

Так как токи статора и приведенного ротора равны и противоположно направлены $\dot{I}_1 = -\dot{I}'_{2s}$, то и активные и реактивные составляющие этих токов также равны и противоположно направлены: $\dot{I}_{1a} = -\dot{I}'_{2a}$ и $\dot{I}_{1p} = -\dot{I}'_{2p}$.

Из упрощенной диаграммы видно, что активная составляющая тока статора совпадает с напряжением, т. е. двигатель потребляет электрическую энергию из сети, преобразуя ее в механическую, а реактивная составляющая тока статора отстает от напряжения на $\varphi / 2$, т. е. двигатель потребляет из сети реактивную мощность, необходимую для создания магнитного потока.

Активная составляющая тока ротора пропорциональна первой степени скольжения, а реактивная составляющая пропорциональна второй степени скольжения.

ЛЕКЦИЯ 19

Тема: Вращающий момент асинхронных двигателей

Учебные вопросы:

1. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.
2. Вращающие моменты асинхронной машины.

3. Электромагнитный момент асинхронной машины.
4. Зависимость момента $M_{эм}$ от скольжения.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь, 1983.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1987. - 832 с.

1. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Существенным вопросом в работе асинхронного двигателя является превращение электрической энергии, потребляемой из сети, в механическую энергию.

В этом случае энергия передается через магнитное поле воздушного зазора из статора на ротор.

Передача энергии через зазор связана с развиваемыми на роторе силами электромагнитного происхождения, создающими вращающий момент, являющийся электромагнитным моментом машины.

Преобразование энергии из одного вида в другой неизбежно связано с потерями в различных частях машины.

Проследим процесс преобразования подводимой к двигателю электрической энергии в механическую энергию на валу.

Пусть P_1 — подводимая к двигателю электрическая мощность (рис. 1). Часть этой мощности $p_{м1}$ тратится на потери в меди статора, а оставшаяся часть преобразовывается в мощность вращающегося потока.

Но при этом возникают потери в стали машины p_c ; практически следует иметь в виду только потери в стали статора, так как частота перемагничивания стали в роторе обычно весьма невелика (1 - 3 Гц), и поэтому потери в стали ротора малы.

Таким образом, электромагнитная мощность

$$P_{эм} = P_1 - p_{м1} - p_c \quad (1)$$

Электромагнитная мощность передается через зазор на ротор. Если бы в роторе не было потерь, то эта мощность целиком преобразовалась бы в механическую.

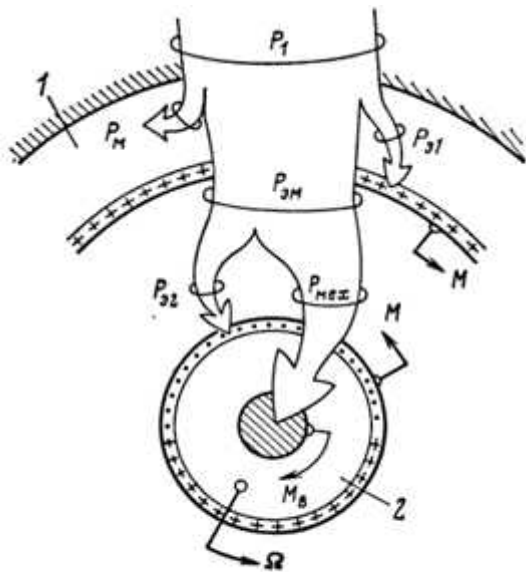


Рис. 1. Преобразование энергии в асинхронном двигателе.
1 - статор; 2 - ротор

Но при протекании тока по обмотке ротора в ней возникают потери в меди или в алюминии, смотря по материалу обмотки.

Для определенности условимся считать обмотку медной и говорить о потерях в меди $p_{м2}$.

Следовательно, полная механическая мощность, развиваемая двигателем на валу,

$$P_{мх} = P_{эм} - p_{м2}. \quad (2)$$

Полезно отдаваемая двигателем механическая мощность P_2 меньше мощности $P_{мх}$ на величину механических потерь $p_{мх}$ и добавочных потерь p_d .

Потери p_d возникают при вращении двигателя в обмотках и стали машины и обусловлены зубчатостью статора и ротора и не вполне синусоидальным распределением н.с. в пространстве.

Добавочные потери создают такой же добавочный тормозной момент, как и механические потери, поэтому они покрываются таким же путем, как и эти потери, и при рассмотрении энергетической картины работы двигателя прибавляются к механическим потерям.

Таким образом,

$$P_2 = P_{мх} - p_{мх} - p_d. \quad (3)$$

Отсюда для двигательного режима работы асинхронной машины получаем следующие соотношения:

$$P_1 = P_{эм} + p_{м1} + p_c. \quad (4)$$

$$P_{эм} = P_{мх} + p_{мх} + p_{м2}; \quad (5)$$

$$P_{мх} = P_2 + p_{мх} + p_d. \quad (6)$$

КПД двигателя

$$\eta = P_2 / P_1. \quad (7)$$

2. Вращающие моменты асинхронной машины

Асинхронный двигатель при установившемся режиме работы ($n = \text{const}$) преодолевает нагрузочный момент $M_{нг}$, состоящий из тормозного момента при холостом ходе M_0 и полезного тормозного момента M_2 .

Следовательно, электромагнитный момент $M_{эм}$, развиваемый на роторе двигателя, при постоянной скорости вращения имеет две составляющие, каждая из которых находится в равновесии с соответствующей составляющей тормозного момента.

Таким образом,

$$M_{эм} = M_0 + M_2. \quad (8)$$

Здесь

$$M_0 = \frac{P_{мх} + P_D}{\Omega} = \frac{P_{мх} + P_D}{2\pi n}; \quad (9)$$

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_2}{2\pi n}, \quad (10)$$

где P_2 - полезно отдаваемая двигателем механическая мощность; n - скорость вращения ротора двигателя.

Соответствующая электромагнитному моменту $M_{эм}$ полная механическая мощность, развиваемая на роторе двигателя и определяемая соотношением (6):

$$P_{мх} = M_{эм} \Omega = M_{эм} 2\pi n. \quad (11)$$

Откуда

$$M_{эм} = \frac{P_{мх}}{\Omega} = \frac{P_{мх}}{2\pi n}. \quad (12)$$

Момент $M_{эм}$ образуется в результате взаимодействия вращающегося магнитного потока Φ_m и тока I_2 в роторе.

Но поток Φ_m вращается в пространстве с угловой скоростью $\Omega_1 = 2\pi n_1$, где $n_1 = f_1 / p$. Развиваемая при этом мощность есть электромагнитная мощность двигателя $P_{эм}$.

$$\text{Следовательно,} \quad P_{эм} = M_{эм} \Omega_1, \quad (13)$$

откуда

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\Omega_1} = \frac{P_{эм}}{2\pi n_1}. \quad (14)$$

На основании (12) и (14) получаем соотношение

$$M_{мх} = \frac{n}{n_1} P_{эм} = (1-s) P_{эм}. \quad (15)$$

Подставив это значение $P_{мх}$ в (2), получим:

$$P_{м2} = s P_{эм}. \quad (16)$$

т.е. потери в меди вторичной цепи или в общем случае электрическая мощность $P_э$, развиваемая во вторичной цепи, равны электромагнитной мощности $P_{эм}$, умноженной на скольжение.

Таким образом, электромагнитная мощность $P_{эм}$ делится на составляющие $P_{мх}$ и $P_{м2}$, определяемые в зависимости от скольжения равенствами (15) и (16).

Определяя из (16) величину $P_{эм}$ и подставляя ее в (14), получаем еще одно выражение для величины электромагнитного момента:

$$M_{эм} = \frac{P_{м2}}{s \Omega_1} = \frac{P_{м2}}{2\pi n_1 s}. \quad (17)$$

3. Электромагнитный момент асинхронной машины.

Электромагнитный момент создается в результате взаимодействия проводников обмотки ротора с током I_2 и вращающегося магнитного поля основной гармонической или потока Φ_m .

Предположим сначала, что роторная обмотка выполнена по принципу беличьей клетки.

Тогда в каждом проводнике основной синусоидальной волной вращающегося результирующего магнитного поля будет индуцироваться ЭДС e_{-1} , величина которой изменяется по пространственной координате α согласно закону синуса.

В общем случае ток в отдельном проводнике i_{-1} будет отставать от создающей его ЭДС e_{-1} на угол Ψ_2 в направлении вращения результирующего магнитного поля.

Волна значений e_{-1} представляющих собой мгновенные значения ЭДС, индуцированных в данных проводниках, совпадает по фазе с полной значений индукций B_{-1} в данных точках, волна же значений токов i_{-1} будет сдвинута в сторону, противоположную движению волны индукции, на тот же угол в пространстве Ψ_2 (рис. 2).

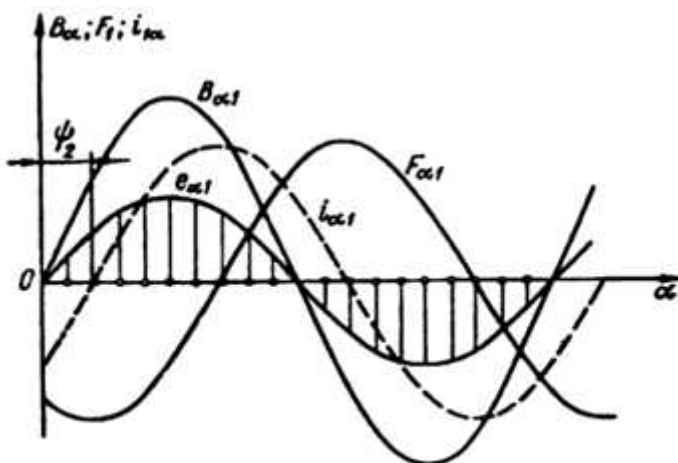


Рис. 2. Кривые распределения магнитной индукции, ЭДС и токов ротора вдоль воздушного зазора

Бегущим вдоль окружности ротора полем с индукцией B_{-1} и током i_{-1} в проводнике создается элементарное усилие

$$f_{-1} = B_{-1} i_{-1} l,$$

где l - активная длина стали ротора.

Момент вращения, создаваемый одним проводником с током:

$$m_{-1} = f_{-1} \frac{D}{2} = B_{-1} i_{-1} l \frac{D}{2},$$

где D - диаметр ротора.

Число проводников, приходящихся на пространственный угол d окружности ротора, равно $\frac{N}{2\pi} d$.

Так как i_{-1} и i_{-1} изменяются вдоль пространственной координаты по закону синуса, то

$$B_{-1} = B_m \sin p \alpha \text{ и } i_{-1} = I_{2m} \sin(p \alpha - \alpha_2);$$

$$B_{-1} i_{-1} = B_m I_{2m} \sin p \alpha \sin(p \alpha - \alpha_2).$$

Суммарный момент вращения от всех проводников ротора, расположенных на одном полюсном делении машины:

$$M_p = \int_0^{\frac{2\pi}{p}} \frac{B_m \sin pI_{2m} \sin(p - \alpha_2) l D N}{2 \cdot 2\pi} d\alpha_2.$$

Среднее значение результирующего момента, создаваемого проводниками ротора всех полюсов:

$$\begin{aligned} M_{cp} = 2pM_p &= \frac{2pB_m l D N}{2 \cdot 2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{p}} \sin p \sin(p - \alpha_2) d\alpha_2 = \\ &= p \frac{B_m l D}{p} \frac{I_{2m} N}{4} \cos \alpha_2. \end{aligned}$$

Принимая во внимание, что

$$I_{2m} = I_2 \sqrt{2}; B_m = B_{cp} \frac{2}{\pi}; D = \frac{2p^2}{\pi}.$$

Получаем

$$\frac{B_m l D}{p} = B_{cp} l^2 = \Phi_m$$

и средний момент при подстановке $N = 2w_2 m_2$

$$M_{cp} = \frac{1}{2\sqrt{2}} p \Phi_m I_2 N \cos \alpha_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} m_2 p w_2 \Phi_m I_2 \cos \alpha_2.$$

Это выражение справедливо для случая, когда ротор имеет обмотку типа беличьей клетки, для которой обмоточный коэффициент $k_{об2} = 1,0$.

Выражение для величины электромагнитного момента M_{cp} можно также получить через передаваемую из статора в ротор электромагнитную мощность $P_{эм}$:

$$\begin{aligned} M_{cp} &= \frac{m_2 E_2 I_2 \cos \alpha_2}{\frac{2\pi f_1}{p}} = \frac{p m_2 \sqrt{2} \Phi_m w_2 k_{об2} f_1 I_2 \cos \alpha_2}{2\pi f_1} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} p m_2 w_2 k_{об2} \Phi_m I_2 \cos \alpha_2. \end{aligned}$$

Отсюда

Ток Г-образной схемы замещения

$$I_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2}{s})^2 + (x_1 + x_2)^2}}. \quad (18)$$

Изменение тока ротора согласно (18) изображено на рис. 3, причем токи генераторного режима ($S < 0$) представлены в виде отрицательных величин.

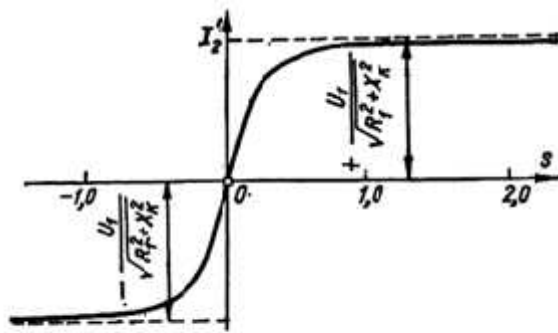


Рис. 3. Изменение тока ротора I_2' в функции скольжения

Ток I_2' максимален, очевидно, при $s = \pm\infty$.

Согласно схеме замещения выражение для электромагнитной мощности $P_{эм}$ можно записать в виде

$$P_{эм} = m_2 I_2'^2 \frac{r_2}{s} = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} = m_1 I_2'^2 \frac{R_2}{s}. \quad (19)$$

Подставив в (19) значение I_2' по (18), получим зависимость электромагнитной мощности от напряжения

U_1 скольжения S и параметров машины:

$$P_{эм} = \frac{m_1 U_1^2 \frac{R_2}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2}, \quad (20)$$

а согласно (14) и (20) найдём искомое выражение для электромагнитного момента в виде

$$M_{эм} = \frac{pm_1 U_1^2 \frac{R_2}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2 \right]}. \quad (21)$$

Таким образом, кривая $M_{эм} = f(s)$ при $U_1 = \text{const}$ имеет вид, изображенный на рис. 4.

При больших значениях скольжения $M_{эм}$ уменьшается, несмотря на увеличение I_2 , так как $\cos \alpha_2$ при этом быстро уменьшается.

Приведенные выражения для моментов при использовании единиц системы СИ дают значения момента в ньютон-метрах.

4. Зависимость момента $M_{эм}$ от скольжения.

Формула (21) имеет весьма важное значение. При ее первоначальном анализе мы считаем все величины, за исключением скольжения S , постоянными, так как некоторые из них ($m_1, p, R_1, R_2, X_1, X_2$) (m_1, p, R_1) заданы конструктивно, а другие (U_1, f_1) – сетью, питающей двигатель.

Мы исследуем вращающий момент двигателя, начиная с момента включения двигателя в сеть, когда $S = 1$. Пусть момент $M_{эм}$, развиваемый двигателем при $S = 1$, достаточен для преодоления нагрузочного момента.

Тогда двигатель придет во вращение с некоторым ускорением и будет увеличивать скорость вращения до тех пор, пока его вращающий момент не станет равным тормозному. После этого процесс пуска в ход заканчивается, и двигатель продолжает работать при установившемся режиме.

Соответственно непрерывному увеличению скорости скольжение двигателя при пуске непрерывно уменьшается от $S = 1$ до некоторой величины, представляющей собой правильную положительную дробь.

При этом одновременно увеличиваются числитель и знаменатель в формуле (21). Предположим, что добавочное сопротивление в цепи ротора $r_d = 0$ и, следовательно, $R_2 = \pm r_2'$.

В этом случае зависимость $M_{эм} = f(s)$ имеет вид кривой на рис. 4.

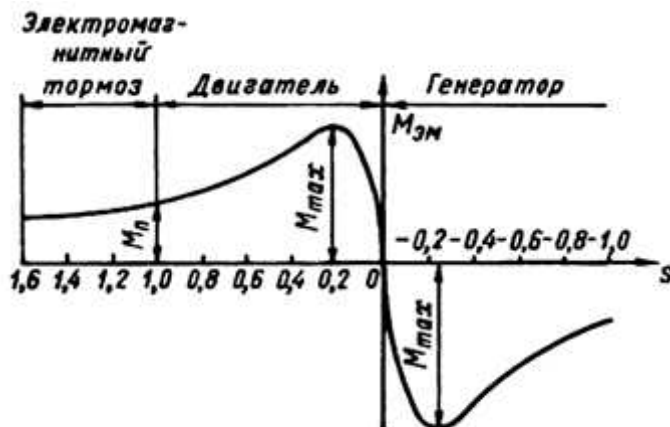


Рис. 4. Зависимость $M = f(s)$ при $U = \text{const}$; $f = \text{const}$ $R_0 = 0$

Характер кривой объясняется тем, что сопротивления X_1 и X_2 обычно значительно больше сопротивления R_1 и R_2 .

Поэтому при разгоне двигателя числитель в формуле (21) растет сначала быстрее, чем знаменатель, а затем преобладает рост знаменателя, и момент $M_{эм}$ уменьшается.

При синхронном ходе, т. е. при $S = 0$, момент $M_{эм} = 0$.

Так как формула (21) выведена на основе общих предпосылок, то она справедлива для любого режима работы асинхронной машины. При переходе в генераторный режим работы скольжение меняет свой знак на обратный ($S < 0$), соответственно чему момент $M_{эм}$ становится отрицательным, т. е. тормозящим.

Характер кривой момента генератора такой же, как и двигателя (часть кривой направо от оси ординат на рис. 21), но максимум момента несколько больше.

Кривая момента при работе в режиме электромагнитного тормоза ($S > +1$) представляет собой продолжение кривой момента двигателя.

5. Максимальный электромагнитный момент и максимальная мощность.

Выражение (20), полученное на основе схемы замещения, позволяет найти выражение для максимального электромагнитного момента M_{max} и пропорциональной ему максимальной электромагнитной мощности $P_{эм \text{ max}}$, если считать в них все величины, за исключением скольжения S , постоянными.

Для нахождения скольжения $s = s_m$ соответствующего максимуму $P_{эм}$ берем от (20) производную по s и приравниваем её нулю.

Откуда

$$s_m = \pm \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + X_1^2}}. \quad (22)$$

Здесь «плюс» соответствует режиму работы асинхронной машины в качестве двигателя, а знак «минус» – в качестве асинхронного генератора.

В нормальных асинхронных машинах R_1 значительно меньше X_k (R_1 составляет всего 10 - 12 % от X_k). Поэтому R_1^2 настолько меньше X_k^2 , что им можно без ущерба пренебречь. В этом случае

$$s_m \approx \frac{R_2}{X_k} = \frac{R_2}{X_1 + X_k}. \quad (23)$$

Подставляя полученное выражение для S_m в общее выражение для $P_{эм}$, находим максимальную электромагнитную мощность:

$$P_{эмmax} = \pm \frac{m_1 U_1^2}{2(\pm R_1 + \sqrt{X_1^2 + X_k^2})}. \quad (24)$$

Пренебрегая в (24) величиной R_1^2 по сравнению с X_k^2 , найдем приближенное выражение для максимальной электромагнитной мощности:

$$P_{эмmax} \approx \pm \frac{m_1 U_1^2}{2(\pm R_1 + X_k)}. \quad (25)$$

Для максимального электромагнитного момента соответственно находим:

$$M_{max} = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2 \cdot 2\pi f_1 (\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2})}. \quad (26)$$

Или приближенно

$$M_{max} \approx \pm \frac{pm_1 U_1^2}{4\pi f_1 (\pm R_1 + X_k)}. \quad (27)$$

Из записанных формул следует, что максимальный момент M_{max} :

1) при заданной частоте и заданных параметрах машины пропорционален квадрату напряжения U_1^2 ;

2) не зависит от активного сопротивления вторичного контура (ротора);

3) получается при тем большем скольжении, чем больше отношение R_2 / X_k , и, в частности, при тем большем скольжении, чем больше активное сопротивление вторичной цепи;

4) при заданной частоте почти обратно пропорционален сумме сопротивлений $(X_1 + X_2)$, т. е. тем меньше, чем больше индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной цепей.

Величина момента M_{max} имеет особенно важное значение при работе асинхронной машины в режиме двигателя. Часто максимальный момент двигателя называют опрокидывающим моментом двигателя.

Отношение

$$k_M = M_{\max} / M_n \quad (28)$$

называют коэффициентом перегрузочной способности асинхронного двигателя.

ЛЕКЦИЯ 20

Тема: Пуск и рабочие характеристики АД

Учебные вопросы:

Введение.

1. Основные характеристики пуска.
2. Прямой пуск.
3. Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при пониженном напряжении.
4. Рабочие характеристики двигателя.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь, 1983.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1987. - 832 с.

Введение.

При рассмотрении возможных способов пуска в ход асинхронных двигателей необходимо учитывать следующие основные положения:

1) двигатель должен развивать при пуске достаточно большой пусковой момент, который должен быть больше статического момента сопротивления на валу, чтобы ротор двигателя мог прийти во вращение и достичь номинальной скорости вращения;

2) величина пускового тока должна быть ограничена таким значением, чтобы не происходило повреждения двигателя и нарушения нормального режима работы сети;

3) схема пуска должна быть по возможности простой, а количество и стоимость пусковых устройств — малыми.

При пуске асинхронного двигателя на холостом ходу в активном сопротивлении его вторичной цепи выделяется тепловая энергия, равная ки-

нетической энергии приводимых во вращение маховых масс, а при пуске под нагрузкой количество выделяемой энергии соответственно увеличивается.

Выделение энергии в первичной цепи обычно несколько больше, чем во вторичной. При частых пусках, а также при весьма тяжелых условиях пуска, когда маховые массы приводимых в движение механизмов велики, возникает опасность перегрева обмоток двигателя.

Подробно динамика движения электропривода и энергетические соотношения при пуске рассматриваются в курсах электропривода.

Число пусков асинхронного двигателя в час, допустимое по условиям его нагрева, тем больше, чем меньше номинальная мощность двигателя и чем меньше соединенные с его валом маховые массы.

Двигатели мощностью 3 - 10 кВт в обычных условиях допускают до 5 - 10 включений в час.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором проще по устройству и обслуживанию, а также дешевле и надежнее в работе, чем двигатели с фазным ротором.

Поэтому всюду, где это возможно, применяются двигатели с короткозамкнутым ротором и подавляющее большинство находящихся в эксплуатации асинхронных двигателей являются двигателями с короткозамкнутым ротором.

1. Основные характеристики пуска.

Основными показателями, характеризующими пусковые свойства асинхронного двигателя, являются начальный пусковой момент M_n и начальный пусковой ток I_n .

Величины M_n и I_n определяются при $U = U_{ном}$ и скольжении $s = 1$. Часто они выражаются в долях соответствующих номинальных величин; $M_n / M_{ном} = k_{пм}$ и $I_n / I_{ном} = k_{пI}$

Для того чтобы ротор двигателя при пуске пришел во вращение, необходимо, чтобы момент M_n был больше нагрузочного момента сопротивления M_c .

При прочих равных условиях, чем больше будет разность $M_n - M_c$, тем быстрее развернется двигатель.

Обычно $M_n > M_{ном}$, а $k_{пм} > 1$. С увеличением M_n пусковые свойства двигателя улучшаются.

При скольжениях $s \approx 1$ в обмотке ротора асинхронного двигателя наводится большая ЭДС, вследствие чего ток I_n в несколько раз превышает свое номинальное значение, что может вызвать при пуске колебания напряжения в питающей сети.

Колебания напряжения в сети вредно отражаются на работе подключенных к ней потребителей (уменьшение накала ламп, снижение максимального момента двигателей и т. д.).

Поэтому чем меньше будет ток, тем лучше будут пусковые свойства двигателя.

Принимая скольжение $s = 1$, имеем

$$M_n = \frac{m_1 U_1^2 r_2'}{w_1 [(r_1 + c_1 r_2')^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2]}, \quad (1)$$

$$I_n \approx I_{2n}' = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + c_1 r_2')^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что улучшение пусковых свойств асинхронных двигателей, т. е. одновременное увеличение M_n и уменьшение I_n , можно получить только за счет увеличения активного сопротивления роторной цепи r_2' .

Однако сильное увеличение активного сопротивления ротора r_2' целесообразно только на период пуска, так как при работе повышенные значения r_2' вызывают возрастание потерь в обмотке ротора и снижение КПД двигателя.

Увеличение активного сопротивления ротора при пуске используется в асинхронных двигателях с фазным ротором и двигателях со специальными пазами на роторе.

Рассмотрим применяемые для трехфазных асинхронных двигателей способы пуска.

2. Прямой пуск.

Прямой пуск благодаря своей простоте является основным способом пуска короткозамкнутых трехфазных асинхронных двигателей.

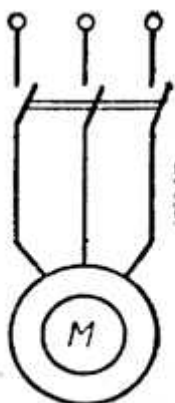


Рис. 1. Схема прямого пуска асинхронного короткозамкнутого двигателя

При прямом пуске обмотка статора непосредственно, без всяких пусковых устройств, подключается к сети (рис. 1).

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором обычно проектируют так, чтобы при прямом пуске $k_{nm} \approx 1,0 \div 1,3$ и $k_{nI} \approx 4 \div 7$.

Прямой пуск протекает быстро. Его продолжительность составляет доли секунды у двигателей небольшой мощности и несколько секунд у более мощных двигателей.

При пуске скорость ротора постепенно увеличивается, а его скольжение и ЭДС уменьшаются, вследствие чего происходит снижение токов в роторе и статоре.

Пуск закончится, когда скорость ротора и токи достигнут установившихся значений, определяемых нагрузочным статическим моментом на валу.

Обычно эти токи не превышают номинальных значений. Если пуски происходят редко, то, несмотря на большие начальные токи, обмотки не успевают нагреваться выше допустимых температур.

Крепления обмоток рассчитывают так, чтобы они могли выдерживать электродинамические усилия между проводниками, возникающие при пуске, следовательно, все асинхронные двигатели рассчитываются так, что они могут выдерживать прямой пуск.

Ограничение для применения прямого пуска обычно накладывает сеть. Если в сети от пусковых токов включаемого двигателя возникают большие падения напряжения, превышающие 10 — 15 %, то этот двигатель прямым пуском в данную сеть включать не рекомендуется.

Необходимо принять меры, уменьшающие пусковой ток. При частых включениях двигателя, исходя из допустимого нагрева обмоток статора, число прямых пусков в час ограничивается. Допустимое число включений двигателей в час определяется в курсе электропривода.

3. Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при пониженном напряжении.

В тех случаях, когда из-за большого падения напряжения в сети прямой пуск для короткозамкнутых двигателей недопустим, применяют подключение их обмоток статора в первый момент пуска па пониженное напряжение, при этом пусковой ток уменьшается, что приводит к снижению падения напряжения в сети.

Недостатком такого способа пуска является снижение начального пускового момента пропорционально квадрату напряжения.

Поэтому этот способ пуска применяется в тех случаях, когда отсутствует нагрузочный момент на валу или когда этот момент невелик.

Для снижения подводимого к статору двигателя напряжения используются следующие схемы:

- пуск через реактор (рис. 2);
- пуск через автотрансформатор (рис. 3);
- переключение со звезды на треугольник (рис. 4).

Пуск через реактор производится при включении выключателя Q_1 и выключенном Q_2 . Из-за падения напряжения в реакторе LR напряжение на выводах обмотки статора уменьшится до значения U_1 .

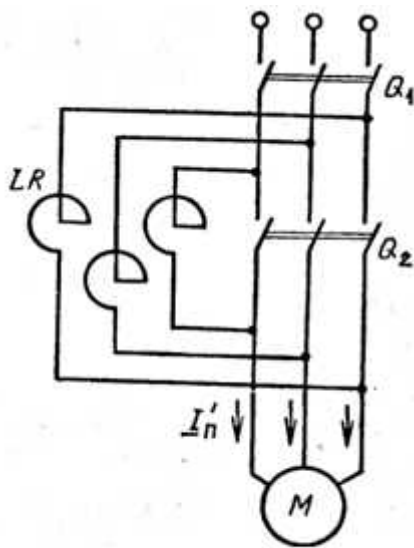


Рис. 2. Пуск асинхронного двигателя через реактор

Если принять, что сопротивление Z_k двигателя остается постоянным, то пропорционально уменьшится и начальный пусковой ток

$$I'_n : I_n = I_{n,ном} \frac{U_1}{U_{1ном}}, \quad (3)$$

где $I_{n,ном}$ - начальный пусковой ток при номинальном напряжении $U_{1ном}$ на выводах статора (при прямом пуске).

Начальный пусковой момент при этом будет равен

$$M_n = M_{n,ном} (U_1 / U_{1ном})^2,$$

где $M_{n,ном}$ - начальный пусковой момент при напряжении $U_{1ном}$.

Когда ток спадет, включают выключатель Q_2 , которым закорачивается реактор LR . С этого момента к обмотке статора подводится полное напряжение сети, при котором будет протекать дальнейшая работа двигателя.

Напряжение U_1 выбирают обычно равным $0,65 U_{1ном}$.

Пуск через автотрансформатор осуществляется следующим образом.

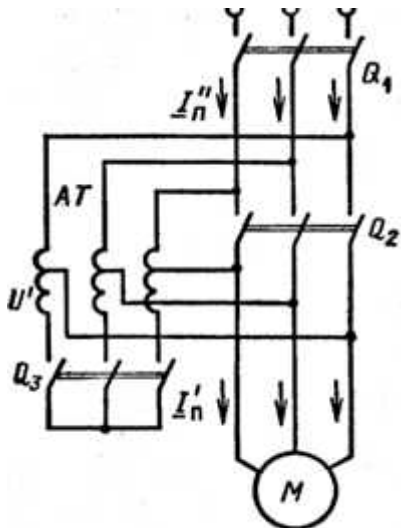


Рис. 3. Пуск асинхронного двигателя через автотрансформатор

При замкнутом выключателе Q_3 (рис. 3) включают выключатель Q_1 . При этом обмотки статора двигателя оказываются подключенными на напряжение U' понижающего автотрансформатора АТ.

Ток во вторичной обмотке автотрансформатора и обмотке статора двигателя при $Z_k = const$ определяется по (3). Вращающий момент, развиваемый двигателем в первый момент пуска,

$$M_n = M_{n,ном} (U'_1 / U_{1ном})^2.$$

Ток в первичной обмотке автотрансформатора, а, следовательно, и ток I''_n , поступающий в двигатель из сети, будут меньше I'_n в

число раз, равное отношению напряжений

$$U'_1 / U_{1ном}, \text{ т. е. } I''_n = I'_n (U'_1 / U_{1ном}) = I_{n,ном} (U'_1 / U_{1ном})^2, \quad (4)$$

откуда следует, что для одного и того же снижения напряжения на выводах двигателя при автотрансформаторном пуске уменьшение тока, потребляемого из сети, происходит более резко, чем при пуске через реактор.

Это является достоинством пуска через автотрансформатор, однако эта схема дороже схемы пуска через реактор.

По окончании пуска выключатель Q_3 размыкается, а выключатель Q_2 замыкается, и двигатель оказывается включенным на напряжение сети.

Выключатель Q_3 отключается во избежание перегорания обмотки автотрансформатора, так как при замыкании Q_2 часть обмоток автотрансформатора закорачивается и полное напряжение сети окажется приложенным только на оставшиеся небольшие части обмоток, вследствие чего резко увеличится намагничивающий ток.

С помощью автотрансформатора напряжение U_1 понижается до $(0,55 - 0,73)U_{1ном}$.

Пуск переключением со звезды на треугольник (рис. 4) применяется в том случае, если данному напряжению сети соответствует схема соединения обмотки статора треугольник.

Тогда, если при пуске этого двигателя обмотку статора пересоединить в звезду и включить ее в ту же сеть, напряжение на фазу снизится в $\sqrt{3}$ раз.

Начальный пусковой ток в этом случае будет равен:

$$I_{nY} = U_{1ном} / \sqrt{3}Z_k,$$

где $U_{1ном}$ - линейное номинальное напряжение; Z_k - сопротивление фазы двигателя.

После того как двигатель разгонится, обмотку статора переключателем S включают в треугольник. При этой схеме будет происходить работа двигателя.

При прямом пуске (обмотка статора соединена в треугольник) начальный линейный пусковой ток был бы равен $I_{n\Delta} = \sqrt{3}U_{1ном} / Z_k$.

Таким образом, применением переключения со звезды на треугольник удастся снизить начальный пусковой ток в 3 раза:

$$I_{n\Delta} / I_{nY} = 3, \quad (5)$$

при этом начальный пусковой момент снижается пропорционально квадрату отношения фазных напряжений, т. е. также в 3 раза.

Этот способ пуска иногда применяется при пуске низковольтных двигателей большой мощности.

Вычисленные по (3) - (5) уменьшения пусковых токов и моментов получены в предположении, что $Z_k = \text{const}$. В действительности с ростом тока из-за насыщения стали зубцов от потоков рассеяния индуктивные сопротивления рассеяния статора и ротора уменьшаются и $Z_k \neq \text{const}$.

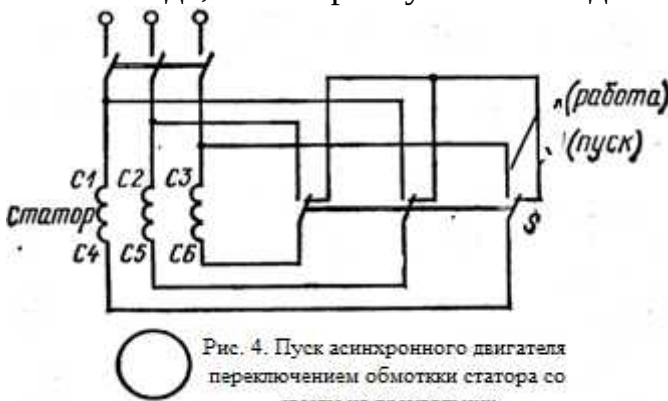


Рис. 4. Пуск асинхронного двигателя переключением обмотки статора со звезды на треугольник

С учетом этого изменение тока при снижении напряжения будет происходить несколько сильнее.

4. Рабочие характеристики двигателя

При изменении нагрузки двигателя происходит изменение как потребляемых из сети тока I_1 и мощности P_1 , так и угловой скорости ω (или скольжения s), КПД η и $\cos \varphi_1$.

Нагрузкой для двигателя служит нагрузочный момент M_2 , приложенный к его валу. При увеличении нагрузочного момента соответственно увеличивается электромагнитный момент, создаваемый двигателем:

$$M = M_2 + M_0 = c_M \Phi I_2 \cos \Psi_2;$$

здесь M_0 - момент, обусловленный механическими и добавочными потерями.

Момент M_0 слабо зависит от нагрузки. Он относительно мал и можно принять, что $M \approx M_2$.

От момента M_2 зависит механическая мощность P_2 , снимаемая с вала двигателя:

$$P_2 = M_2 \omega. \quad (6)$$

Зависимости ω , M_2 , I_1 , $\cos \varphi_1$, η , $P_1 = f(P_2)$ называются рабочими характеристиками двигателя.

Примерный их вид показан на рис. 5.

При холостом ходе, когда $P_2 = 0$ и $M_2 = 0$, ток I_1 будет равен току холостого хода I_0 . Как и у трансформатора, этот ток является в основном намагничивающим и создает основное магнитное поле.

Однако из-за наличия воздушного зазора между статором и ротором относительное значение его больше, чем у трансформатора, и составляет 25 - 50 % номинального тока статора.

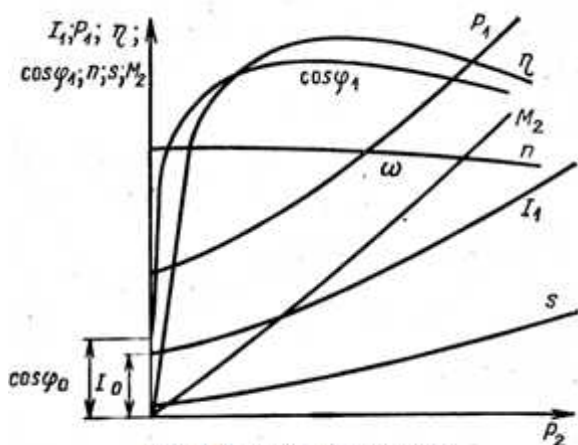


Рис. 5. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Мощность P_1 потребляемая двигателем из сети при холостом ходе, расходуется на потери внутри машины:

- механические потери $P_{мх}$,
- магнитные потери в статоре P_m ,
- электрические потери в обмотке статора от тока I_0 .

При увеличении момента M ток ротора I_2 должен увеличиваться. Возрастание тока I_2 происходит за счет увеличения индуцируемой в обмотке ротора ЭДС $E_{2s} = E_2 s$ вследствие снижения угловой скорости ω (увеличение s).

Поэтому зависимость $w = f(P_2)$ имеет падающий характер. Однако у большинства асинхронных двигателей изменение частоты вращения при нагрузке незначительно, и характеристика $w = f(P_2)$ является достаточно жесткой.

Скольжение s с ростом P_2 будет возрастать. При холостом ходе из-за наличия механических потерь (момент M_0) ток $I_2 \neq 0$, следовательно, $w \neq w_1$ и $s \neq 0$.

Исходя из (6), при $w = \text{const}$ зависимость $M_2 = f(P_2)$ представляла бы прямую, идущую из начала координат.

Так как фактически у асинхронного двигателя $w \neq \text{const}$, то реальная характеристика $M_2 = f(P_2)$ несколько отличается от линейной.

При увеличении I_2 будет возрастать ток статора I_1 . При малых нагрузках скольжение, а, следовательно, и индуктивное сопротивление ротора $x_{2s} = x_2 s$ малы и ток ротора будет, практически активным ($\Psi_2 \approx 0$) вследствие чего угол сдвига $\varphi_{1(1)}$ между током I_1 и напряжением U_1 будет уменьшаться с ростом нагрузки и $\cos \varphi_1$ увеличиваться по сравнению с $\cos \varphi_{1(0)}$.

При больших нагрузках скольжение и частота индуцируемой ЭДС в роторе возрастают, что приводит к увеличению индуктивного сопротивления обмотки ротора.

Вследствие этого реактивная составляющая тока ротора и соответственно тока статора увеличиваются, а $\cos \varphi_{1(2)}$ начинает уменьшаться.

Подводимая мощность изменяется пропорционально произведению $I_1 \cos \varphi_1$.

Зависимость $\eta = f(P_2)$ достигает максимального значения при нагрузке, когда постоянные и переменные потери в двигателе будут равны.

Рабочие характеристики могут быть получены экспериментально и рассчитаны с помощью схемы замещения.

ЛЕКЦИЯ 21

Тема: Регулирование частоты вращения АД

Учебные вопросы:

Введение.

1. Регулирование угловой скорости изменением частоты f_1 .
2. Регулирование угловой скорости изменением числа пар полюсов.
3. Регулирование угловой скорости изменением подводимого напряжения.
4. Регулирование угловой скорости включением в цепь ротора добавочного резистора.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь, 1983.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1987. - 832 с.

Введение.

Синхронная скорость вращения определяется из соотношения

$$n_1 = f_1 / p. \quad (1)$$

Если частота f_1 задана, то при изменении p изменяется синхронная скорость n_1 и, следовательно, скорость вращения двигателя n .

Но при этом регулирование скорости производится не плавно, а ступенями. Часто оно производится в две ступени с соотношением скоростей 2:1.

Такие двигатели называются двухскоростными. В настоящее время заводами изготавливаются двух-, трех- и четырехскоростные двигатели.

Переключения числа пар полюсов на статоре можно достигнуть следующим образом:

- 1) уложить на статор одну обмотку и изменять число пар полюсов путем соответствующего переключения ее частей;
- 2) выполнить на статоре две независимые друг от друга обмотки;
- 3) выполнить на статоре две независимые обмотки — каждую с переключением полюсов.

Также возможные способы регулирования угловой скорости в асинхронных двигателях вытекают из формулы

$$\omega = \omega_1(1 - s). \quad (2)$$

Согласно (2) скорость ротора двигателя можно регулировать изменением угловой скорости магнитного поля ω_1 или скольжения s .

Скорость магнитного поля ω_1 зависит от частоты питающего напряжения f_1 и числа пар полюсов p .

Изменение скольжения может быть получено за счет изменения электрических потерь в цепи ротора (регулированием подводимого напряжения или включением в цепь ротора добавочного резистора) или введения добавочной ЭДС в эту цепь.

Все указанные способы регулирования скорости находят практическое применение. Рассмотрим их подробнее.

Оценку каждого из способов будем производить по следующим показателям:

- 1) возможному диапазону регулирования;
- 2) плавности регулирования;
- 3) изменению КПД привода при регулировании.

1. Регулирование угловой скорости изменением частоты f_1 .

Из всех возможных способов регулирования этот способ позволяет плавно изменять угловую скорость в наиболее широком диапазоне (до 10:1, а иногда и более).

Для его осуществления требуется, чтобы двигатель (или группа двигателей) получал питание от отдельного источника (рис. 1).

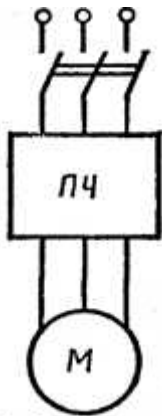


Рис. 1. Схема регулирования угловой скорости изменением частоты (ПЧ - преобразователь частоты)

В качестве такого источника могут быть использованы электромеханические или статические преобразователи частоты. В связи с развитием полупроводниковой техники в настоящее время наиболее предпочтительными являются полупроводниковые статические преобразователи.

В зависимости от требований к механическим характеристикам асинхронного двигателя при частотном регулировании одновременно с изменением частоты f_1 приходится по определенному закону изменять и подводимое к обмотке статора напряжение U_1 .

Максимальный момент двигателя приближенно (пренебрегая сопротивлением r_1) определяется по формуле

$$M_{\max} \approx \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1(x_1 + x_2')}.$$

Учитывая, что $\mu_1 = 2\pi f_1 / p$ и $x_1 = 2\pi f_1 L_1$, $x_2' = 2\pi f_1 L_2'$ получаем

$$M_{\max} = k_1 \frac{U_1^2}{f_1^2},$$

где k_1 - постоянный коэффициент.

Отношение моментов $M_{\max}$ при двух значениях частоты f_1 будет равно

$$\frac{M_{\max(1)}}{M_{\max(2)}} = \left(\frac{U_{1(1)} f_{1(2)}}{U_{1(2)} f_{1(1)}} \right)^2, \quad (3)$$

где индексы (1) и (2) относятся к различным угловым скоростям.

Исходя из (3), можно получить в общем виде закон изменения (U_1 при регулировании частоты f_1):

$$\frac{U_{1(2)}}{U_{1(1)}} = \frac{f_{1(2)}}{f_{1(1)}} \sqrt{\frac{M_{\max(2)}}{M_{\max(1)}}}. \quad (4)$$

Если при регулировании частоты вращения требуется, чтобы $M_{\max}$ на механических характеристиках при любой частоте оставался неизменным (регулирование с постоянным моментом), то из (4) получим

$$\begin{aligned} U_{1(2)} / U_{1(1)} &= f_{1(2)} / f_{1(1)} = \text{const}, \\ U_{1(1)} / f_{1(1)} &= U_{1(2)} / f_{1(2)} = \text{const}. \end{aligned} \quad (5)$$

Откуда следует, что для осуществления регулирования с постоянным моментом необходимо подводимое к обмотке статора напряжение изменять пропорционально его частоте.

Отметим, что при осуществлении закона регулирования (5) основной магнитный поток машины при различных значениях частоты f_1 практически остается неизменным, т.е.

$$\Phi \approx \frac{1}{4,44 w_1 k_{w1}} \frac{U_1}{f_1} \text{const}.$$

Механические характеристики двигателя при регулировании с $M_{\max} = \text{const}$ даны на рис. 2, а.

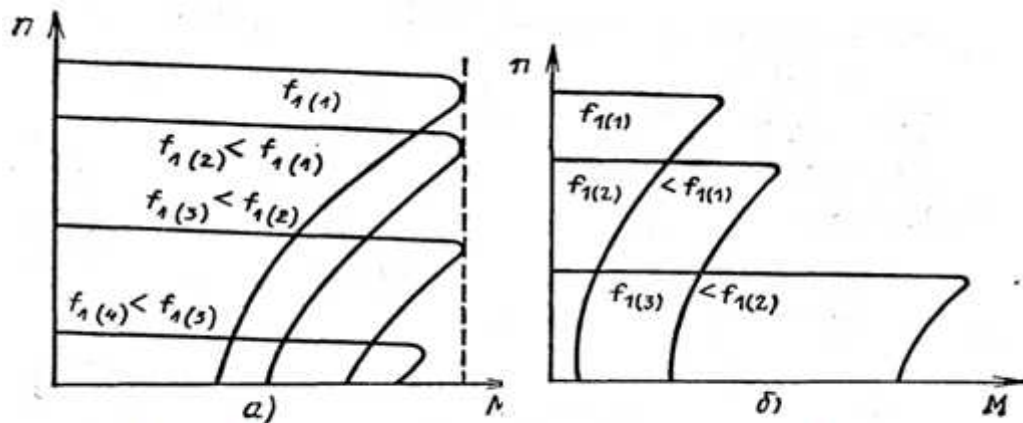


Рис. 2. Механические характеристики асинхронного двигателя при различных значениях частоты и $M = \text{const}$; $P = \text{const}$

Если регулирование происходит с постоянной механической мощностью P_2 , то момент $M_{\max}$ должен изменяться обратно пропорционально частоте вращения, а следовательно, и f_1 :

$$\begin{aligned} M_{\max(2)} \mu_{(2)} / (M_{\max(1)} \mu_{(1)}) &= \text{const}; \\ M_{\max(2)} / M_{\max(1)} &= \mu_{(1)} / \mu_{(2)} = f_{1(1)} / f_{1(2)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставляя (6) в (4), получаем закон изменения напряжения при регулировании с постоянной мощностью

$$U_{1(2)} / U_{1(1)} = \sqrt{f_{1(2)} / f_{1(1)}}. \quad (7)$$

Механические характеристики для этого случая показаны на рис. 2, б.

Соотношения (5) и (7) являются приближенными, так как не учитывают влияния сопротивления r_1 на $M_{\max}$, что наиболее сильно проявляется при малых частотах f_1 .

Поэтому при $U_1 / f_1 = \text{const}$ максимальный момент $M_{\max}$ в зоне малых частот будет уменьшаться (рис. 2, а).

При частотном регулировании асинхронных двигателей их энергетические характеристики остаются практически неизменными. Поэтому этот способ регулирования является экономичным.

Недостатками частотного регулирования являются громоздкость и высокая стоимость источника питания.

2. Регулирование угловой скорости изменением числа пар полюсов

Угловая скорость магнитного поля в асинхронном двигателе, а, следовательно, и угловая скорость ротора обратно пропорциональна числу пар полюсов.

Изменяя число пар полюсов, можно регулировать скорость. Число пар полюсов зависит от шага и схемы соединения обмотки статора.

Для регулирования угловой скорости на статоре в общих пазах можно разместить не одну, а две обмотки, имеющие различные шаги, а, следовательно, и различное число пар полюсов.

В зависимости от необходимой скорости в сеть подключается та или иная обмотка. Этот способ применяется сравнительно редко, так как он имеет существенный недостаток — плохое использование обмоточного провода (всегда работает только одна из обмоток).

Более часто изменение числа пар полюсов достигается изменением (переключением) схемы соединения уложенной на статоре обмотки.

Принцип такого переключения поясняется на рис. 3. При переходе с последовательного соединения двух катушек (рис. 3, а) на параллельное соединение (рис. 3, б) число пар полюсов изменяется с 2 на 1.

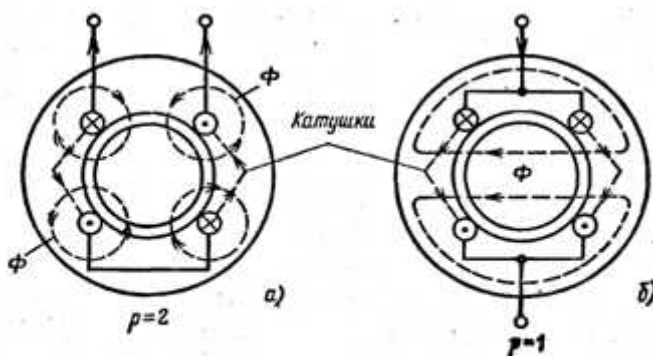


Рис. 3. Схемы включения обмотки статора на различное число полюсов

При наличии фазной обмотки на роторе ее также следует переключать одновременно с обмоткой статора. Поэтому обмотку ротора у таких двигателей выполняют короткозамкнутой.

Асинхронные двигатели с переключением числа пар полюсов называют многоскоростными. Они выпускаются на две, три и четыре угловые скорости.

3. Регулирование угловой скорости изменением подводимого напряжения

Для регулирования угловой скорости асинхронного двигателя подводимое напряжение к обмотке статора по сравнению с номинальным уменьшается.

Так как момент пропорционален U_1^2 , то механические характеристики при меньшем напряжении пойдут ниже естественной.

Если момент нагрузки M_c остается постоянным, то, как это следует из рис. 4, при снижении напряжения скольжение будет увеличиваться. Скорость при этом уменьшается.

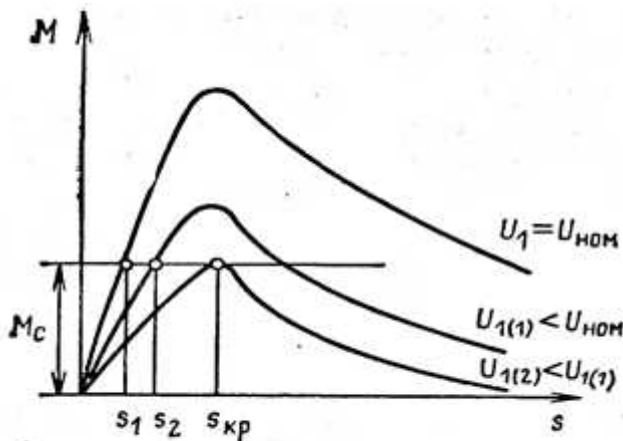


Рис. 4. Характеристики $M = f(s)$ при различных значениях напряжения

Регулирование скольжения в этом случае возможно в пределах $0 < s < s_{кр}$. Ограничением для увеличения скольжения более $s_{кр}$ является то, что при дальнейшем снижении напряжения на новой механической характеристике M_{max} будет меньше M_c и двигатель остановится.

Для расширения диапазона регулирования следует увеличить $s_{кр}$ за счет повышения активного сопротивления цепи ротора.

5. Регулирование угловой скорости включением в цепь ротора добавочного резистора

Этот способ регулирования применяется в двигателях с фазным ротором. На рис. 5 показаны механические характеристики двигателя с различными значениями добавочного активного сопротивления Δr_2 в цепи ротора.

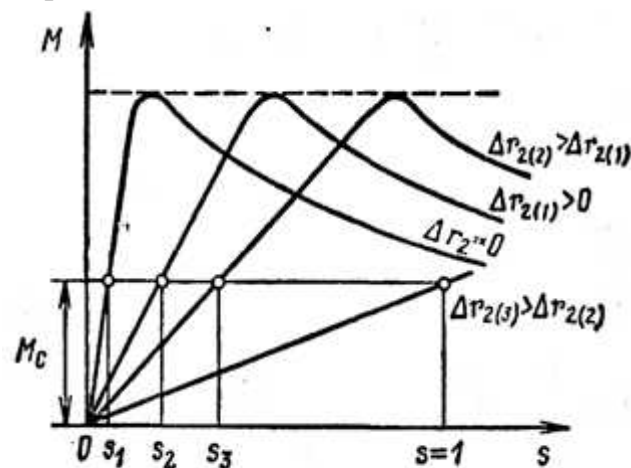


Рис. 5. Характеристики $M = f(s)$ при различных значениях активного сопротивления ротора

При $M_c = \text{const}$ в зависимости от значения Δr_2 двигатель будет работать со скольжениями $s_1 \div s_3$, чему соответствуют угловые скорости $\mu_{(1)} \div \mu_{(3)}$.

Этот способ позволяет плавно, в широких пределах (до $s = 1$), регулировать угловую скорость.

Однако практически он применяется для регулирования скорости в сравнительно узких пределах, так как при увеличении

Δr_2 возрастают электрические потери в цепи ротора, при этом происходит также снижение КПД.

В этом случае, как и в предыдущем, электрические потери в цепи ротора увеличиваются пропорционально скольжению ($P_{\text{р2}} = P_{12}s$).

Однако в отличие от предыдущего способа здесь токи ротора и статора в процессе регулирования при $M_c = \text{const}$ практически остаются неизменными, и возрастание потерь происходит не в самом роторе, а в регулировочном реостате.

С точки зрения нагрева двигателя этот способ регулирования является более благоприятным.

ЛЕКЦИЯ 22

Тема: Переходные процессы в АД

Учебные вопросы:

Введение.

1. Включение асинхронной машины на сеть.
2. Отключение асинхронной машины от сети.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь, 1983.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1987. - 832 с.

Введение.

Переходные процессы имеют место при изменении:

- нагрузки на валу,
- напряжения,
- частоты сети,
- направления вращения,
- при включении и отключении машины от сети,
- при изменении параметров асинхронной машины.

Переходные процессы описываются дифференциальными уравнениями асинхронной машины.

Установившиеся процессы являются частным случаем переходных процессов.

Во многих устройствах асинхронные машины непрерывно работают в переходных режимах, и умение проектировать их с учетом переходных процессов определяет их массу и другие технико-экономические показатели.

К таким устройствам относятся приводы с ударной нагрузкой (дробилки, электрохолодильники и т.п.), крановые приводы и т.д.

Наиболее важными переходными процессами являются процессы пуска в ход, торможения, реверса, повторного включения и изменения нагрузки на валу.

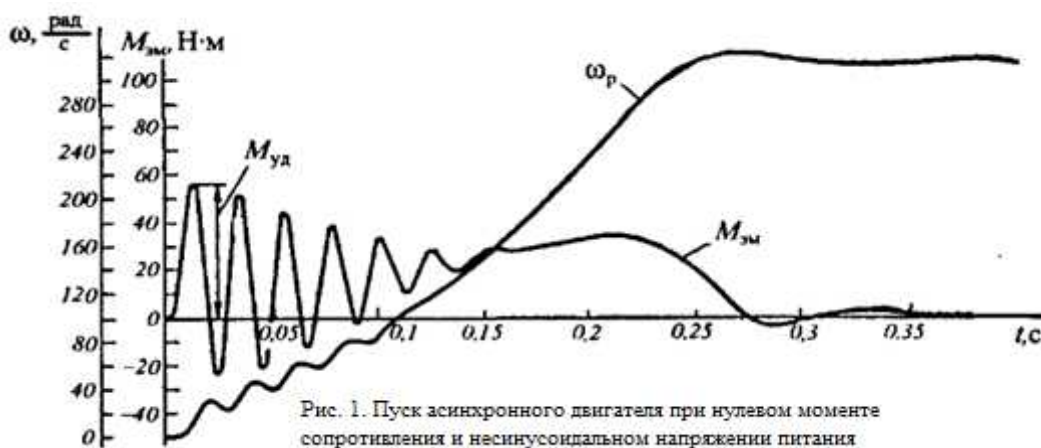
Исследовать эти процессы можно экспериментально, либо необходимо на ЭВМ решить уравнения, описывающие работу машины при тех или иных значениях параметров питающего напряжения и частоты.

Точный анализ переходных процессов, возникающих в цепях статора и ротора, представляет значительные трудности и требует применения специально разработанных математических методов или использования вычислительных электронных устройств.

Поэтому будет дан приближенный анализ некоторых переходных процессов, основанный на чисто физическом рассмотрении электромагнитных явлений, возникающих в цепях статора и ротора асинхронной машины.

1. Включение асинхронной машины на сеть.

На рис. 1 и 2 приведены осциллограммы пуска асинхронного двигателя ($P_2 = 3$ кВт, $n_c = 1500$ об/мин). Осциллограммы получены при моделировании уравнений, описывающих работу АД на ЭВМ.



Как видно из рисунков, в начале переходного процесса броски токов максимальны.

В первый полупериод наступает максимальный бросок моментов – так называемый ударный момент $M_{уд}$.

На колебания токов и момента отвечает и частота вращения ротора. В конце переходного процесса колебания токов и момента затухают, а частота ротора и электромагнитный момент плавно достигают установившихся значений.

Переходные процессы во вращающихся электрических машинах определяются электромагнитными процессами, связанными с созданием полей в машине, и механическими процессами обусловленными изменением частоты вращения ротора.

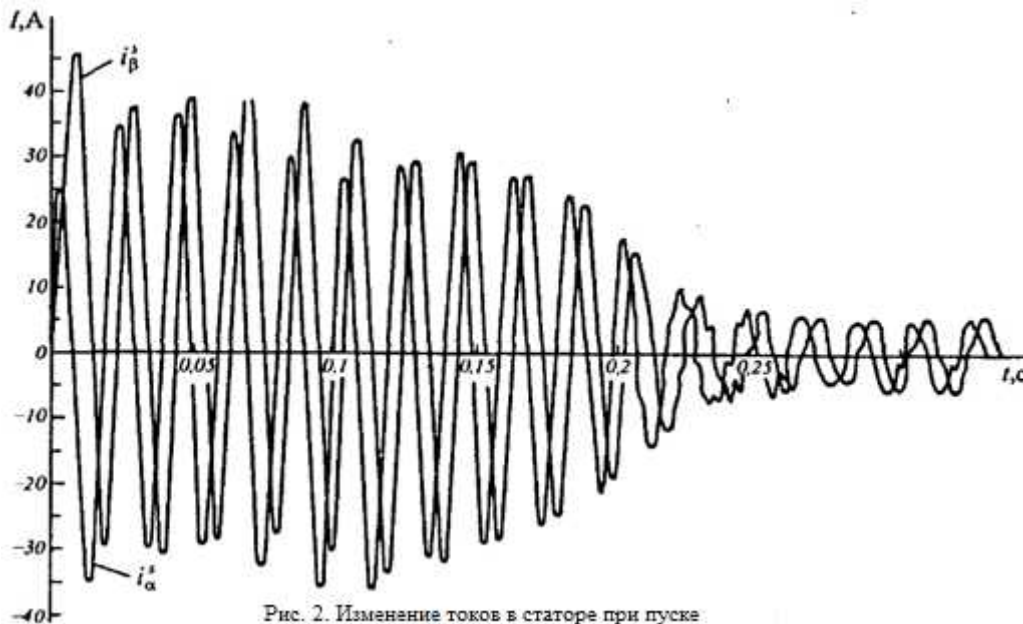


Рис. 2. Изменение токов в статоре при пуске

Длительность электромагнитных процессов определяется электромагнитной постоянной времени $T_{эм}$.

Электромеханические процессы определяются в основном моментом инерции ротора и характеризуются электромеханической постоянной времени T_m .

Переходные процессы в асинхронном двигателе можно разделить на три стадии.

В первой, начальной стадии, продолжающейся несколько периодов, в пределах T_m из сети забирается в основном активная мощность, которая идет на создание магнитного поля машины и разгон ротора — запасание кинетической энергии во вращающихся частях и совершение механической работы.

Эта стадия характеризуется большими пиками токов и момента и значительными ускорениями ротора (см. рис. 1 и 2).

Во второй стадии, когда процессы, определяемые $T_{эм}$, установились, а разбег ротора еще продолжается, энергия, потребляемая из сети, расходуется на увеличение кинетической энергии и совершение механической работы.

В этой стадии машина обменивается мощностью с сетью и соотношение между активной и реактивной мощностями все более стабилизируется, подходя к значениям установившегося режима. Амплитуды токов и момента затухают.

В конечной, третьей стадии переходного процесса, когда ротор достигает установившейся частоты вращения, броски токов и моментов уменьшаются и машина входит в установившийся режим.

В асинхронных машинах традиционной конструкции $T_{эм}$ на порядок меньше T_m и в первом приближении можно рассматривать переходные процессы без учета электромагнитных процессов.

На характер протекания переходных процессов при пуске основное влияние оказывают момент инерции и активное сопротивление обмотки ротора.

Двигатели небольшой мощности с малым моментом инерции разгоняются до установившейся скорости за несколько периодов, но ротор может выйти за синхронную частоту вращения и после качания у синхронной скорости перейти в установившийся режим.

Двигатели большой мощности разгоняются медленно, и ротор подходит к установившейся частоте вращения без перерегулирования.

Как показывают исследования, процессы при пуске определяются начальными значениями параметров при $S = 1$. Характер нелинейного изменения параметров в процессе разгона имеет второстепенное значение.

Из-за насыщения индуктивные параметры отличаются от их значений при установившихся режимах. Индуктивности и взаимные индуктивности при пуске на 30 - 40 % меньше их установившихся значений.

Параметры машины в начальный момент времени переходного процесса называются переходными параметрами.

Определить переходные параметры асинхронных машин можно с помощью ЭВМ, если известны результаты переходного процесса при пуске.

Расчетные методики для определения переходных параметров асинхронных машин разработаны еще недостаточно, так как переходными процессами в асинхронных машинах глубоко начали заниматься с появлением ЭВМ.

При пуске асинхронных двигателей для увеличения пускового момента необходимо увеличивать r_2 , а при номинальном режиме для увеличения КПД и $\cos \varphi$ надо r_2' иметь меньше, чтобы $s_{ном}$ было равно 1 - 4 %.

Для тяжелых условий пуска в приводах от нескольких киловатт до сотен киловатт применяются двигатели с фазным ротором. В этих двигателях фазная обмотка выводится на кольца, к которым при пуске подключается резистор.

По мере разгона двигателя сопротивление резистора постепенно уменьшается, а затем резистор выводится и кольца закорачиваются.

Пусковые резисторы выполняют проволочными, литыми чугунными и жидкостными. Резисторы помещают в бак с трансформаторным маслом и рассчитывают на кратковременный режим работы.

Жидкостный резистор представляет собой сосуд с электролитом, в который опущены электроды. При изменении глубины погружения электродов изменяется сопротивление резистора.

На рис. 3 показан процесс пуска двигателя с фазным ротором. Двигатель пускается с полностью введенным резистором и работает на механической характеристике 1.

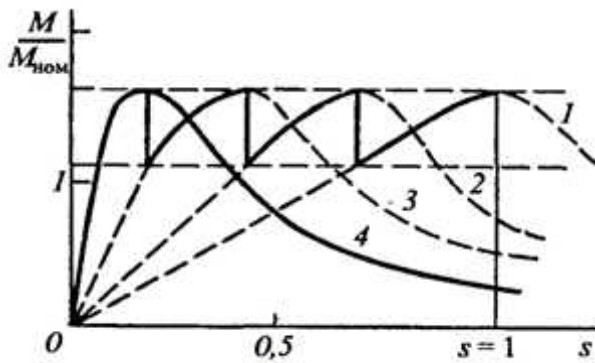


Рис. 3. Пуск в ход двигателя с фазным ротором

При этом $M_n \approx M_{\max}$. После того как двигатель подойдет к скольжению $s \approx 0,5 \div 0,6$, переключается резистор и закорачивается часть его сопротивления. Двигатель переходит на характеристику 2.

Затем при $s \approx 0,3 \div 0,4$ переключается вторая ступень и двигатель начинает работать на характеристике 3.

После того как будет закорочена третья ступень при $s \approx 0,1 \div 0,2$ двигатель переходит на естественную механическую характеристику 4.

После окончания пуска щетки закорачиваются, а пусковой резистор приводится в исходное положение.

Двигатели с фазным ротором дороже двигателей с короткозамкнутой обмоткой и требуют дополнительной пускорегулирующей аппаратуры.

Рассчитывая асинхронный двигатель, необходимо стремиться к увеличению пускового момента, оставляя кратность пускового тока не более $k_i = 5 \div 7$.

Увеличение токов в переходных режимах приводит к увеличению ударных моментов, а также к увеличению падения напряжения в сети, что неблагоприятно сказывается на пусковых характеристиках, так как момент пропорционален квадрату напряжения.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором пускают обычно прямым включением на номинальное напряжение. Процесс пуска определяется механическими характеристиками двигателя и нагрузки.

Чтобы двигатель мог разгоняться до номинальной частоты вращения, необходимо, чтобы M_n был больше M_c при $S = 1$ и механические характеристики двигателя и нагрузки пересекались в одной точке вблизи $S_{\text{ном}}$.

Если из-за провалов в кривой $M = f(s)$ она может пересекаться с кривой $M_c = f(s)$ вблизи скольжений $S = 1$, то двигатель «застрянет» в этой точке и из-за больших потерь в роторе не сможет длительно работать

в таком режиме. В этом случае необходимо выбрать двигатель большей мощности.

Уравнение движения ротора двигателя

$$M_c + M_{эм} = j \frac{d\mu_p}{dt}. \quad (1)$$

Процесс разгона двигателя продолжается до тех пор, пока электромагнитный момент и момент сопротивления не окажутся равными по модулю.

Для определения времени пуска в первом приближении можно проинтегрировать уравнение движения (1):

$$t_n = \int_0^{\mu_{p.ном}} \frac{j d\mu_p}{M_{эм} + M_c}. \quad (2)$$

При небольших различиях $M_{эм}$ и M_c процесс пуска затягивается, что приводит к увеличению потерь в роторе, а это может вызвать недопустимое увеличение температуры обмоток. В некоторых случаях для крупных двигателей ограничивается число включений двигателя в 1 ч.

При пуске крупных асинхронных двигателей для ограничения пусковых токов включается реактор или автотрансформатор.

При особо трудных условиях пуска двигателей в несколько десятков тысяч киловатт применяют частотный пуск, когда с помощью преобразователя частоты постепенно повышается частота подводимого к статору напряжения.

Одним из тяжелых переходных режимов является режим реверса, когда при переключении порядка следования фаз на выводах машины происходит изменение направления вращения ротора.

При реверсе двигатель сначала отключается от сети, а затем включается на напряжение обратной последовательности. Переходный процесс определяется временем коммутации и в сильной степени — скоростью затухания магнитного поля в воздушном зазоре.

Чем меньше время коммутации, тем больше ударные токи и моменты, тем тяжелее протекают переходные процессы.

При повторном включении асинхронного двигателя в сеть при наличии еще незатухшего поля в зазоре также наблюдаются большие ударные токи и моменты.

Процесс повторного включения имеет место при кратковременных перерывах питания, а также в тяговых асинхронных двигателях при нарушении скользящего контакта в сети.

При перерыве питания на несколько секунд большинство асинхронных двигателей успевают остановиться. При восстановлении напряжения начнется самозапуск асинхронных двигателей. Процесс этот является трудным и для двигателей, и для сети, так как требуются большая реактив-

ная мощность для создания полей в двигателях и активная мощность для запуска двигателей.

При этом часть двигателей может не запуститься, а часть из-за затяжного пуска может перегреться.

При длительном перерыве питания (в несколько секунд или минут) необходимо двигатели отключать от сети и только ответственные электроприводы оставлять подключенными к сети.

2. Отключение асинхронной машины от сети.

При отключении асинхронной машины от сети возникает переходный процесс, обусловленный исчезновением энергии магнитного поля машины.

При быстром отключении от сети машины с разомкнутым ротором энергия магнитного поля освобождается в форме дуги отключения и может вызвать значительные перенапряжения в обмотке статора вследствие быстрого исчезновения поля.

Если роторная обмотка не разомкнута, то при отключении обмотки статора от сети магнитный поток исчезает не сразу, так как оно поддерживается токами, возникающими в обмотке ротора.

Скорость затухания поля зависит от постоянных цепи ротора.

Магнитный поток в воздушном зазоре машины после отключения от сети равен

$$\Phi e^{-\gamma_2 t}, \quad (3)$$

где $\gamma_2 = \frac{r_2}{L_{22}}$; Φ - поток в воздушном зазоре в момент отключения машины.

Токи, проходящие в обмотке ротора после отключения машины от сети, являются затухающими апериодическими токами, поэтому создаваемая ими н.с. по отношению к обмотке ротора не перемещается.

Намагничивающая сила ротора создает поле, вращающееся в пространстве вместе с ротором. Угловая скорость ротора и поля после отключения машины от сети постепенно уменьшается от значений ω_2 до нуля.

При нормальной работе машины магнитный поток, сцепленный с фазой обмотки статора, равен

$$\Phi = \Phi e^{j\mu t}. \quad (4)$$

Этот поток наводит в обмотке статора ЭДС

$$E_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt} = -jw_1 \Phi e^{j\mu_1 t}. \quad (5)$$

Если пренебречь начальным скольжением ротора, то можно считать, что магнитный поток Φ в первые моменты после отключения наводит в обмотке статора ЭДС с частотой ω_1 .

При этом допущении магнитный поток, сцепленный с фазой обмотки статора, будет равен

$$E'_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = -w_1(j\mu_1 - \frac{r_2}{L_{22}})\Phi e^{(j\mu_1 - \frac{r_2}{L_{22}})t}.$$

Поэтому

$$\frac{E'_1}{E_1} = (1 + j\frac{r_2}{\mu_1 L_{22}})e^{j\mu_1 t}.$$

Наиболее характерным является значение модуля этого отношения в момент отключения ($t=0$):

$$\left(\frac{E'_1}{E_1}\right)_{t=0} = \sqrt{1 + \left(\frac{r_2}{\mu_1 L_{22}}\right)^2}. \quad (6)$$

Из этого равенства следует, что при внезапном (быстром) отключении от сети в обмотке статора возникает значительное повышение напряжения в том случае, когда активное сопротивление цепи ротора r_2 относительно велико.

Это объясняется тем, что поток $\Phi e^{-\frac{r_2}{L_{22}}t}$ затухает при больших значениях r_2 быстро и наводит в обмотках большие ЭДС.

Согласно опытным данным при отключении асинхронной машины с разомкнутым ротором перенапряжения достигают 3-4-кратного значения номинального напряжения U_1 .

Эти перенапряжения получаются большими, чем при отклонении от сети трансформатора той же мощности с разомкнутой вторичной обмоткой, так как асинхронная машина, имеющая магнитную систему с воздушным зазором, обладает большей магнитной энергией.

Во избежание перенапряжений отключение асинхронной машины от сети должно производиться при короткозамкнутом роторе. В этом отношении в наилучших условиях находятся асинхронные машины с ротором в виде беличьей клетки.

В случае асинхронной машины с контактными кольцами на роторе, необходимо кольца при отключении машины оставлять замкнутыми накоротко.

ЛЕКЦИЯ 23

Тема: Устройство и принцип действия машин постоянного тока

Учебные вопросы:

Введение.

1. Принцип действия машин постоянного тока.
2. Устройство машины постоянного тока.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь, 1983.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1987. - 832 с.

Введение.

Машинами постоянного тока (МПТ) называются машины, у которых во внешней цепи постоянный ток.

Машины постоянного тока применяют в качестве электродвигателей и генераторов.

Электродвигатели постоянного тока имеют хорошие регулировочные свойства, значительную перегрузочную способность и позволяют получать как жесткие, так и мягкие механические характеристики.

Поэтому их широко используют для привода различных механизмов в черной металлургии (прокатные станы, кантователи, роликовые транспортеры), на транспорте (электровозы, тепловозы, электропоезда, электромотобили), в грузоподъемных и землеройных устройствах (краны, шахтные подъемники, экскаваторы), на морских и речных судах, в металлообрабатывающей, бумажной, текстильной, полиграфической промышленности и др. Двигатели небольшой мощности применяют во многих системах автоматики.

Конструкция двигателей постоянного тока сложнее и их стоимость выше, чем асинхронных двигателей.

Однако в связи с широким применением автоматизированного электропривода и тиристорных преобразователей, позволяющих питать электродвигатели постоянного тока регулируемым напряжением от сети переменного тока, эти электродвигатели широко используют в различных отраслях народного хозяйства.

Генераторы постоянного тока ранее широко использовались для питания электродвигателей постоянного тока в стационарных и передвижных установках, а также как источники электрической энергии для заряда аккумуляторных батарей, питания электролизных и гальванических ванн, для электроснабжения различных электрических потребителей на автомобилях, самолетах, пассажирских вагонах, электровозах, тепловозах и др.

Недостатком машин постоянного тока является наличие щеточно-коллекторного аппарата, который требует тщательного ухода в эксплуатации и снижает надежность работы машины.

Поэтому в последнее время генераторы постоянного тока в стационарных установках вытесняются полупроводниковыми преобразователями, а на транспорте — синхронными генераторами, работающими совместно с полупроводниковыми выпрямителями.

Принципиальная возможность создания электродвигателя постоянного тока была впервые показана М. Фарадеем в 1821 г.; в созданном им приборе проводник, по которому пропускали постоянный ток, вращался вокруг магнита.

Двигатель постоянного тока с электромагнитным возбуждением был создан в России акад. Б. С. Якоби в 1834 г., который назвал его магнитной машиной.

В 1838 г. им был построен более мощный электродвигатель, который использовался для привода гребного винта речного катера.

В дальнейшем ряд коллекторных машин постоянного тока был создан Г. Феррарисом, В. Сименсом и др. Значительное развитие теория электрических машин постоянного тока получила в трудах Д. А. Лачинова.

В 1880 г. он опубликовал труд «Электромеханическая работа», в котором рассмотрел вопросы создания вращающего момента электродвигателя, КПД электрических машин, условия питания электродвигателя от генератора и дал классификацию машин постоянного тока по способу возбуждения.

1. Принцип действия машин постоянного тока.

Простейшим генератором постоянного тока может служить виток из проводника в виде рамки, вращающейся в магнитном поле между двумя постоянными магнитами N и S (рис. 1).

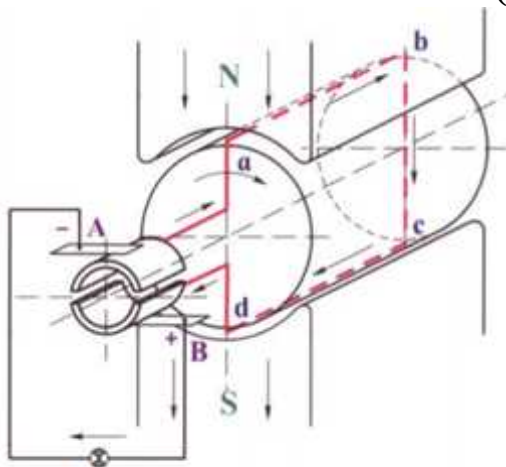


Рис. 1. Схема работы машины постоянного тока

Концы витка $abcd$ присоединяются к двум медным пластинам коллектора, изолированным друг от друга и от вала, на котором они помещены.

На пластинах помещены неподвижные щетки A и B , к которым присоединена внешняя цепь, состоящая из каких-либо приемников электроэнергии.

При вращении витка с постоянной частотой проводники ab и cd пересекают магнитные линии, при этом в проводниках индуцируется ЭДС.

При равномерном распределении магнитного поля в пространстве ЭДС проводника

$$e = E \sin \mu t, \quad (1)$$

где $\mu = 2\pi f$ - угловая частота; f - частота ЭДС.

Таким образом, при условии равномерного распределения магнитного поля в витке индуцируется переменная синусоидальная ЭДС (рис. 2).

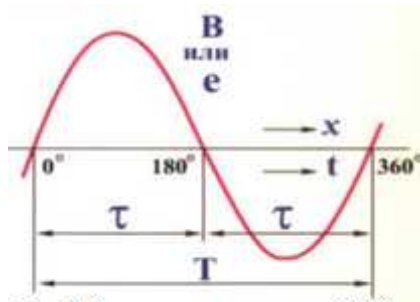


Рис. 2. Синусоида индукции или ЭДС

Направление индуцируемой в проводнике ЭДС определяется правилом правой руки, т.е. при перемещении проводника ab под северным полюсом в нем наводится ЭДС, направленная из-за плоскости чертежа, а когда он проходит под южным полюсом, — за плоскость чертежа.

Таким образом, в проводнике ab наводится переменная во времени ЭДС, изменяющая свое направление 2 раза за один оборот витка.

Время T , за которое изменяется ЭДС, называют **периодом**.

Число периодов в одну секунду называют **частотой**.

В общем случае, когда машина имеет p пар полюсов, частота наводимой ЭДС увеличивается пропорционально p , т. е.

$$f = pn,$$

где n - частота вращения витка в секунду.

Для нормальной работы генератора нужно установить щетки так, чтобы наводимая в витке ЭДС была равна нулю в момент перехода щетки с одной пластины на другую.

Каждая из щеток будет соприкасаться только с той коллекторной пластиной и соответственно только с тем из проводников, которые находят под полюсом данной полярности.

Например, в момент времени, показанный на рис. 1, щетка A соприкасается с пластиной 1 и имеет положительный потенциал, так как к ней подводится ЭДС от проводника ab , находящегося под северным полюсом.

При повороте якоря на 90° виток будет расположен так, что его проводники перемещаются вдоль магнитных линий поля, не пересекая их. Поэтому ЭДС, наведенная в витке, равна нулю.

Щетки соединяют коллекторные пластины между собой и тем самым замыкают виток накоротко.

При повороте витка на 180° щетка A соприкасается с пластиной 2 , но по-прежнему она имеет положительный потенциал, так как к ней подводится ЭДС от проводника cd , заменившего проводник ab под северным полюсом.

Аналогично можно видеть, что щетка B имеет всегда только отрицательный потенциал.

Таким образом, по витку *abcd* по-прежнему протекает переменный ток; при этом по внешнему участку цепи ток проходит только в одном направлении, а именно от положительной щетки *A* к отрицательной щетке *B*, т.е. происходит выпрямление переменной ЭДС, наведенной в витке, в пульсирующую на внешнем участке цепи (рис. 3).

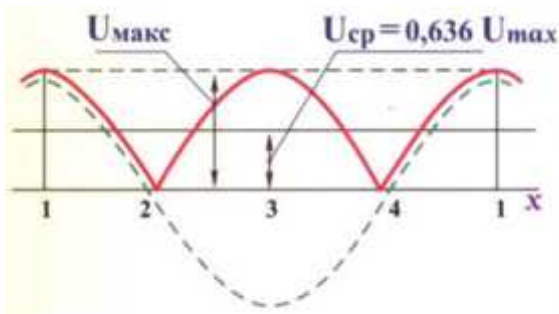


Рис. 3. Кривые ЭДС в витке и напряжение на щётках

Как видно из рисунка, кривая ЭДС помимо постоянной содержит большую переменную составляющую, называемую пульсацией ЭДС. Для ее уменьшения следует увеличить число коллекторных пластин.

При увеличении числа коллекторных пластин пульсация уменьшается и при 16 пластинах на пару полюсов становится менее 1 %.

Таким образом, коллектор в генераторах постоянного тока выполняет роль преобразователя переменной ЭДС, индуцируемой в обмотке якоря, в постоянную на щетках, т.е. осуществляет выпрямление ЭДС.

2. Устройство машины постоянного тока.

Машина постоянного тока состоит из неподвижной части – статора и вращающейся части – якоря, в котором происходит процесс преобразования механической энергии в электрическую (генератор) или обратно – электрической энергии в механическую (электродвигатель).

Между неподвижной и вращающейся частями имеется зазор.

Неподвижная часть (рис. 4) состоит:

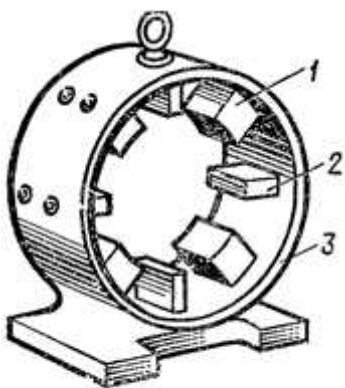


Рис. 4. Неподвижная часть машины постоянного тока

- из станины 3;
- главных полюсов 1, предназначенных для создания основного магнитного потока;
- добавочных полюсов 2, служащих для достижения безыскровой работы щеток на коллекторе (улучшения коммутации).

К станине крепят болтами подшипниковые щиты, главные и дополнительные полюсы.

Основной (главный) полюс (рис. 5, а) имеет сердечник 4, набранный из листов электротехнической стали толщиной 0,5 - 1 мм, стянутых шпильками.

На сердечник насажены две катушки обмоток возбуждения 2. Нижнюю часть сердечника – полюсный наконечник 3 – выполняют так, чтобы воздушный зазор увеличивался от центра полюса к его концам.

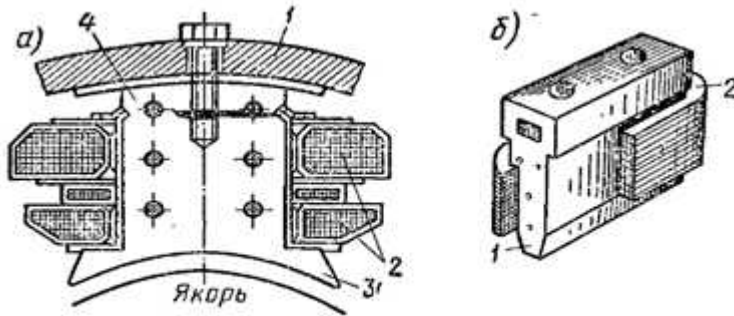


Рис. 5. Основной (а) и добавочный (б) полюсы

Это делается для того, чтобы уменьшить искажение поля под действием реакции якоря и рассеяние главного поля в зоне коммутации.

Число главных полюсов всегда четное, причем северные и южные полюсы

чередуются, что достигается соответствующим соединением катушек обмотки возбуждения полюсов.

Катушки всех полюсов соединяют последовательно. Полюсы крепятся к станине 1 болтами или шпильками.

Добавочный полюс (рис. 5, б) состоит из сердечника 1, изготовляемого из стали, и обмотки 2, изготовляемой из медных шин прямоугольного сечения.

Обмотки добавочных полюсов соединяют последовательно с обмоткой якоря, а полюсы устанавливают между главными полюсами и крепят к станине болтами.

Воздушный зазор под добавочными полюсами значительно больше, чем под главными. Поперечное сечение добавочных полюсов расширяется в сторону корпуса.

Это увеличивает поверхность прилегания добавочного полюса к корпусу, что дает большую устойчивость и предупреждает насыщение от большого потока рассеяния добавочных полюсов.

Для создания электрического контакта с поверхностью коллектора в машине устанавливают щетки, которые прикрепляют к щеткодержателю.

Щеткодержатель (рис. 6) состоит:

- из нажимных пластин 1;
- пружины 2, передающей давление на щетку 3;
- обоймы 4;
- тросика 5, для присоединения элементов электрической цепи машины к щетке.

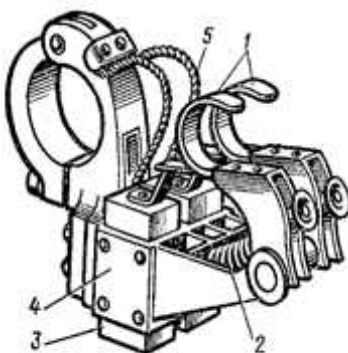


Рис. 6. Щеткодержатель

Все щеткодержатели одной полярности соединяют между собой сборными шинами, присоединенными к выводам машины. Щеткодержатели крепят на траверсе.

Якорь машины постоянного тока состоит:

- из сердечника якоря;
- обмотки;
- коллектора;
- вентилятора;

— вала с шарикоподшипником или роликоподшипником.



Рис. 7. Сердечник якоря без обмотки

Каждый лист пакета имеет зубцы, пазы и вентиляционные отверстия. В пазы сердечника укладывают проводники обмотки якоря. Обмотку якоря присоединяют к пластинам коллектора.

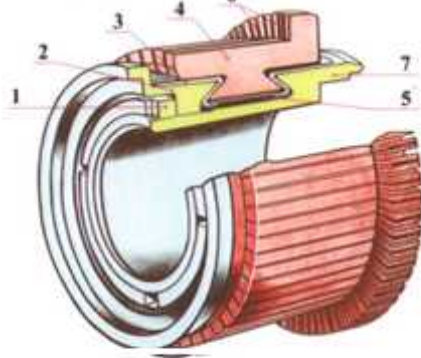


Рис. 8. Аро́чный коллектор
1 - стяжная гайка; 2 - нажимной конус;
3 - изолирующая манжета; 4 - коллекторная
пластина; 5 - изолирующий цилиндр;
6 - изолирующая прокладка; 7 - втулка
коллектора

Сердечник якоря (рис. 7) машины представляет собой пакет из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, которые для уменьшения потерь от вихревых токов изолируют друг от друга лаком.

Пакет запрессован на валу якоря и удерживается в сжатом состоянии нажимными шайбами.

Для лучшего охлаждения машины в сердечниках якоря устраивают вентиляционные каналы.

На рис. 8 показан коллектор, собранный из пластин твердотянутой меди, изолированных друг от друга и от вала якоря миканитовыми прокладками и манжетами.

На рис. 9 показано устройство машины постоянного тока, где 1 - подшипник; 2 - задний подшипниковый щит; 3 - траверса щеткодержателя; 4 - коллектор; 5 - палец щеткодержателя; 6 - щетки; 7 - коробка выводов; 8 - обмотка якоря; 9 - обмотка возбуждения; 10 - болты крепления полюсов; 11 - сердечник полюса; 12 - воздухонаправляющий щиток; 13 - вентилятор; 14 - корпус; 15 - передний подшипниковый щит; 16 - вал; 17 - жалюзи для выхода воздуха; 18 - жалюзи для входа воздуха.

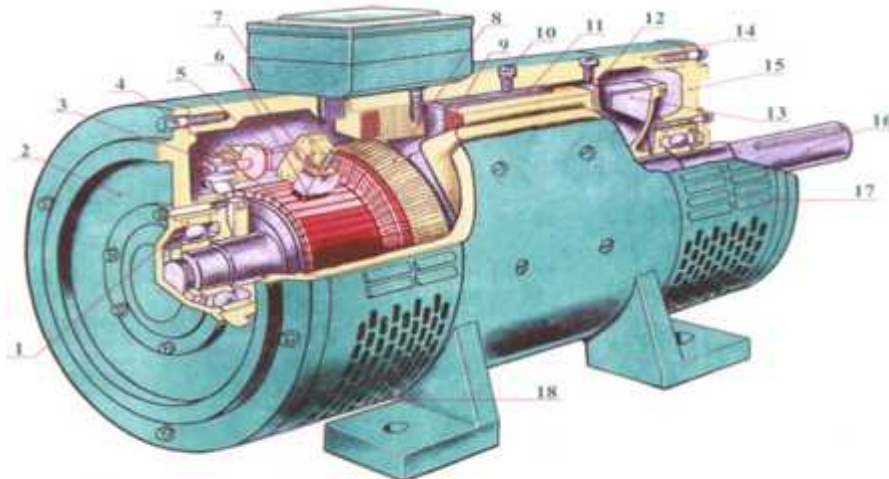


Рис. 9. Устройство машины постоянного тока

ЛЕКЦИЯ 24

Тема: Реакция якоря машины постоянного тока

Учебные вопросы:

Введение.

1. Виды реакции якоря
2. Реакция якоря в генераторе и в двигателе.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь, 1983.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1987. - 832 с.

Введение.

Когда машина работает в режиме холостого хода (х.х.), т. е. при отсутствии тока в обмотке якоря, единственным источником магнитного поля в машине является н.с. обмотки возбуждения, создающая основной поток Φ (рис. 1).

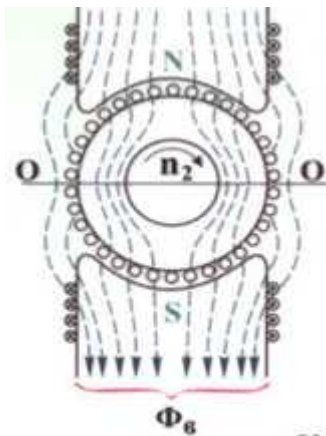


Рис. 1. Характер магнитного поля МПТ, создаваемого обмоткой возбуждения

При нагрузке электрической машины, когда возникает ток в цепи якоря, состоящей из нескольких обмоток (якоря, добавочных полюсов, последовательного возбуждения и компенсационной), кроме основного магнитного потока, существуют магнитные поля обмоток цепи якоря.

Поэтому магнитный поток в воздушном зазоре и пространственное распределение магнитного поля при нагрузке машины будут определяться совместным действием н.с. полюсов и цепи якоря.

Таким образом, магнитный поток, который существует в машине при работе ее под нагрузкой, следует рассматривать как результирующий поток, созданный результирующей н.с.

Воздействие н.с. якоря на н.с. основных полюсов называют **реакцией якоря**.

При анализе этого явления мы воспользуемся методом наложения, для этого отдельно строим распределение основного поля полюсов и поля якоря, а затем совмещаем их в результирующее магнитное поле машины.

Этот метод дает правильные результаты в том случае, если при наложении параметры машины не изменяются. Таким параметром является степень насыщения магнитной цепи машины, которую будем считать постоянной величиной.

Для выведения выражения н.с. якоря вводится понятие о линейной нагрузке. Для этого зубчатый якорь приводится к гладкому с расчетным воздушным зазором и с равномерно распределенным по окружности якоря слоем проводников.

Линейной нагрузкой якоря называют число проводов, приходящееся на 1 см длины окружности якоря

$$A = NI_{\text{я}} / (\pi D),$$

где N - число всех проводников обмотки; $I_{\text{я}}$ - ток в проводнике обмотки якоря; D - диаметр якоря, см.

Распределение основного потока в двухполюсной машине при х.х., показанное на рис. 1, имеет симметричный характер как относительно осевой линии dd основных полюсов, так и относительно геометрической ней-

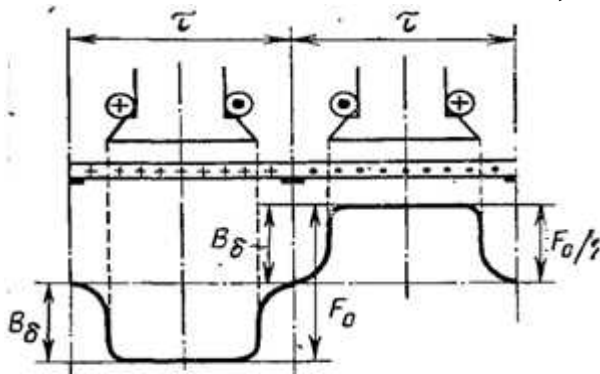


Рис. 2. Распределение магнитной индукции под полюсом

трали, занимающих неизменное положение в пространстве.

Распределение магнитной индукции в зазоре под полюсом представляет собой трапецеидальную кривую (рис. 2).

При вращении якоря по часовой стрелке в его обмотке наводятся ЭДС, но ток в обмотке якоря отсутствует, так как цепь разомкнута.

1. Виды реакции якоря.

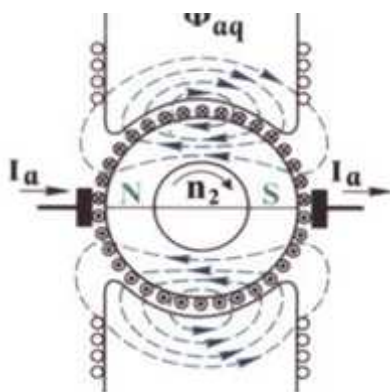


Рис. 3. Характер магнитного поля МПТ, создаваемого обмоткой якоря

1.1. Поперечная реакция якоря.

На рис. 3 показано распределение магнитного поля якоря. Машина не возбуждена и якорь неподвижен: $I_{\text{в}} = 0$ и $p = 0$.

Щетки поставим по линии геометрической нейтральной и подведем к ним ток от какого-нибудь постороннего источника постоянного тока в таком направлении, чтобы направления токов в ветвях обмотки совпадали с направлением ЭДС, от потока возбуждения.

В этом случае магнитные линии поля якоря, направление которых определяем, руководствуясь направлением тока в проводниках обмотки якоря по правилу буравчика, выходят из якоря слева и входят справа.

Так как магнитные линии выходят из северного полюса и входят в южный, то левая сторона якоря обладает северной полярностью, а правая — южной.

Такое поле якоря называется поперечным полем и определяется поперечной н.с. якоря $F_{я\alpha}$.

Как видно из рис. 3, 4, якорь представляет собой электромагнит, ось которого совпадает с линией щеток.

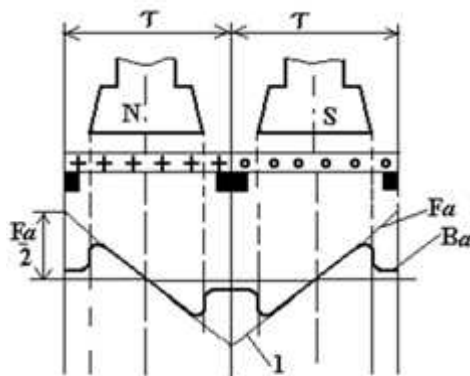


Рис. 4. Характер МДС и магнитного поля МПТ, создаваемого обмоткой якоря

Н.с. якоря по линии геометрической нейтрали имеет максимальное значение, так как соответствующая магнитная линия охватывает наибольший ток (кривая 1), однако магнитная индукция от потока якоря в этих точках имеет небольшое значение (кривая 2), что объясняется увеличением магнитного сопротивления потоку якоря в межполюсном пространстве.

График магнитной индукции поля якоря имеет седлообразный вид: индукция равна нулю под серединой полюсов и достигает наибольшего значения под краями полюсных наконечников.

Покажем графически картину магнитного поля машины для этого случая (рис. 5).

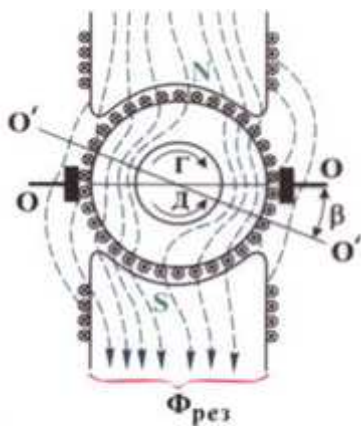


Рис. 5. Характер результирующего магнитного поля МПТ

Как видно из рисунка, поперечная реакция якоря вызывает ослабление поля под одним краем полюса и его усиление под другим, вследствие чего ось результирующего поля поворачивается в генераторе по направлению вращения якоря, а в двигателе — в обратную сторону.

Если условно, рассматривать линии магнитной индукции в качестве упругих нитей, то возникновение электромагнитного момента можно рассматривать как результат действия упругих сил этих нитей, стремящихся сократиться и повернуть якорь.

Из рисунка видно, что при такой трактовке явлений направления действия моментов совпадают с реальными, как в режиме генератора (тормозной), так и в режиме двигателя (вращающий).

Под воздействием поперечной реакции нейтральная линия на поверхности якоря, на которой индукция $B_c = 0$, поворачивается из положения геометрической нейтральной 1-1 на некоторый угол β в положение 2-2 которое называется линией **физической нейтральной**.

В генераторе физическая нейтраль повернута в сторону вращения якоря, а в двигателе в обратную сторону.

Рассмотрим как влияет поле якоря на ЭДС параллельной ветви. На наших рисунках $2\alpha = 2$.

Из рис. 5, когда $I_g = 0$, $I_a \neq 0$ одна параллельная ветвь находится под воздействием поля двух полярностей, поэтому при вращении якоря при установке щеток на геометрической нейтральной суммарная ЭДС от поля реакции якоря в каждой параллельной ветви обмотки и на щетках равна нулю.

1.2. Продольная реакция якоря.

При сдвиге щеток, с нейтральной на угол $\pm 90^\circ$ ось поля якоря устанавливается по оси полюсов dd вверх или вниз от оси абсцисс (рис. 6). Такое **поле якоря называют продольным**, и определяется оно продольной н.с. якоря $F_{яд}$.



Рис. 6. Возникновение продольной МДС якоря при сдвиге щеток с геометрической нейтральной

Положение щеток по осевой линии полюсов — второе основное положение. В общем случае щетки могут быть сдвинуты с нейтральной на угол β .

В этих условиях можно рассматривать якорь как два совмещенных электромагнита, из которых один, образованный частью обмотки и находящийся в двойном угле 2β , создает продольную н.с. якоря $F_{яд}$, а другой, образованный остальной частью обмотки, создает поперечную н.с. якоря $F_{яп}$.

При нагрузке машины будет иметь место результирующее магнитное поле (рис. 5), которое уже не является симметричным относительно оси полюсов.

Причина деформации магнитного поля заключается в том, что направления магнитных линий поперечного поля якоря и поля полюсов под сбегающим краем полюса совпадают, отчего результирующее поле под сбегающим краем полюса усиливается, а под набегающим краем полюса эти поля направлены встречно, поэтому результирующее поле уменьшается.

Следствием искажения распределения магнитного поля является смещение по направлению вращения физической нейтральной на некоторый угол β , величина которого зависит от нагрузки машины.

Физической нейтралью называют прямую, проходящую через центр, и точки на окружности якоря с нулевой магнитной индукцией, т. е. прямую, перпендикулярную оси результирующего магнитного поля.

2. Реакция якоря в генераторе и в двигателе.

Чтобы определить в генераторе, какое действие оказывает н.с. якоря на н.с. полюсов, предположим, что якорь вращается по часовой стрелке с некоторой постоянной частотой, а щетки стоят на нейтрали.

На рис. 7 показана в развернутом виде пара полюсов. Создаваемое ими основное поле во всех случаях изображается трапецеидальной кривой 1.

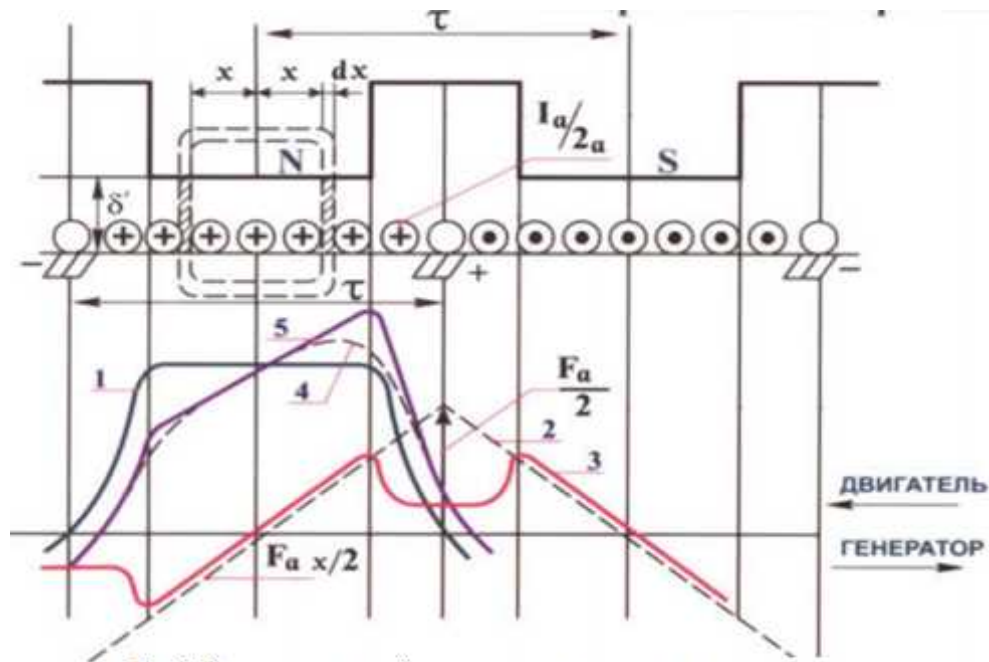


Рис. 7. Распределение полей в воздушном зазоре при нагрузке
1 - кривая распределения магнитной индукции в воздушном зазоре при холостом ходе; 2 - распределение МДС реакции якоря; 3 - кривая распределения поля поперечной реакции якоря; 4 - кривая распределения результирующего поля при наличии насыщения; 5 - кривая распределения результирующего поля при отсутствии насыщения

При вращении якоря в заданном направлении в левой ветви обмотки якоря индуцируются э.д.с., направленные за плоскость чертежа, а в правой – в обратную сторону. В том же направлении проходят по обмотке и токи.

Это позволяет построить кривую поля якоря 2. Чтобы получить кривую 4, 5 результирующего поля, нужно в каждой точке сложить ординаты кривых 1 и 2 или 1 и 3.

Мы видим, что под набегающими (левыми) краями полюсов N и S поле якоря стремится ослабить основное поле, т. е. действует размагничивающим образом, а под сбегающими (правыми) усиливает его, т. е. действует намагничивающим образом.

Размагничивающее и намагничивающее действия взаимно компенсируются, поэтому результирующий поток машины практически не отличается по величине от основного потока полюсов, если магнитная цепь машины не насыщена.

Но он искажается, т. е. перестает быть симметричным относительно оси полюсов. При этом точки, в которых результирующее поле проходит через нуль, смещаются относительно геометрической нейтрали на некоторый угол по направлению вращения якоря. Через эти точки проходит физическая нейтраль.

Обычно индукция под сбегающим краем полюса настолько возрастает, что сталь полюсов и зубцов на этом участке довольно сильно насыщается.

Вследствие этого магнитное сопротивление участка увеличивается и распределение индукции определяется кривой. 4, проходящей ниже кривой 5 под сбегающим краем полюса.

Мы видим, что поле якоря ослабляет основное поле на набегающем крае полюса в большей степени, чем усиливает его на сбегающем, в результате происходит уменьшение основного поля.

Не трудно видеть, что поле якоря не только искажает основное поле, но и ослабляет его.

Реакция якоря в двигателе. При заданных полярности полюсов и направлении вращения якоря наводимые в генераторе и в двигателе ЭДС имеют одно и то же направление, но токи проходят по обмотке якоря в разных направлениях.

Поэтому в двигателе полярность магнитного поля якоря изменяется и реакция якоря в двигателях воздействует на основной магнитный поток иначе, чем в генераторах: при положении щеток на линии геометрической нейтрали поперечная н.с. якоря искажает основное поле, ослабляя его на сбегающем крае полюса и усиливая на набегающем.

Поперечная реакция якоря приводит к нежелательным явлениям:

1) ухудшает коммутацию, т.е. безискровую работу щёток на коллекторе;

2) у генераторов уменьшает напряжение;

3) у двигателей уменьшает момент и увеличивает частоту вращения.

Поэтому в МПТ предусматриваются специальные меры для компенсации вредного действия реакции якоря:

- сдвиг щёток с геометрической нейтрали в положение физической нейтрали;
- применение специальных устройств – компенсационных обмоток и добавочных полюсов.

Компенсационная обмотка в машинах постоянного тока предназначена для компенсации поперечной реакции якоря.

При компенсации реакции якоря кривая распределения индукции в воздушном зазоре под полюсом при нагрузке машины сохраняет тот же вид, что и при холостом ходе.

Вследствие этого напряжение между соседними коллекторными пластинами при нагрузке не будет увеличиваться, что сделает работу машины более надежной, так как уменьшается опасность возникновения кругового огня.

Кроме того, при наличии компенсационной обмотки не будет проявляться размагничивающее действие поперечной реакции якоря.

Применяется компенсационная обмотка в машинах большой мощности, а также в машинах, работающих при резкопеременным нагрузкам и в двигателях с широким диапазоном регулирования скорости.

ЛЕКЦИЯ 25

Тема: Коммутация тока в машинах постоянного тока

Учебные вопросы:

Введение.

1. Причины искрения под щётками.
 2. Щеточный контакт и его характеристики.
 3. Уравнение коммутационного процесса. Виды коммутации.
- Заключение и ответы на вопросы

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь, 1983.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1987. - 832 с.

Введение.

При вращении якоря коллекторные пластины поочередно входят в соприкосновение со щеткой, при этом секции, присоединенные к этим пластинам, замыкаются щеткой накоротко, а при дальнейшем перемещении якоря переходят в другую параллельную ветвь.

При переходе секций из одной параллельной ветви в другую ток в них меняет направление на противоположное (рис. 1).

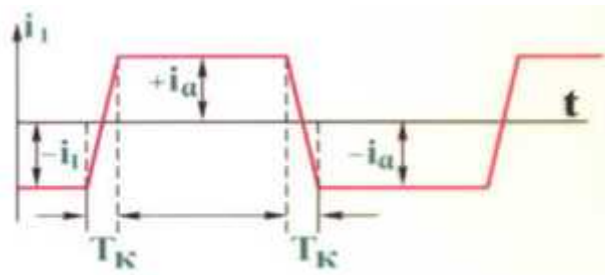


Рис. 1. Изменение тока в секции при вращении якоря

Коммутацией называют совокупность явлений, связанных с изменением тока в проводниках обмотки якоря при переходе секций из одной параллельной ветви в другую при замыкании этих секций щетками.

Процесс коммутации имеет очень большое значение в теории электрических машин постоянного тока, так как искрение, имеющее место на коллекторе этих машин, большей частью происходит вследствие неправильного протекания этого процесса.

Секция, замкнутая щеткой, называется **коммутируемой секцией**, а время, в течение которого происходит это замыкание, — **периодом коммутации**.

Коммутация в машинах постоянного тока осуществляется коллектором — механическим преобразователем частоты. Коллектор или коммутатор может иметь и другие конструктивные исполнения.

Например, коммутаторы выполняются на базе полупроводниковых элементов — транзисторов или тиристоров, известны коммутаторы, выполненные на базе магнитоуправляемых контактов — герконов.

Однако механический преобразователь частоты остается одним из наилучших по своим массогабаритным, энергетическим и другим показателям.

1. Причины искрения под щётками.

Искрение щеток на коллекторе может происходить по разным причинам, которые можно разделить на:

- механические,
- электромагнитные,
- потенциальные.

Механические причины искрения связаны с некачественным изготовлением коллектора и щеточного аппарата.

Неровная поверхность коллектора, выступание отдельных коллекторных пластин, заедание и вибрация щеток в щеткодержателях, биение коллектора и т. д. приводят к нарушению контакта между щеткой и коллектором и появлению искрения.

Поэтому при изготовлении машины предъявляются жесткие требования к обработке поверхности коллекторно-щеточного узла.

Электромагнитная причина искрения является основной и связана с протеканием электромагнитных процессов в коммутируемых секциях.

Сущность этих процессов заключается в следующем. При коммутации, когда секция замкнута щеткой, в ней происходит изменение направления тока на противоположное.

Как уже отмечалось ранее, это изменение протекает быстро. Так как секция имеет определенную индуктивность L_s , то в ней будет наводиться ЭДС самоиндукции

$$e_s = -L_s di_a / dt.$$

В общем случае, когда ширина щетки больше одной коллекторной пластины ($\alpha_{щ} > 1$), одновременно коммутируется ряд рядом лежащих секций, которые могут иметь магнитную связь с рассматриваемой секцией.

Поэтому кроме ЭДС самоиндукции в каждой коммутируемой секции наводятся ЭДС взаимной индукции от соседних коммутируемых секций $\sum e_M$.

Кроме того, в барабанном якоре ЭДС взаимной индукции будут наводиться от секций, коммутируемых соседними щетками, так как стороны этих секций обычно располагаются в одних пазах с коммутируемой.

ЭДС коммутируемой секции, равная сумме $e_s + \sum e_M = e_p$, называется **реактивной ЭДС**.

Реактивная ЭДС стремится задержать изменение тока в коммутируемой секции, и по правилу Ленца ее направление совпадает с направлением тока в секции до момента коммутации.

Кроме реактивной ЭДС в коммутируемых секциях наводится ЭДС от внешнего поля, имеющегося в зоне, где располагаются эти секции (зоне коммутации). Чаще всего середина этой зоны совпадает с геометрической нейтралью машины.

Внешнее поле создается или поперечной реакцией якоря, или дополнительными полюсами.

При вращении якоря в этом поле в коммутируемой секции индуцируется ЭДС $e_{вр}$, которую называют **ЭДС вращения**. В зависимости от направления внешнего поля ЭДС $e_{вр}$ может иметь согласное или встречное направление с реактивной ЭДС.

Таким образом, при работе машины в коммутируемой секции действует результирующая ЭДС, равная

$$\sum e = (e_p \pm e_{вр}),$$

которая создает ток i_d , протекающий в контуре, образованном секцией и щеткой.

Ток i_d называется **добавочным током коммутации**.

Если в момент времени T_k , когда секция выходит из состояния короткого замыкания щеткой, ток не достигает нулевого значения, то происходит разрыв этого тока.

При этом запасенная в контуре электромагнитная энергия, равная $1/2 L_s i_d^2$, освобождается и вызывает появление искр между щеткой и кол-

лектором. Интенсивность искрения зависит от запасенной в контуре электромагнитной энергии.

Таким образом, электромагнитная причина искрения имеет ту же природу, что и искрение при разрыве любой цепи с индуктивностью.

Причиной появления **потенциального искрения** является повышение напряжения между соседними коллекторными пластинами, что при неблагоприятных условиях может привести к аварийному явлению – круговому огню на коллекторе.

2. Щеточный контакт и его характеристики.

На коммутационный процесс в машинах постоянного тока существенное влияние оказывает переходное сопротивление контакта между щеткой и медным коллектором.

Механизм прохождения тока в этом контакте отличается большой сложностью, зависит от целого ряда факторов и до настоящего времени не является вполне ясным.

Считается, что ток между щеткой и коллектором может одновременно проходить различными путями, основными из которых являются:

- 1) точки непосредственного механического контакта;
- 2) пылевые зоны;
- 3) ионная проводимость;
- 4) пробой, образующейся на коллекторе пленки;
- 5) полупроводящий запирающий слой этой пленки.

Доля участия в прохождении тока через контакт между щеткой и коллектором этих пяти видов проводимостей зависит от условий работы и материала контактирующих поверхностей.

Отметим, что на $\Delta U_{щ}$, (сумма переходных падений напряжений под отрицательными и положительными щетками) сильное влияние оказывают давление на щетку, температура коллектора, состояние окружающей атмосферы и др.

В машинах постоянного тока находят применение электрографитированные, графитные, угольно-графитные щетки.

Значение $\Delta U_{щ}$, (на пару щеток) у них лежит в пределах 1,5 - 3 В. Для низковольтных машин применяют металлографитные щетки с $\Delta U_{щ} = 0,5 - 2$ В.

3. Уравнение коммутационного процесса. Виды коммутации.

Характер протекания коммутационного процесса в машинах постоянного тока зависит от закона изменения тока в секции за период, когда она замкнута щеткой.

На ток в коммутируемой секции оказывает влияние целый ряд факторов, часть из которых трудно учесть аналитически. Поэтому обычно при

составлении уравнений, описывающих коммутационный процесс, принимают ряд допущений, главным из которых является допущение, связанное с учетом скользящего контакта между щеткой и коллектором.

Вольт-амперные характеристики щеточного контакта не имеют аналитического выражения, поэтому при расчетах эту характеристику описывают приближенным аналитическим выражением (аппроксимируют характеристику).

Существует различный подход к аппроксимации вольт-амперных характеристик щеточного контакта. В дальнейшем будем пользоваться аппроксимацией, принятой в так называемой классической теории коммутации.

В основу классической теории коммутации положено предположение, что переходное сопротивление между щеткой и коллектором $r_{щ}$ является постоянным и не зависит от плотности тока в щетке $j_{щ}$, т. е. принимается линейный характер вольт-амперной характеристики $\Delta U_{щ} = f(j_{щ})$.

Процесс коммутации рассмотрим на примере простой петлевой обмотки. В целях большей наглядности возьмем кольцевую обмотку якоря, а ширину щетки $b_{щ}$ примем равной ширине коллекторной пластины b_k .

При заданном направлении вращения якоря (рис. 2) коммутация секции 1 начнется с того момента времени, когда коллекторная пластина 2 войдет в соприкосновение с правым краем щетки, который называют набегающим краем.

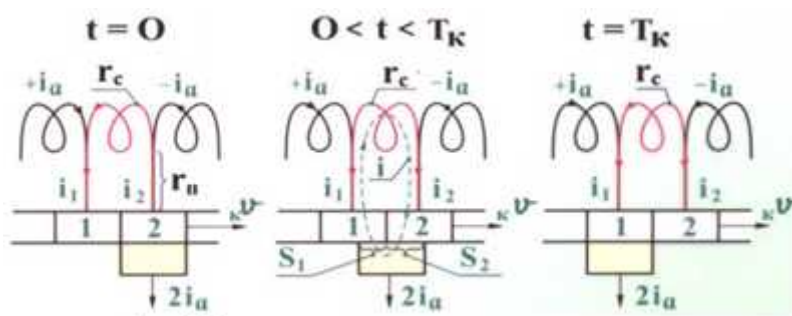


Рис. 2. Последовательные моменты коммутации секции

С этого момента секция 1 будет замкнута щеткой, и в ней будет происходить изменение тока и при дальнейшем перемещении якоря спустя период коммутации T_k коллекторная пластина 1 выйдет из

соприкосновения со щеткой под левым ее краем (сбегающим краем).

В этот момент коммутация секции 1 заканчивается, и она переходит в другую параллельную ветвь обмотки, а ток в ней меняет направление на противоположное по сравнению с его направлением до начала коммутации.

Для определения закона изменения тока в коммутируемой секции для момента времени $t(0 < t < T_k)$ в соответствии с рис. 2 можем записать следующую систему уравнений:

по первому закону Кирхгофа (для пластин 1 и 2)

$$i_2 = i_a - i; i_1 = i_a + i; \quad (1)$$

по второму закону Кирхгофа (контур коммутируемой секции)

$$i_1 r_{щ1} - i_2 r_{щ2} = \sum e. \quad (2)$$

В уравнении (2) не учитывались сопротивления секции и проводников, соединяющих секцию с коллектором.

Эти сопротивления малы по сравнению с переходными сопротивлениями в щеточном контакте под сбегающей частью $r_{щ1}$ и под набегающей частью $r_{щ2}$.

$\sum e = (e_p \pm e_{ep})$ – сумма ЭДС в коммутируемой секции, состоящая из реактивной ЭДС и ЭДС, наводимой в этой секции при вращении ее в магнитном поле в зоне коммутации.

Из совместного решения уравнений (1) и (2) получим

$$i = i_a \frac{r_{щ2} - r_{щ1}}{r_{щ2} + r_{щ1}} + \frac{\sum e}{r_{щ}} = i_a \frac{1 - r_{щ1}/r_{щ2}}{1 + r_{щ1}/r_{щ2}} + \frac{\sum e}{r_{щ}}. \quad (3)$$

где $r_{щ} = r_{щ2} + r_{щ1}$ – переходное сопротивление щеточного контакта.

Переходные сопротивления $r_{щ1}$ и $r_{щ2}$ обратно пропорциональны площадям соприкосновения щетки с соответствующей коллекторной пластиной:

$$S_{щ1} = b_{щ1} l_{щ}; S_{щ2} = b_{щ2} l_{щ},$$

здесь $l_{щ}$ – длина щетки в осевом направлении машины; $b_{щ1}$ и $b_{щ2}$ – ширина сбегающей части щетки соответственно.

При вращении якоря площадь $S_{щ2} = v_k t l_{щ}$ будет увеличиваться, а площадь $S_{щ1} = v_k (T_k - t) l_{щ}$ – уменьшаться (v_k – окружная скорость коллектора).

В соответствии с этим можно записать

$$r_{щ1}/r_{щ2} = S_{щ2}/S_{щ1} = t/(T_k - t). \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), получаем в окончательном виде выражение для тока i в коммутируемой секции:

$$i = i_a \left(1 - 2 \frac{t}{T_k}\right) + \frac{\sum e}{r_{щ}}. \quad (5)$$

Характер изменения тока i за период коммутации зависит от значения и знака суммарной ЭДС $\sum e = (e_p \pm e_{ep})$, действующей в коммутируемой секции.

В зависимости от этого различают три вида коммутации:

- прямолинейную,
- замедленную
- ускоренную.

Прямолинейная коммутация в машинах постоянного тока будет в том случае, когда $\sum e = 0$.

Для этого реактивная ЭДС e_p в любой момент времени должна быть скомпенсирована ЭДС $e_{вр}$, наводимой при пересечении коммутируемой секцией линий внешнего магнитного поля.

Такое магнитное поле в зоне коммутации чаще всего создается дополнительными полюсами. При этом условии ток в коммутируемой секции будет равен

$$i_{np} = i_a(1 - 2t/T_k). \quad (5)$$

Изменение тока i_{np} будет происходить линейно от времени (рис. 3), в связи с чем такой вид коммутации получил название прямолинейной.

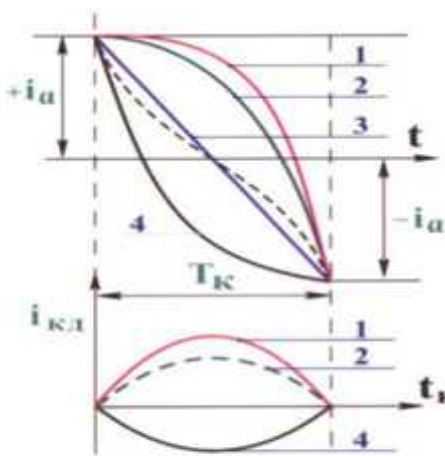


Рис. 3. Изменение тока в коммутируемой секции при коммутации
1, 2 - замедленная коммутация;
3 - прямолинейная коммутация;
4 - ускоренная коммутация

Выясним распределение плотностей тока под щеткой для этого вида коммутации. Плотность тока под набегающей частью щетки

$$j_{щ2} = i_2 / S_{щ2} = (i_a - i) / (v_k t l_{щ}). \quad (6)$$

Для сбегающей части щетки плотность тока равна:

$$j_{щ1} = i_1 / S_{щ1} = (i_a + i) / (v_k (T_k - t) l_{щ}). \quad (7)$$

При прямолинейной коммутации $j_{щ1} = j_{щ2}$ и ток равномерно распределяется по всей ширине щетки.

Замедленная коммутация происходит, когда в контуре коммутируемой секции реактивная ЭДС имеет большее значение, чем компенсирующая ее ЭДС $e_{вр}$ ($\sum e = (e_p - e_{вр} > 0)$), а также тогда, когда

$e_{вр}$ совпадает по направлению с e_p ($\sum e = (e_p + e_{вр} > 0)$).

Такой вид коммутации обычно наблюдается в машинах постоянного тока, у которых отсутствуют дополнительные полюсы, а щетки установлены на геометрической нейтрали.

Замедленная коммутация происходит также в машинах, имеющих слабые дополнительные полюсы.

При замедленной коммутации под действием не полностью скомпенсированной реактивной ЭДС в контуре коммутируемой секции появляется добавочный ток $i_d = \sum e / r_{щ}$, который стремится задержать изменение тока в ней.

Вследствие этого ток в секции будет изменяться медленнее, чем при прямолинейной коммутации (рис. 3). Позже ток i будет проходить и через нулевое значение.

По этой причине этот вид коммутации носит название замедленной коммутации.

В соответствии с (5) ток i при замедленной коммутации можно представить в виде двух составляющих:

$$i = i_a (1 - 2t/T_k) + \sum e / r_{щ} = i_{np} + i_d,$$

где i_{np} - ток, соответствующий прямолинейной коммутации.

Добавочный ток i_d замыкается поперек щетки, причем в скользящем контакте под сбегающей ее частью при замедленной коммутации он имеет такое же направление, как и ток нагрузки (ток i_a), а под набегающей частью – встречное.

Вследствие этого плотность тока в контакте под сбегающим краем щетки будет больше, чем под набегающим.

Замедленный характер коммутации часто сопровождается искрением сбегающего края щетки. По этой причине замедленной коммутации стараются избегать.

Ускоренная коммутация имеет место при $\sum e = e_p - e_{вр} < 0$, что наблюдается в машинах постоянного тока при сильных дополнительных полюсах.

При ускоренной коммутации также появляется добавочный ток i_d , но он будет иметь противоположное направление по сравнению с током при замедленной коммутации.

Вследствие этого ток i в коммутируемой секции будет изменяться быстрее, чем при прямолинейной коммутации, а плотность тока под набегающей частью щетки будет больше, чем под сбегающей.

Сильно ускоренная коммутация приводит к искрению щеток. Поэтому сильно ускоренная коммутация является недопустимой.

Однако некоторое ускорение коммутации, при котором ток в секции i достигает значения, близкого к току параллельной ветви i_a , до завершения коммутационного процесса является желательным.

В этом случае ток сбегающей части щетки и еще до завершения коммутации будет равен нулю, что уменьшает вероятность появления искрения щеток. Во многих случаях такой вид коммутации в машинах постоянного тока предпочитают прямолинейному.

Способы улучшения коммутации.

Меры по улучшению коммутации направлены в первую очередь на уменьшение добавочного тока:

- увеличение сопротивления цепи коммутируемой секции $r_{щ}$;
- уменьшение реактивной ЭДС;
- создание коммутирующего поля в зоне коммутации.

Получить коммутирующее поле можно двумя путями:

1. Создание коммутирующего поля путем сдвига щеток.
2. Создание коммутирующего поля с помощью дополнительных полюсов.

ЛЕКЦИЯ 26

Тема: Генераторы постоянного тока

Учебные вопросы:

Введение.

1. Классификация генераторов постоянного тока.
 2. Основные величины, характеризующие работу генераторов постоянного тока.
 3. Характеристики генераторов постоянного тока.
- Выводы.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь, 1983.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1987. - 832 с.

Введение.

На современных производствах и электрических станциях практически генерируется только электрическая энергия трёхфазного переменного тока.

В тех случаях, когда необходим постоянный ток, он получается, чаще всего, путём преобразования переменного тока в постоянный с помощью преобразователей.

Широко применяются установки по схеме двигатель – генератор, в которых двигатель переменного тока сочленяется на одном валу с генератором постоянного тока.

В качестве первичных источников энергии генераторы постоянного тока (ГПТ) применяются главным образом в изолированных установках (возбудители синхронных машин, на автомобилях, летательных аппаратах, при сварке электрической дугой, на ПЛ и т.д.).

1. Классификация генераторов постоянного тока

1. В зависимости от типа первичного двигателя генераторы подразделяются:

- на турбогенераторы;
- газотурбогенераторы;

- дизель-генераторы;
 - электромашинные преобразователи.
2. По способу возбуждения ГПТ делятся:
- на генераторы независимого возбуждения;
 - генераторы с самовозбуждением.

3. В зависимости от способа включения обмоток возбуждения ГПТ делятся:

- на генераторы параллельного возбуждения;
- генераторы последовательного возбуждения;
- генераторы смешанного возбуждения.

2. Основные величины, характеризующие работу генераторов постоянного тока.

Таковыми основными величинами являются:

- а) напряжение на зажимах генератора U ;
- б) ЭДС генератора E ;
- в) ток возбуждения $I_{\text{в}}$;
- г) ток якоря $I_{\text{а}}$;
- д) ток нагрузки I ;
- е) частота вращения n ;

Корабельные генераторы во всех режимах работают с постоянной частотой вращения, поэтому основные характеристики снимаются при $n = \text{const}$.

Следовательно, при работе генераторов переменными величинами могут быть: U , E , $I_{\text{а}}$, $I_{\text{в}}$, I .

Свойства генераторов проще всего и нагляднее выясняются графическим путём при помощи кривых, которые называются характеристиками генератора.

3. Характеристики генераторов постоянного тока

Характеристиками генератора называются кривые, представляющие собой зависимости какой-нибудь одной величины, характеризующей работу генератора, от другой – при постоянстве остальных величин.

Основными характеристиками являются:

- 1. Характеристика холостого хода.
- 2. Внешняя характеристика.
- 3. Регулировочная характеристика.

Основные характеристики позволяют в наглядной форме производить анализ свойств генераторов, которые в основном определяются способом возбуждения машины.

3.1. Основные характеристики генератора независимого возбуждения (ГНВ)

Обмотка возбуждения генератора с независимым возбуждением получает питание от постороннего источника постоянного тока (рис. 1).

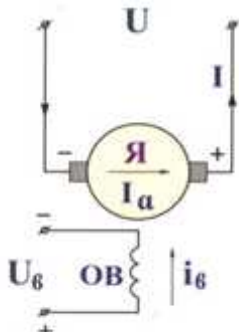


Рис. 1. Генератор независимого возбуждения

В качестве источника может использоваться: аккумуляторная батарея, сеть постоянного тока или специальный генератор, называемый в этом случае возбудителем.

а) Характеристика холостого хода. Представляет зависимость $U = f(I_e)$, при $n = \text{const}$, $I = 0$ и $P_2 = 0$. Характеристика снимается экспериментально (рис. 2).

Характеристика холостого хода (х.х.) генератора в соответствующем масштабе является характеристикой намагничивания машины: $\Phi = f(F_e)$.

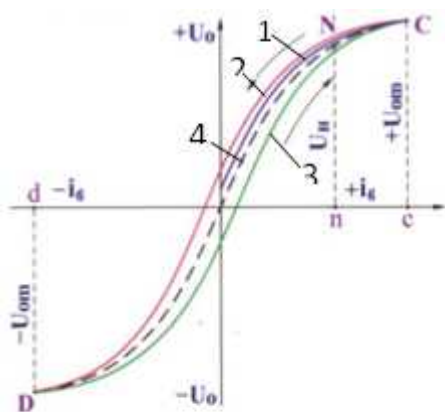


Рис. 2. Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения

Снятие характеристики начинается с $I_e = 0$. При этом на зажимах генератора имеется некоторое напряжение U_0 – 2 – 3 % от U_H , обусловленное остаточным магнитным потоком.

При увеличении I_e напряжение растет по кривой 1. Доводят напряжение до $U_m = 1,2 U_H$.

Затем I_e уменьшают до 0, после чего меняют его направление и увеличивают до $-I_{em}$.

Напряжение меняется от $+U_m$ до $-U_m$ по кривой 2, называемой нисходящей ветвью.

Кривая 3 – восходящая ветвь х.х.х.

Кривые 2 и 3 образуют гистерезисную петлю.

Кривая 4 – расчетная характеристика х.х., у которой точка номинального напряжения расположена на колене кривой намагничивания.

Это необходимо потому, что на линейном участке будет сильно изменяться U генератора при небольшом изменении тока I_e , а при работе в области насыщения ограничены пределы регулирования.

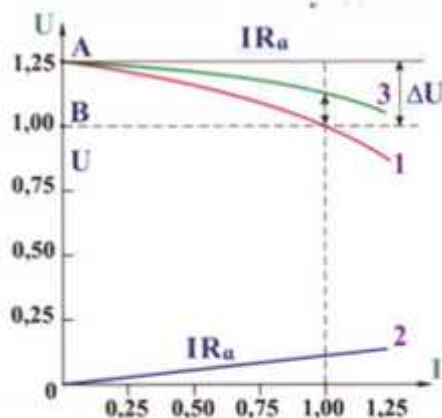


Рис. 3. Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения

У генератора при небольшом изменении тока I_e , а при работе в области насыщения ограничены пределы регулирования.

в) Внешняя характеристика.

Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения (ГНВ) (рис. 3) определяет зависимость напряжения генератора U от тока нагрузки I .

$$U = f(I) \text{ при } I_e = \text{const}, n = \text{const}.$$

При увеличении тока I , напряжение U уменьшается по двум причинам:

- вследствие падения напряжения в цепи якоря $I_a R_a$;
- уменьшение ЭДС E_a , из-за уменьшения магнитного потока под действием поперечной реакции якоря.

По мере увеличения тока I напряжение начинает падать быстрее, т.к. под действием реакции якоря магнитный поток уменьшается и рабочая точка смещается на более круто падающий участок кривой намагничивания генератора.

Падение напряжения ΔU_H называется номинальным изменением напряжения генератора.

Изменение напряжения выражаются в процентах от U_H :

$$\Delta U_H = \frac{U_0 - U_H}{U_H} 100\%. \quad (1)$$

У генераторов независимого возбуждения $\Delta U_H = (5 - 10) \%$.

При коротком замыкании напряжение на его зажимах падает до нуля $U = 0$, а ток короткого замыкания во много раз превосходит номинальный: $I_K = (6 - 15)I_H$.

Поэтому короткое замыкание у генераторов независимого возбуждения чрезвычайно опасно, особенно для коллектора и щеточного аппарата из-за возможности возникновения сильного искрения и кругового огня.

г) Регулировочная характеристика.

Регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения (рис. 4) определяет зависимость тока I_e от тока нагрузки I :

$$I_e = f(I), \text{ при } U = \text{const}, n = \text{const}.$$

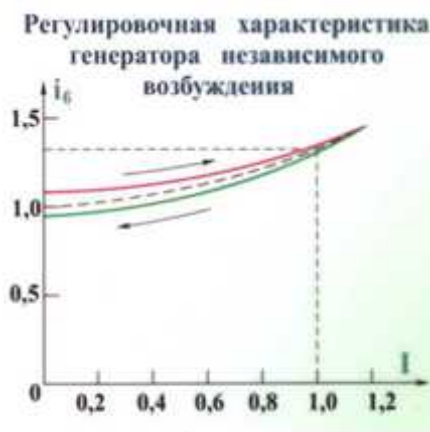


Рис. 4

Регулировочная характеристика показывает, как нужно регулировать ток возбуждения, чтобы при изменении нагрузки, напряжение генератора оставалось неизменным и равным номинальному значению U_H .

С увеличением тока нагрузки I ток возбуждения I_e несколько увеличивается, чтобы компенсировать размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в цепи якоря $I_a R_a$.

При переходе от х.х. при $U = U_H$ к номинальной нагрузке $I = I_H$ увеличение тока возбуждения составляет $15 - 20 \%$.

Таким образом, ГНВ обладает следующими достоинствами:

- возбуждается как при разомкнутой, так и при замкнутой внешней цепи, так как цепь возбуждения независима от цепи возбуждения;

- напряжение генератора (без регулирования током возбуждения) изменяется незначительно в пределах от ХХ до I_H .

Недостатки ГНВ:

- требует наличия постороннего источника э/э;
- не допускает коротких замыканий, поскольку в момент замыкания ЭДС генератора продолжает оставаться значительной, а сопротивление внешней цепи равно нулю.

ГНВ применяются:

- в качестве генераторов низкого напряжения (5 - 24 В);
- в качестве генераторов высокого напряжения (600 В и выше);
- в качестве генераторов большой мощности, требующих широкую регулировку напряжения.

3.2. Основные характеристики генератора параллельного возбуждения (ГПВ) (рис. 5).

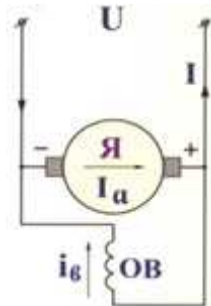


Рис. 5. Генератор параллельного возбуждения

Генераторы постоянного тока параллельного, последовательного и смешанного возбуждения, обмотки возбуждения которых электрически связаны с обмотками якоря и не требуют постороннего источника э/э, называются генераторами с самовозбуждением.

Самовозбуждение генератора возможно при выполнении следующих трёх условий:

- наличие в машине потока остаточного намагничивания $\Phi_{ост}$;
- согласное направление $\Phi_{ост}$ и магнитного потока, создаваемого обмоткой возбуждения генератора;
- сопротивление цепи возбуждения должно быть ниже некоторого критического значения, а частота вращения должна быть выше некоторой критической величины: $R_g < R_{кр}$, $n > n_{кр}$.

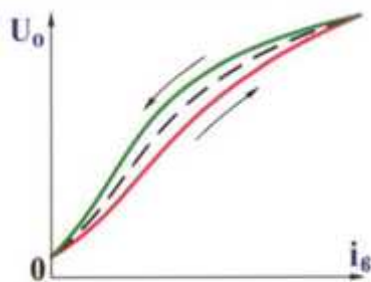


Рис. 6. Характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения

б) Характеристика холостого хода:

$$U = f(I_g) \text{ при } I = 0, n = \text{const.}$$

У генератора параллельного возбуждения ХХХ (рис. 6) может быть снята только в одном квадранте путем регулирования тока возбуждения с помощью регулировочного реостата в цепи возбуждения.

Это обусловлено тем, что процесс самовозбуждения в генераторе может протекать только в одном направлении при согласном действии остаточного магнитного потока и потока, создаваемого током возбуждения.

в) Внешняя характеристика (рис. 7).

$$U = f(I), \quad R_g = \text{const}, \quad n = \text{const}.$$

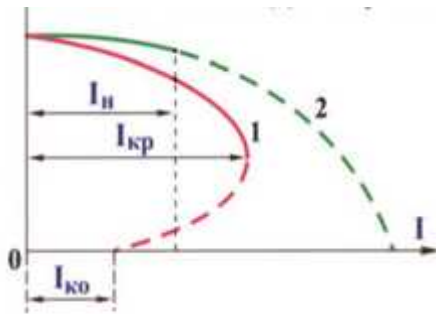


Рис. 7. Внешние характеристики
1 - генератора параллельного возбуждения;
2 - генератора независимого возбуждения

Т.е. при работе генератора в естественных условиях без регулирования в цепи обмотки возбуждения.

Если при независимом возбуждении, при снятии внешней характеристики обеспечивается:

$$I_g = \frac{U_g}{R_g} = \text{const},$$

то при параллельном возбуждении:

$$I_g = \frac{U_g}{R_g} \neq \text{const}.$$

Последнее означает, что у генератора параллельного возбуждения при снятии внешней характеристики ток возбуждения будет изменяться пропорционально изменению напряжения генератора.

Таким образом, уменьшение напряжения генератора параллельного возбуждения при увеличении его нагрузки вызывается не только размагничивающим действием реакции якоря и падением напряжения в цепи якоря $I_a R_a$, но и уменьшением тока возбуждения.

Поскольку у генератора независимого возбуждения уменьшение напряжения, с ростом нагрузки, происходит только под действием первых двух факторов, то его внешняя характеристика проходит выше (кривая 2), чем у генератора параллельного возбуждения (кривая 1):

$$\Delta U_H = \frac{U_0 - U_H}{U_H} 100 = (10 - 15)\%. \quad (2)$$

У генератора независимого возбуждения $I_g = \text{const}$, и при постепенном уменьшении сопротивления R_H , ток I будет непрерывно расти и достигнет своего наибольшего значения при $R_H = 0$, т.е. при коротком замыкании генератора.

При параллельном возбуждении $I_g \neq \text{const}$ и при постепенном уменьшении нагрузки R_H ток I увеличивается до некоторого критического значения $I_{кр} = (2 - 2,5)I_H$, а затем начинает уменьшаться и при к.з. генератора ($R_H = 0$), $I_{кз} < I_H$. Величина установившегося тока к.з. $I_{кз}$ относительно небольшая и определяется остаточным магнитным потоком, т.к. в данном случае $U = 0$, и поэтому $I_g = 0$.

Такой характер изменения тока I у генератора параллельного возбуждения при постепенном уменьшении сопротивления нагрузки R_H объясняется следующими причинами.

Ток нагрузки генератора определяется формулой

$$I = \frac{U}{R_H}. \quad (3)$$

Т.е. он зависит от двух факторов:

- напряжения генератора U ;
- сопротивления нагрузки R_H .

При уменьшении сопротивления R_H одновременно с возрастанием тока I будет уменьшаться напряжение на зажимах генератора U .

Вначале, когда магнитная цепь генератора насыщена, магнитный поток Φ при уменьшении тока возбуждения падает не очень значительно.

По этой причине и напряжение U падает сначала медленно. В этот период сопротивление R_H снижается быстрее, чем напряжение U и ток I растет.

В дальнейшем по мере снижения напряжения U и тока возбуждения I_ϕ генератор переходит во все более ненасыщенное состояние и магнитный поток Φ начинает падать пропорционально уменьшению тока возбуждения, т.е. значительно быстрее, чем вначале.

Вследствие этого и напряжение генератора U начинает падать быстрее, чем вначале.

Наступает момент, когда уменьшение напряжения будет опережать уменьшение R_H и ток I , достигнув критического значения $I_{кр}$, начинает уменьшаться.

Точка "а" соответствует переходу х.х.х. с верхней части колена на ее нижний прямолинейный ненасыщенный участок.

Начиная с точки "а", дальнейшее уменьшение сопротивления нагрузки R_H не только не вызывает увеличения тока I , а наоборот происходит уменьшение тока I , т.к. напряжение U падает быстрее сопротивления R_H .

Несмотря на то, что установившийся ток короткого замыкания генератора параллельного возбуждения невелик, внезапное короткое замыкание на зажимах генератора столь же опасно, как и у генератора независимого возбуждения.

Ток внезапного короткого замыкания за короткое время 0,02 - 0,06 с. успевает достигнуть значения в 6 - 15 раз превосходящий I_H .

Объясняется это тем, что вследствие большой индуктивности обмотки возбуждения и индуктирования вихревых токов в массивных частях магнитной цепи, уменьшение магнитного поля (потока) происходит значительно медленнее, чем процесс нарастания тока в цепи якоря.

д) Регулировочная характеристика.

$$I_\phi = f(I), U = \text{const}, n = \text{const}.$$

Незначительно отличается от генератора с независимым возбуждением, т.к. ток возбуждения очень мал, то падение напряжения в цепи якоря $I_a R_a$, также очень мало и не оказывает заметного влияния на напряжение генератора.

Практически регулировочные характеристики генераторов параллельного и независимого возбуждения аналогичны.

3.3. Характеристики генераторов смешанного возбуждения (ГСВ)

Генераторы смешанного возбуждения (рис.8) имеют две обмотки возбуждения: параллельную и последовательную.

Катушки обеих обмоток возбуждения укладываются на главных полюсах машины. Последовательная обмотка может включаться согласно с параллельной или встречно.

При согласном включении МДС обеих обмоток направлены в одну сторону и результирующий магнитный поток генераторов, при нагрузке, увеличивается.

При встречном включении МДС обмоток направлены встречно и результирующий магнитный поток, при нагрузке, уменьшается.

Как правило, применяется согласное включение обмоток.

Свойства генераторов смешанного возбуждения зависят от соотношения МДС обеих обмоток возбуждения. Главную роль, как правило, играет параллельная обмотка.

В номинальном режиме работы МДС параллельной обмотки составляет 80 - 90 % от суммарной МДС обеих обмоток возбуждения.

Последовательная обмотка предназначена для компенсации размагничивающего действия реакции якоря и падения напряжения в цепи якоря, при работе генератора с нагрузкой.

Наличие последовательной обмотки позволяет обеспечить автоматическое регулирование напряжения генератора при изменении тока нагрузки.

а) Характеристика холостого хода

$U = f(I_e), I = 0, n = \text{const}, P_2 = 0$, генератора смешанного возбуждения ничем не отличается от аналогичной характеристики генератора параллельного возбуждения, т.к. в режиме холостого хода, ток последовательной обмотки равен нулю.

Самовозбуждается генератор смешанного возбуждения так же, как и генератор параллельного возбуждения.

в) Внешняя характеристика (рис. 9).

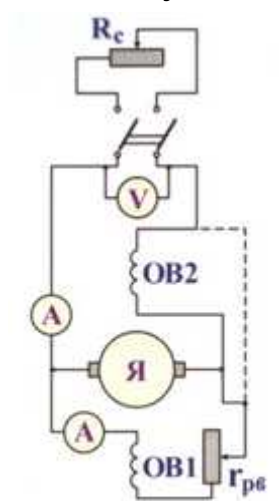


Рис. 8. Генератор смешанного возбуждения

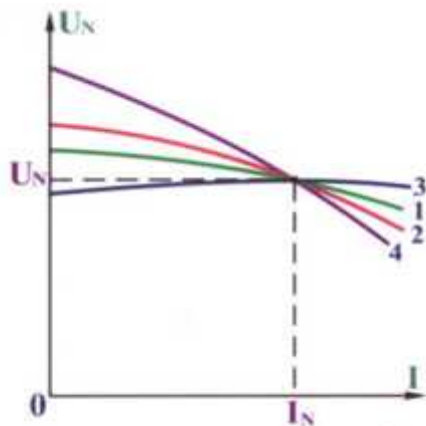


Рис. 9. Сравнение внешних характеристик
1 - генератора независимого возбуждения;
2 - генератора параллельного возбуждения;
3 - генератора смешанного возбуждения с согласным включением последовательной обмотки; 4 - генератора смешанного возбуждения со встречным включением последовательной обмотки

$U = f(I)$, $R_g = const$, $n = const$, генератора смешанного возбуждения.

Для сравнения рассмотрим внешние характеристики:

- а) генератора смешанного возбуждения - (3,4);
- б) независимого возбуждения - (1);
- в) параллельного возбуждения - (2).

Внешние характеристики генератора смешанного возбуждения располагаются выше аналогичных характеристик генераторов независимого и параллельного возбуждения.

Это объясняется тем, что размагничивающее действие реакции якоря и потеря напряжения в якорной цепи, компенсируется последовательной обмоткой.

В генераторе смешанного возбуждения, по мере увеличения нагрузки, напряжение на зажимах изменяется очень незначительно (кр.1).

При увеличении тока, выше номинального, компенсирующее действие последовательной обмотки уменьшается из-за насыщения магнитной системы и напряжение генератора снижается.

Если же требуется скомпенсировать еще и падение напряжения в линии электропередачи, т.е. чтобы напряжение в конце линии оставалось неизменным, то число витков обмотки (последовательной) увеличивают и

внешняя характеристика имеет вид (2).

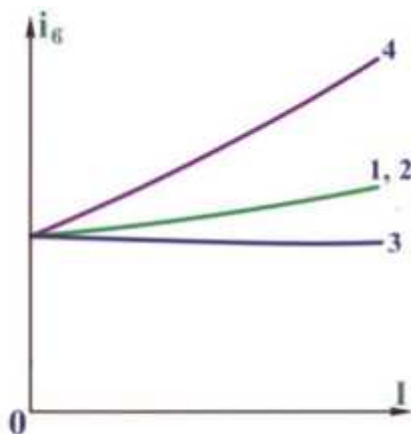


Рис. 10. Сравнение регулировочных характеристик
1 - генератора независимого возбуждения;
2 - генератора параллельного возбуждения;
3 - генератора смешанного возбуждения с согласным включением последовательной обмотки; 4 - генератора смешанного возбуждения с встречным включением последовательной обмотки

В случае встречного включения последовательной и параллельной обмоток, возбуждение и напряжение генератора, с ростом тока нагрузки, будут резко уменьшаться и внешняя характеристика получится крутопадающей (4).

г) Регулировочная характеристика (рис. 10)

$$I_g = f(I), U = const, n = const,$$

генератора смешанного возбуждения представлена кривой (1).

Для сравнения берется характеристика генератора независимого возбуждения (2) и параллельного (3) возбуждения.

Поскольку при работе генератора с нагрузкой МДС последовательной обмотки

компенсирует размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в цепи якоря.

Как показывает кривая (1), для поддержания постоянства напряжения при изменении тока нагрузки от $I = 0$ до $I = I_H$ ток I_v изменяется очень незначительно, кривая (4), при встречном включении обмоток.

ГСВ обладают следующими свойствами:

- возбуждается как при разомкнутой, так и при замкнутой внешней цепи;
- при изменении нагрузки от 0 до I_H напряжение генератора при согласном включении обмоток практически остаётся неизменным, а при встречном меняется;
- при согласном включении обмоток возбуждения генератор не допускает КЗ, так как последовательная обмотка поддерживает напряжение на зажимах генератора, вследствие чего сила КЗ может достигать опасных значений для целостности машины.

Генераторы смешанного возбуждения, обладая хорошими свойствами, и в частности устойчивостью напряжения, широко применяются в качестве основных источников постоянного тока.

Выводы:

1. В зависимости от типа первичного двигателя генераторы подразделяются на: турбогенераторы, газотурбогенераторы, дизель-генераторы и электромашинные преобразователи.
2. В зависимости от способа включения обмоток возбуждения ГПТ делятся на: генераторы параллельного возбуждения; генераторы последовательного возбуждения и генераторы смешанного возбуждения.
3. Основными характеристиками генераторов являются: характеристика холостого хода, внешняя характеристика и регулировочная характеристика.

ЛЕКЦИЯ 27

Тема: Двигатели постоянного тока

Учебные вопросы:

Введение.

1. Принцип саморегулирования двигателей постоянного тока.
2. Характеристики двигателей постоянного тока.
3. Способы пуска, регулирования частоты вращения и реверса двигателей постоянного тока.

Выводы.

Учебная литература:

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 360 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. Ч.1 – 360 с., ч.2 – 332 с.
4. Просужих Р. П. Лабораторные работы по электрическим машинам. Севастополь, 1983.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1987. - 832 с.

Введение.

Электрические машины, преобразующие электрическую энергию в механическую, называются электродвигателями.

Благодаря своим хорошим регулировочным свойствам двигатели постоянного тока нашли широкое распространение в промышленности. В тех случаях, когда по условиям работы установки требуется широкое изменение частоты вращения, применение для них двигателей постоянного тока во многих случаях является более предпочтительным, чем двигателей переменного тока.

Они используются в металлургической промышленности, станкостроении, для создания систем автоматического регулирования и т.д. Широкое применение двигатели постоянного тока находят в авиации, автомобилестроении, на судах, транспорте.

Мощности, на которые выпускаются эти двигатели, лежат в пределах от нескольких ватт до нескольких тысяч киловатт.

За номинальную мощность двигателя принимается механическая мощность на валу P_2 . Эта мощность обычно указывается на щитке, закрепленном на корпусе машины.

Кроме мощности там указываются и другие соответствующие ей номинальные величины: напряжение U , ток I , частота вращения n .

В зависимости от способа соединения обмоток возбуждения по отношению к якору двигателя постоянного тока подразделяют аналогично генераторам:

- на двигатели независимого возбуждения;
- параллельного возбуждения;
- последовательного возбуждения;
- смешанного возбуждения.

В двигателях параллельного возбуждения общий ток, поступающий из сети: $I = I_a + I_g$.

В двигателях независимого возбуждения: $I = I_a$.

В двигателях последовательного возбуждения: $I = I_a = I_g$.

1. Принцип саморегулирования двигателей постоянного тока

Все электрические двигатели обладают свойством саморегулирования.

Сущность принципа саморегулирования состоит в том, что в соответствии с изменением нагрузки на валу изменяются ток и мощность, потребляемые из сети.

Всё это осуществляется без помощи каких-либо специальных регуляторов, которые необходимы для двигателей внутреннего сгорания, паровых и газовых турбин.

Основные условия работы э/д выражаются уравнениями равновесия ЭДС и моментов:

$$U = E_a + I_a R_a; \quad M = M_T, \quad (1)$$

где M - вращающий момент э/д; M_T - тормозной момент на валу э/д.

В общем случае M_T складывается из:

- 1) M_0 – момента холостого хода, создаваемого силами трения;
- 2) M_H – момента нагрузки, создаваемого внешними силами;
- 3) M_J – момента сил инерции вращающихся частей.

(динамического момента), создаваемого силами инерции, при неустановившемся режиме работы э/д.

При пуске, торможении или регулирования частоты вращения э/д под нагрузкой вращающий момент э/д равен:

$$M = M_0 + M_H + M_J. \quad (2)$$

Если

$$n = \text{const}, \text{ то } M_J = J \frac{d\omega}{dt} = 0, \quad (3)$$

где $J = \frac{GD^2}{375}.$

$M = M_0 + M_H$ - называется статическим моментом сопротивления.

Электродвигатель работает при переходе с одного режима на другой устойчиво, без каких-либо регуляторов.

$$\left. \begin{aligned} \uparrow M_T > M \rightarrow \downarrow n \rightarrow \downarrow E = C_e \downarrow (n)\Phi \rightarrow \uparrow I_a = \frac{U - \downarrow (C_e n \Phi)}{R_a} \rightarrow \\ \rightarrow \uparrow M = C_M \Phi \uparrow (I_a) \rightarrow M = M_T. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

1. Характеристики двигателей постоянного тока.

Свойства всех вообще двигателей, и в частности двигателей постоянного тока (ДПТ), определяются по совокупности следующих параметров и характеристик.

Параметр – это число, характеризующее какое либо качество электродвигателя.

Характеристиками двигателя называются кривые, представляющие собой зависимости какой-нибудь одной величины, характеризующей работу двигателя, от другой – при постоянстве остальных величин.

Основными параметрами и характеристиками являются:

1. Пусковые параметры.
2. Рабочие характеристики.
3. Механические характеристики.
4. Регулировочные характеристики.

2.1. Пусковые параметры

Пусковые параметры определяют собой пусковую операцию от момента пуска двигателя в ход до момента перехода к установившемуся режиму работы.

К ним относятся:

- а) Пусковой ток I_{Π} , определяемый обычно кратностью пускового тока:

$$K_I = \frac{I_{\Pi}}{I_H}, \quad (5)$$

где I_{Π} - ток якоря э/д в момент пуска; I_H - номинальный ток якоря.

- б) Кратность пускового момента:

$$K_M = \frac{M_{\Pi}}{M_H}, \quad (6)$$

где $M_{\Pi} = C_M \Phi_{\Pi} I_{\Pi}$ - пусковой момент, момент э/д в момент пуска; M_H - номинальный момент э/д; Φ_{Π} - магнитный поток двигателя в момент пуска.

- в) Время пуска, время от момента пуска до достижения двигателем номинальных параметров (n_H, I_H, M_H, Φ_H).

- г) Экономичность операции пуска, определяемая количеством затраченной при пуске энергии.

- д) Стоимость и надежность пусковой аппаратуры.

2.2. Рабочие характеристики

Рабочие характеристики, под которыми понимают зависимость n, M, η от полной мощности P_2 , или I_a , при $U = const$, и постоянном сопротивлении в цепи якоря и цепи возбуждения (рис. 1).

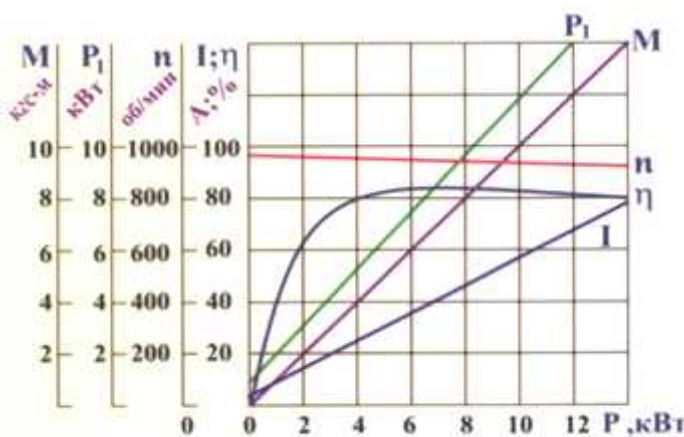


Рис. 1. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

Зависимость $n = f_1(I_a)$ называется скоростной (электромеханической) характеристикой.

Зависимость $M = f_2(I_a)$ называется моментной характеристикой.

Зависимость $\eta = f_3(I_a)$ называется характеристикой КПД.

2.3. Механические характеристики

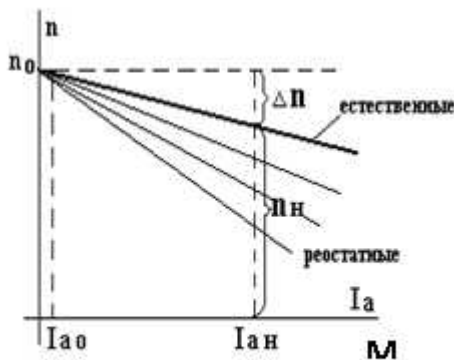


Рис. 2. Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения

Механические характеристики, представляют собой зависимость $n = f(M)$, при $U_H = const$ и постоянном сопротивлением в цепи якоря и обмотке возбуждения (рис. 2).

При постоянстве магнитного потока механические характеристики двигателя параллельного возбуждения (рис. 1) представляют собой прямые линии, наклон которых определяется отношением $\frac{\Delta n}{n_0}$.

2.4. Регулировочные характеристики, представляют зависимость $n = f(I_a)$, при $I_a = const$, $U = const$.

Они определяют свойства двигателя при регулировании частоты вращения.

Кроме регулировочных характеристик используют показатели регулирования:

- диапазон регулирования;
- плавность регулирования;
- направление регулирования;
- экономичность регулирования;
- простота регулирования.

3. Способы пуска, регулирования частоты вращения и реверса двигателей постоянного тока

3.1. Способы пуска электродвигателей постоянного тока

Для того чтобы пустить э/д необходимо подать питание на обмотку якоря и обмотку возбуждения двигателя.

Это можно осуществить по-разному вне зависимости от способа возбуждения двигателя.

При этом необходимо обеспечить возможно больший пусковой момент двигателя с одновременным ограничением его пускового тока.

Это требование выполняется при максимальном магнитном потоке пускаемого двигателя.

Применяют следующие способы пуска двигателя:

1. прямой пуск (подключение на полное напряжение).
2. пуск с помощью пускового реостата.
3. пуск двигателя при пониженном напряжении (для больших машин).

а). При прямом пуске цепь якоря включается на полное напряжение, при этом заранее подается ток в обмотку возбуждения.

Основное преимущество данного способа – простота и дешевизна. Однако его применение ограничено мощностью двигателя, т.к. получаются очень большие токи в якоре.

Из уравнения равновесия ЭДС двигателя следует:

$$I_a = \frac{U - C_e n \Phi}{R_a + R_{доб}}. \quad (7)$$

Так как $R_{доб} = 0$, и при пуске $n = 0$, тогда ток в якоре: $I_{ап} = \frac{U}{R_a}$, R_a - очень мало и $I_a = 8 - 10 I_{ан}$.

В данном случае ток ограничивается резким увеличением сопротивления в щеточном контакте.

Кроме того, благодаря индуктивности цепи якоря, максимум тока наступает не в момент включения двигателя, а несколько позже, когда частота вращения n и ЭДС E_a уже не равны нулю.

При большом токе может образоваться искрение на коллекторе, а на валу двигателя возникает большой динамический момент, вредный для двигателя и приводного механизма.

Большой ток снижает напряжение сети, что бывает на кораблях.

Осциллограмма прямого пуска двигателя имеет следующий вид (рис. 3).

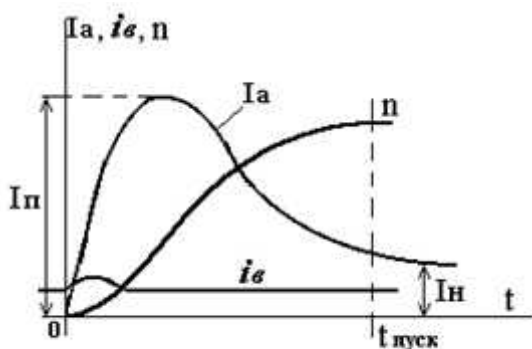


Рис. 3. Пуск двигателя постоянного тока

Пусковой ток равен:

$$I_a = \frac{U}{R_a + R_{п}}. \quad (8)$$

Обычно при пуске: $\Phi = \Phi_H$ и $M_{п}$

$\gg M_H$, $t_{пуск} = 0,1 - 0,3c$.

б) Пуск с помощью пускового реостата.

Этот способ пуска наиболее распространен (рис. 4).

При переводе рукоятки пускового реостата с нулевого положения на контакт 1, двигатель возбуждается и через якорь пойдет ток.

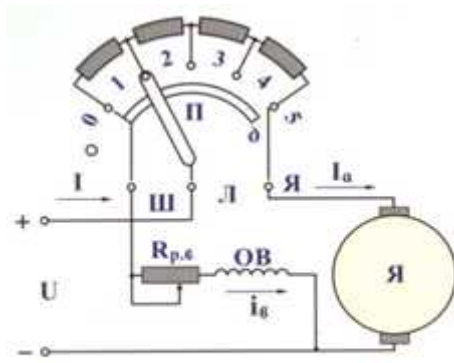


Рис. 4. Пуск двигателя параллельного возбуждения с помощью пускового реостата

Сопротивление R_{Π} рассчитывается такой величины, чтобы пусковой ток был равен $I_a = (1,4 - 2,5)I_H$.

Для ускорения запуска двигателя необходимо, чтобы он развивал возможно больший пусковой момент. Поэтому ток возбуждения при пуске должен быть максимальным.

Для этого сопротивление R_e должно быть полностью выведено. Цепь обмотки возбуждения OB подключается к контактной дуге $КД$, по которой скользит контакт рукоятки реостата, и в течение всего пуска находится под полным напряжением сети.

Поэтому для двигателей параллельного возбуждения можно принять, что в период пуска $\Phi = const$, и вращающий момент $M = e_M \Phi I_a$ изменяется пропорционально току I_a .

Поэтому для двигателей параллельного возбуждения можно принять, что в период пуска $\Phi = const$, и вращающий момент $M = e_M \Phi I_a$ изменяется пропорционально току I_a .

С появлением тока якоря I_a и тока возбуждения I_e возникает электромагнитный момент M и если он больше момента сопротивления M_{CT} , то двигатель придет во вращение и частота n будет расти.

При этом в якоре будет индуцироваться ЭДС E_a . С появлением ЭДС E_a пусковой ток в цепи якоря I_a определяется формулой

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a + R_{\Pi}}. \quad (9)$$

По мере увеличения частоты вращения n ЭДС E_a будет увеличиваться, а ток якоря уменьшаться (рис. 5).

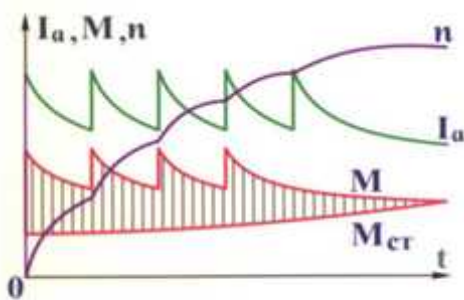


Рис. 5. Зависимости тока, момента и частоты вращения от времени при пуске двигателя

Когда ток I_a уменьшится до $I_a = 1,3I_H$ рукоятка переводится в положение 2. При этом выводится из цепи якоря первая ступень пускового реостата.

Вследствие уменьшения R_{Π} , ток I_a возрастет, поэтому увеличивается вращающий момент M и будет расти частота вращения n .

В результате роста частоты увеличивается ЭДС E_a , а ток в цепи якоря вновь будет уменьшаться.

Аналогично протекает процесс при поочередном выводе остальных ступеней пускового реостата. Когда рукоятка пускового реостата будет переведена в положение 4, двигатель достигает установившегося режима работы.

Ступени сопротивления реостата по условиям нагрева рассчитываются только для работы на период пуска.

Остановка двигателя осуществляется быстрым переводом рукоятки пускового реостата в нулевое положение или рубильником.

При отключении двигателя от сети необходимо, чтобы цепь обмотки возбуждения не размыкалась, т.к. в противном случае в этой цепи возникает большая ЭДС самоиндукции:

$$e_L = -L_{\epsilon} \frac{dI_{\epsilon}}{dt}. \quad (10)$$

Достоинства реостатного пуска:

- возможность уменьшения пускового тока до необходимых величин;
- возможность получения плавного пуска.

Недостатки:

- большие потери в пусковом сопротивлении;
- увеличение сложности и массогабаритных показателей пусковой аппаратуры.

в) Пуск при пониженном напряжении (рис. 6, 7).

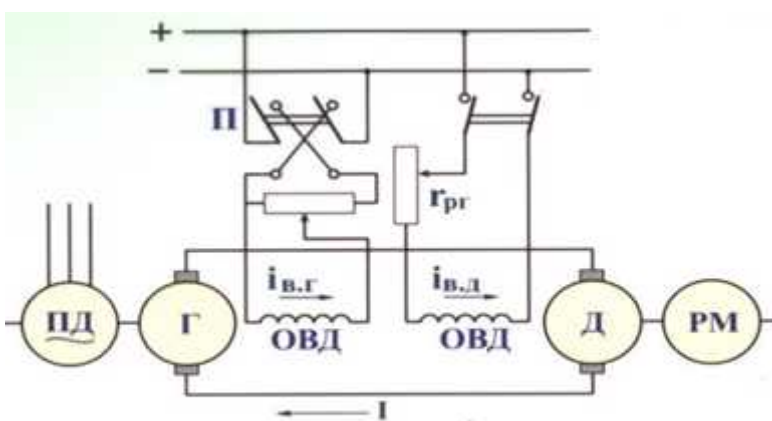


Рис. 6. Схема агрегата генератор-двигатель для пуска двигателя независимого возбуждения

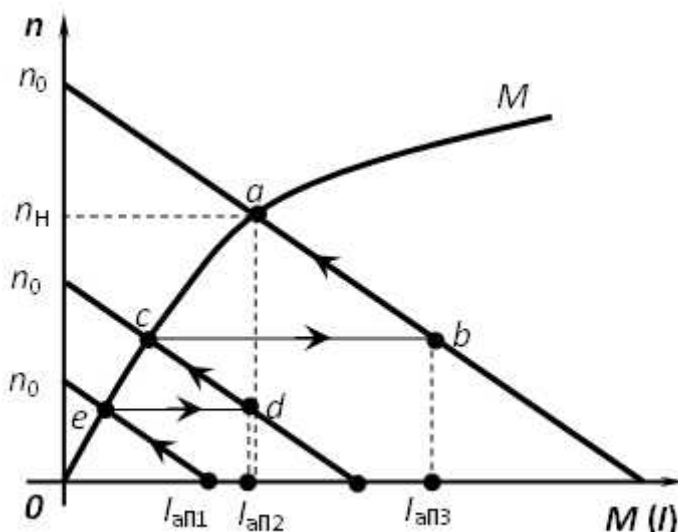


Рис. 7. Пуск двигателя при пониженном напряжении

Этот способ можно осуществить, если двигатель получит питание от отдельного источника тока с регулируемым напряжением.

Например, в системе генератор – двигатель, где источником электрической энергии для двигателя служит отдельный генератор постоянного тока, напряжение которого можно регулировать в широких пределах.

$$\downarrow I_{aП} = \frac{U \downarrow}{R_a}. \quad (11)$$

Достоинства:

- уменьшение пускового тока до необходимых величин;
- возможность получения плавного пуска при использовании системы Г - Д.

Недостатки:

- большой бросок тока при ступенчатом изменении напряжения;
- усложнение системы при использовании системы Г - Д.

3.2. Способы регулирования частоты вращения электродвигателей постоянного тока

Двигатели постоянного тока позволяют осуществлять плавное и достаточно экономичное регулирование частоты вращения в широких пределах.

Это является ценным преимуществом ДПТ по сравнению с э/д переменного тока и делает их в ряде случаев незаменимыми.

Частота вращения э/д постоянного тока определяется выражением, полученным из уравнения равновесия ЭДС:

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_{доб})}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I_a(R_a + R_{доб})}{C_e \Phi}, \quad (12)$$

где $R_{доб}$ - пускорегулировочное сопротивление, включенное последовательно в цепь якоря.

Из этого выражения, следует, что частоту вращения э/д постоянного тока можно регулировать тремя способами:

- 1) Изменением напряжения сети подводимого к цепи якоря.
- 2) Изменением падения напряжения в цепи якоря $I_a \sum R_a$.
- 3) Изменением потока возбуждения.

Регулирование частоты вращения изменением напряжения сети подводимого к цепи якоря.

Этот способ регулирования возможен только в специальных установках, допускающих регулирование напряжения, особенно по системе Г - Д.

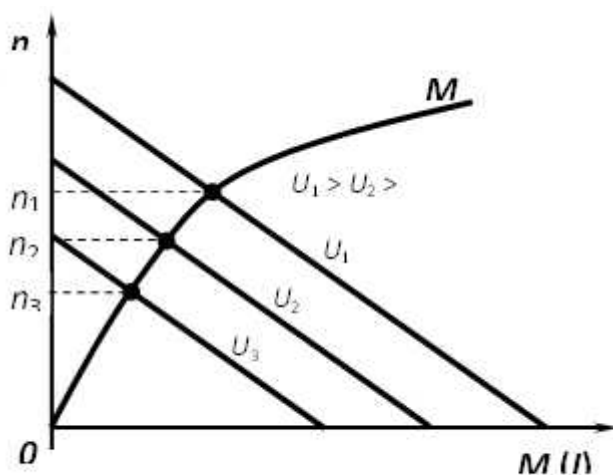


Рис. 8. Регулирование частоты вращения изменением подводимого напряжения

Регулирование этим способом производится при постоянстве магнитного потока (это возможно только при независимом возбуждении).

Из выражения (12) видно, что n прямо пропорционально подводимому напряжению.

При регулировании этим способом все механические характеристики представляют собой семейство прямых, параллельных друг другу (рис. 8). Причём каждая из этих прямых соответствует определённому значению напряжения и располагается тем ближе к оси абсцисс, чем меньше величина последнего.

Регулирование частоты вращения изменением падения напряжения в цепи якоря.

Оно осуществляется при $U = \text{const}$; $I_b = \text{const}$ и переменном сопротивлении в цепи якоря.

Для этого последовательно в цепь якоря включается регулировочный реостат $R_{\text{рег}}$, который в отличие от пускового реостата рассчитывается на длительное прохождение номинального тока двигателя (рис. 9).

Тогда

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I_a(R_a + R_{\text{рег}})}{C_e \Phi}. \quad (13)$$

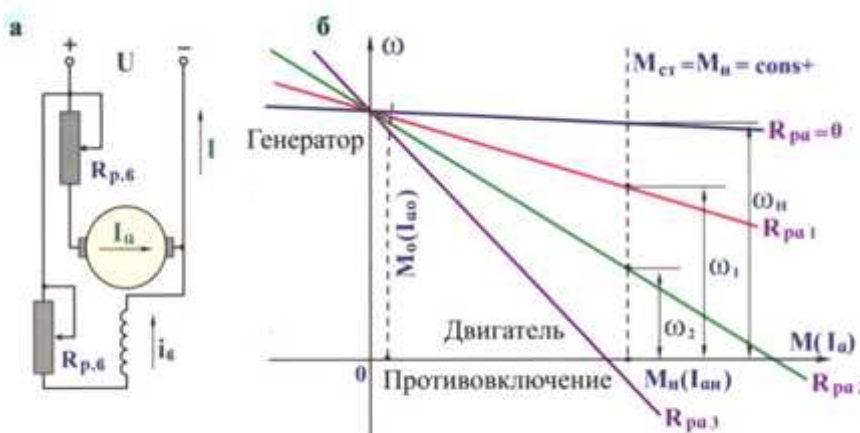


Рис. 9. Схема регулирования частоты вращения двигателя параллельного возбуждения с помощью сопротивления в цепи якоря (а) и соответствующие механические и скоростные характеристики (б)

По мере увеличения сопротивления $R_{\text{рег}}$, падение напряжения в цепи якоря возрастает, а частота вращения двигателя уменьшается, достигая своего наименьшего значения при максимальном значении $R_{\text{рег}}$.

Данный способ регулирования используется редко, из-за низкой экономичности вследствие больших потерь энергии в регулировочном реостате.

Регулирования частоты вращения изменением магнитного потока.

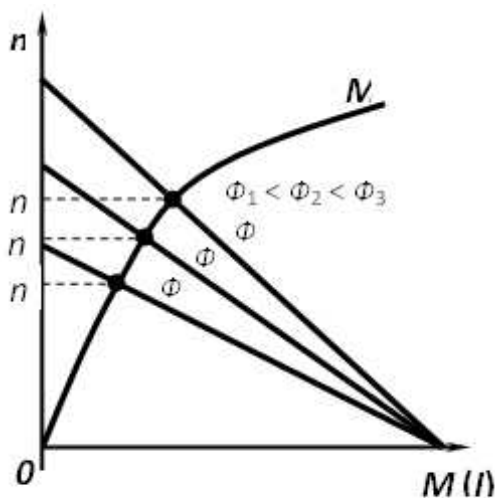


Рис. 10. Регулирование частоты вращения изменением возбуждения

Сущность этого способа заключается в том, что реостатом в цепи обмотки возбуждения двигателя изменяют поток возбуждения Φ , а следовательно и n .

При условии $U = \text{const}$ и $\sum R_a = \text{const}$ следует, что с введением сопротивления реостата частота вращения изменяется обратно пропорционально изменению магнитного потока (рис. 10).

Механические характеристики э/д для различных значений Φ представляют собой семейство прямых пересекающихся ось абсцисс в точке, соответствующей пусковому моменту (рис. 10).

Преимущества данного способа регулирования:

- большая плавность регулирования;
- простота регулирования;
- экономичность регулирования.

Недостатки:

- относительно неширокий диапазон регулирования;
- регулирования частоты вращения только вверх от номинальной.

Реверс двигателя.

Реверсом э/д постоянного тока называется изменение направления вращения якоря двигателя.

Для реверса двигателя необходимо изменить действия электромагнитного вращающего момента:

$$M_a = C_M \Phi I_a. \quad (14)$$

Из формулы видно, что для изменения знака вращающего момента, надо изменить направление тока якоря I_a , или полярность главных полюсов (рис. 11). Если изменить Φ и I_a на противоположное направление, вращение не изменится.

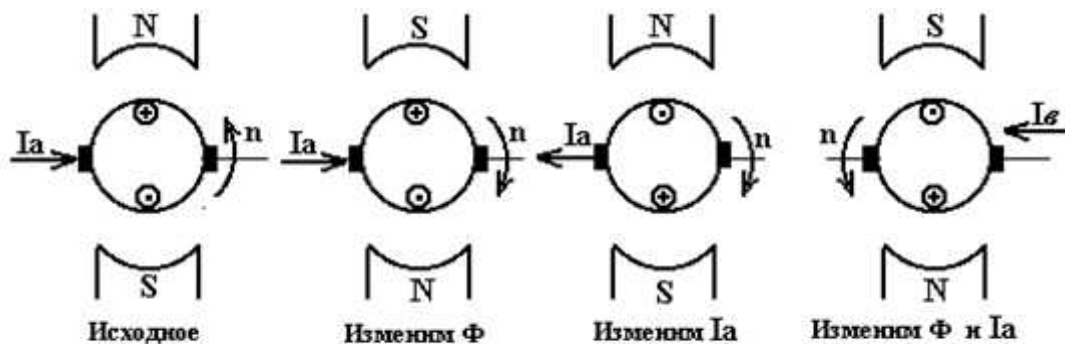


Рис. 11

Основными достоинствами способа реверса изменением тока якоря (противотоком) являются:

- малое время протекания переходного процесса;
- возможность быстрого осуществления всех операций реверса;
- сравнительная простота и надежность.

Основными недостатками способа реверса противотоком являются:

- увеличение массогабаритных показателей аппаратуры управления;
- большие броски тока и момента якоря.

При осуществлении реверса за счет изменения направления магнитного потока уменьшает недостатки, отмеченные при реверсе противотоком, но увеличивается время совершения реверса.

Выводы:

1. Способ пуска э/д выбирается в зависимости от мощности, заданных режимов работы и особенностей сети питания.
2. Способ регулирования частоты вращения э/д выбирается из условий экономичности, плавности и диапазона регулирования.
3. Для э/д малой и средней мощности приемлемый реверс противотоком, а для э/д большой мощности – реверс изменением направления магнитного потока.

4. ТЕЗАУРУС ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ

1. **Аварийный режим трансформатора** - режим работы, при котором напряжение или ток обмотки, или части обмотки таковы, что при достаточной продолжительности это угрожает повреждением или разрушением трансформатора.

2. **Автотрансформатор** – трансформатор, две или более обмоток которого гальванически связаны так, что они имеют общую часть.

3. **Агрегат преобразования частоты** – двигатель-генератор, с помощью которого переменный ток одной частоты преобразуется в переменный ток другой частоты.

4. **Активная мощность P** – производная физическая величина, характеризующая количество электрической энергии в единицу времени, которое в электрической цепи переменного тока преобразуется в другой вид энергии, не связанный с цепью (тепловую, механическую, химическую т.п.), и равная среднему значению мгновенной мощности за период переменного тока: $P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt$.

5. **Активное сопротивление электрической цепи** – производная физическая величина, характеризующая противодействие электрической цепи переменному току за счет возникновения эффектов поверхностного вытеснения тока и эффекта близости в проводниках, обусловленных появлением противоположно направленных электрических полей за счет учета переменных магнитных полей внутри сечения проводников и равная отношению активной мощности, поглощаемой в цепи, к квадрату действующего значения тока на входе этой цепи.

6. **Амплитудным значением переменного тока I_m** называется максимальное по модулю значение мгновенного тока за период

7. **Асинхронная электрическая машина** – это электрическая машина переменного тока, у которой частота вращения ротора не равна частоте вращения магнитного поля статора.

8. **Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором** – асинхронная машина, у которой ротор выполнен в виде беличьей клетки.

9. **Асинхронный электродвигатель** – это электрическая асинхронная машина, работающая в двигательном режиме.

10. **Асинхронный глубокопазный двигатель** – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и увеличенной высотой стержней беличьей клетки.

11. **Асинхронный двигатель с массивным ротором** – асинхронный двигатель, у которого ротор выполнен сплошным из магнитомягкого или немагнитного материала, обладающего электропроводностью.

12. **Бак трансформатора** – бак, в котором размещается активная часть трансформатора жидким диэлектриком.

13. **Безопасный разделительный трансформатор** – разделительный трансформатор, предназначенный для питания цепей сверхнизким безопасным напряжением.

14. **Бесконтактная машина** – вращающаяся электрическая машина, в которой все электрические связи обмоток, участвующих в основном процессе преобразования энергии, осуществляются без применения коммутирующих или скользящих электрических контактов.

15. **Безотказность** – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

16. **Брызгозащищенное электротехническое изделие** (электротехническое устройство, электрооборудование) – защищенное электротехническое изделие (электротехническое устройство, электрооборудование), выполненное так, что исключается попадание внутрь его оболочки брызг, падающих под любым углом к вертикали.

17. **Взрывозащищенное электротехническое изделие** (электротехническое устройство, электрооборудование) – электротехническое изделие (электротехническое устройство, электрооборудование) специального назначения, которое выполнено таким образом, что устранена или затруднена возможность воспламенения окружающей его взрывоопасной среды вследствие эксплуатации этого изделия.

18. **Вероятность безотказной работы** – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

19. **Внезапный отказ** – отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта.

20. **Внешняя характеристика генератора** – зависимость напряжения на обмотке якоря генератора от тока нагрузки в заданных условиях при номинальной частоте вращения и неизменных внешних сопротивлениях в цепях обмоток возбуждения.

21. **Водозащищенное электротехническое изделие** (электротехническое устройство, электрооборудование) – защищенное электротехническое изделие (электротехническое устройство, электрооборудование), выпол-

ненное так, что при обливании его водой исключается ее попадание внутрь оболочки.

22. Возбудитель – генератор, который вырабатывает всю или часть энергии, требуемой для возбуждения электрической машины.

23. Возбуждение электрической машины – создание магнитного потока в электрической машине током в какой-либо из ее обмоток или постоянными магнитами.

24. Воздушный трансформатор – сухой негерметичный трансформатор, в котором основной изолирующей и охлаждающей средой служит атмосферный воздух.

25. Вращающаяся электрическая машина – электротехническое устройство, предназначенное для преобразования энергии на основе электромагнитной индукции и взаимодействия магнитного поля с электрическим током, содержащее, но крайней мере, две части, участвующие в основном процессе преобразования и имеющие возможность вращаться или поворачиваться относительно друг друга.

26. Вспомогательная обмотка – обмотка трансформатора, не предназначенная непосредственно для приема энергии преобразуемого или отдачи энергии преобразованного переменного тока или мощность которой существенно меньше номинальной мощности трансформатора.

27. Встроенный трансформатор – трансформатор, который вмонтирован в электрический бытовой прибор или в оборудование определенного назначения.

28. Вторичная обмотка трансформатора – обмотка трансформатора, от которой отводится энергия преобразованного переменного тока.

29. Вторичная обмотка (трансформатора напряжения) – обмотка, которая питает цепи напряжения измерительных приборов, счетчиков, устройств защиты и (или) управления.

30. Вторичная обмотка (трансформатора тока) – обмотка, которая питает токовые цепи измерительных приборов, счетчиков, устройств защиты и (или) управления.

31. Вывод электротехнического изделия (устройства) (клемма) – часть электротехнического изделия (устройства), предназначенная для электрического соединения его с другими изделиями (устройствами).

32. Высшее напряжение трансформатора – наибольшее из номинальных напряжений обмоток трансформатора.

33. Выпадение из синхронизма синхронной машины – нарушение устойчивости параллельной работы синхронной машины с питающей сетью при синхронной частоте вращения, в результате которого она начинает вращаться с асинхронной частотой.

34. Генератор – электрическая машина, преобразующая механическую энергию в электрическую.

35. Генератор переменного тока – генератор, вырабатывающий переменный ток и напряжение.

36. Генератор постоянного тока – генератор, вырабатывающий постоянный ток и напряжение.

37. Герметичное электротехническое устройство (электрооборудование) – защищенное электротехническое устройство (электрооборудование), выполненное с такой оболочкой, что практически исключена возможность сообщения между его внутренним пространством и окружающей средой.

38. Гидрогенератор – синхронный генератор, приводимый во вращение от гидравлической турбины.

39. Главная изоляция обмотки – изоляция обмотки от частей остова и от других обмоток.

40. Грубая синхронизация синхронной машины – синхронизация синхронной машины путем включения ее в сеть без возбуждения при частоте вращения, близкой к синхронной с последующим включением возбуждения.

41. Группа соединений обмоток трансформатора – угловое смещение векторов линейных электродвижущих сил обмоток (сторон) среднего и низшего напряжений по отношению к векторам соответствующих электродвижущих сил обмотки (стороны) высшего напряжения.

42. Двигатель – машина, преобразующая электрическую энергию в механическую.

43. Двигатель малой мощности – двигатель с длительной номинальной мощностью, не превышающей условно принятого предела 1,1 кВт при 1500 об/мин.

44. Двигатель общего назначения – двигатель, сконструированный, внесенный в каталог и поставленный в соответствии со стандартизированными рабочими характеристиками и имеющий механическую конструкцию, позволяющую эксплуатировать его в обычных условиях, без каких-либо специальных ограничений.

45. Двигатель с фазным ротором (двигатель с контактными кольцами) – двигатель, концы фазных обмоток ротора которого прикреплены к трем медным кольцам, укрепленным на валу ротора и изолированным между собой.

46. Двойная изоляция – электрическая изоляция, состоящая из рабочей и дополнительной изоляции.

47. Двухобмоточный трансформатор – трансформатор, имеющий две основные гальванически не связанные обмотки.

48. Действующим значением переменного тока I является такое значение постоянного тока, которое за время равное периоду переменного тока выделяет на сопротивлении такое же количество тепла, как и пере-

менный ток, и равно амплитудному значению переменного тока, деленному на $\sqrt{2}$.

49. Дизель-генераторный агрегат – это мотор-генератор, установка, состоящая из электродвигателя и генератора электрического тока, механически соединённых между собой.

50. Динамическая устойчивость синхронной машины – способность синхронной машины сохранять устойчивую параллельную работу с питающей сетью с синхронной частотой вращения после колебаний этой частоты, вызванных внезапным нарушением установившегося состояния машины.

51. Добавочные потери в токоведущих частях – потери от токов, наведенных полем рассеяния в токоведущих частях трансформатора.

52. Добавочные потери в элементах конструкций – потери от гистерезиса и вихревых токов, возникающие в металлических деталях трансформатора от воздействия поля рассеяния.

53. Допустимая перегрузка – перегрузка трансформатора (машины), разрешенная нормативным документом.

54. Естественное воздушное охлаждение – охлаждение частей сухого трансформатора (машины) путем естественной конвекции воздуха и частично лучеиспускания в воздухе.

55. Ёмкостное сопротивление электрической цепи X_C – производная физическая величина, характеризующая противодействие электрической цепи с ёмкостью переменному току за счет возникновения противоположно направленного электрического поля, создаваемого заряженными обкладками конденсатора, численно равное обратной величине произведения угловой частоты μ на величину ёмкости C : $X_C = \frac{1}{\mu C}$.

56. Заземление – преднамеренное электрическое соединение какой-либо части электроустановки с заземляющим устройством.

57. Заземленная нейтраль – нейтраль генератора (трансформатора), присоединенная к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление.

58. Заземляющий провод – проводник с малым полным сопротивлением, соединенный с землей.

59. Замедленная коммутация коллекторной машины – коммутация коллекторной машины, при которой средняя скорость изменения тока в коммутируемой секции в первую половину периода коммутации меньше, чем во вторую.

60. Замыкание на корпус – случайное электрическое соединение токоведущих частей с металлическими нетокведущими частями электроустановки.

61. **Защитное заземление** – преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением.

62. **Измерительный трансформатор** – трансформатор, предназначенный для передачи информационного сигнала измерительным приборам, счетчикам, устройствам защиты и (или) управления.

63. **Изоляция** – материал, обычно диэлектрик, препятствующий прохождению тока проводимости.

64. **Инвертор** – преобразователь электрической энергии, который преобразует ток одного направления в систему переменных токов.

65. **Индуктивность L** – производная физическая величина, характеризующая магнитные свойства электрической цепи, численно равная коэффициенту самоиндукции, выражающаяся отношением потокосцепления самоиндукции этой цепи к току в ней: $L = \frac{\Psi}{i}$.

66. **Индуктивное сопротивление самоиндукции X_L** – производная физическая величина, характеризующая противодействие электрической цепи с индуктивностью переменному току за счет возникновения противоположно направленного электрического поля, создаваемого переменным магнитным полем вокруг проводников, численно равное произведению угловой частоты μ на коэффициент самоиндукции L : $X_L = \mu L$.

67. **Индуктивное сопротивление взаимной индукции X_M** – производная физическая величина, характеризующая противодействие электрической цепи с индуктивностью переменному току за счет возникновения электрического поля, создаваемого переменным магнитным полем, созданным за счет переменного тока в другой электрической цепи, индуктивно связанной с первой, численно равное произведению угловой частоты μ на коэффициент взаимной индукции M : $X_M = \mu M$.

68. **Индукторная машина** – синхронная машина, у которой статор выполняет функции якоря и индуктора и у которой процесс преобразования энергии обусловлен пульсациями магнитной индукции вследствие зубчатости ротора.

69. **Индуктор синхронной машины** – статор или ротор синхронной машины, на котором размещены постоянные магниты или обмотка возбуждения.

70. **Катушка** – совокупность витков, обычно коаксиальных, соединенных последовательно.

71. **Качество электрической энергии** – совокупность показателей, определяющих отклонения и колебания напряжения, синусоидальность тока и напряжения, симметричность тока и напряжения, отклонения и колебания частоты трехфазного переменного тока.

72. **Коллектор машины** – комплект изолированных друг от друга токопроводящих пластин с расположенными на них щетками, обеспечивающий протекание тока в электрической машине из одной части цепи в другую при помощи скользящего контакта.

73. **Коммутация коллекторной машины** – переключение секций обмотки якоря коллекторной машины из одной параллельной ветви в другую.

74. **Короткое замыкание** – непредвиденное нормальными условиями работы системы соединение между фазами или между фазами и землей, являющееся следствием нарушения изоляции фаз.

75. **Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения (тока)** – величина, равная отношению действующего значения суммы гармонических составляющих к действующему значению основной составляющей переменного напряжения (тока).

76. **Коэффициент мощности** («косинус фи») цепи – отношение активной мощности к полной мощности.

77. **Коэффициент полезного действия генератора (КПД генератора)** – отношение полезноотдаваемой мощности в нагрузку P_2 (мощность на зажимах обмотки статора) к подводимой механической мощности P_1 (мощность на валу ротора) $\eta = P_2 / P_1$.

78. **Коэффициент нелинейных искажений (КНИ)** (или коэффициент несинусоидальности) – показатель, характеризующий степень отличия формы напряжения или тока от идеальной синусоидальной формы.

79. **Коэффициент трансформации трансформатора напряжения** – отношение напряжения обмотки высшего напряжения к напряжению обмотки низшего напряжения при холостом ходе.

80. **Коэффициент формы кривой переменного напряжения (тока)** – величина, равная отношению действующего значения периодического напряжения (тока) к его среднему значению.

81. **Критическое скольжение асинхронной машины** – скольжение синхронной машины, при котором она развивает максимальный вращающий момент.

82. **Критическое сопротивление цепи возбуждения** – максимальное сопротивление цепи параллельной обмотки возбуждения генератора, при котором в данных условиях возможно самовозбуждение генератора.

83. **Линейным (междуфазным) напряжением** в трёхфазной цепи называется напряжение между соответствующими линейными проводниками.

84. **Линейным током** в трёхфазной цепи называется ток, протекающий по соответствующему линейному проводу, соединяющему генератор и потребитель.

85. **Магнитное поле** – одна из двух сторон единого электромагнитного поля, определяемая в данной точке пространства по силовому действию

на движущиеся электрические заряды, пропорциональному их скорости, и на тела, обладающие магнитным моментом, независимо от состояния их движения.

86. Магнитная индукция B – производная физическая величина, являющаяся силовой характеристикой магнитного поля в каждой его точке и выражающаяся отношением силы, действующей в данной точке поля на движущийся электрический заряд.

87. Магнитный поток Φ – производная физическая величина, являющаяся силовой характеристикой магнитного поля через какую-либо поверхность, выражаемая в однородном магнитном поле произведением магнитной индукции B на величину площади S , нормально расположенной к вектору B .

88. Магнитодвижущая сила (МДС) F_M – производная физическая величина, являющаяся энергетической характеристикой источника магнитного поля, характеризующая магнитное действие электрического тока, выражающаяся циркуляцией вектора напряженности магнитного поля H по замкнутому контуру l , охватывающему электрические токи (полный ток) $\sum I$, которые создают данное магнитное поле: $F_M = \oint_l H dl = \sum_{k=1}^n I_k$

89. Магнитная цепь – совокупность компонентов, содержащих ферромагнитные тела, образующих замкнутую цепь, в которой при наличии намагничивающей силы образуется магнитный поток, вдоль которого замыкаются линии магнитной индукции.

90. Магнитопровод – компонент магнитной цепи с высокой магнитной проницаемостью, предназначенный для локализации магнитного потока.

91. Магнитная характеристика электрической машины – зависимость магнитного потока в воздушном зазоре электрической машины от тока возбуждения.

92. Масляный трансформатор – трансформатор с жидким диэлектриком, в котором основной изолирующей средой и теплоносителем служит трансформаторное масло.

93. Машина с независимым возбуждением – машина с электромагнитным возбуждением, все обмотки возбуждения которой питаются от посторонних источников электрического тока.

94. Машина с самовозбуждением – машина с электромагнитным возбуждением, обмотки возбуждения которой питаются током якоря или частью тока якоря.

95. Машина параллельного возбуждения – машина с самовозбуждением, цепь обмотки возбуждения которой соединена с цепью якоря параллельно непосредственно или через преобразовательное устройство.

96. **Машина последовательного возбуждения** – машина с самовозбуждением, обмотка возбуждения которой соединена с цепью якоря последовательно непосредственно или через преобразовательное устройство.

97. **Машина смешанного возбуждения** – машина с самовозбуждением, имеющая по меньшей мере две обмотки возбуждения, одна из которых соединена с цепью якоря последовательно непосредственно или через преобразовательное устройство, а остальные – параллельно.

98. **Машина переменного тока** – электрическая машина, основной процесс преобразования энергии в которой обусловлен потреблением или генерированием переменного электрического тока.

99. **Машина постоянного тока** – электрическая машина, основной процесс преобразования энергии в которой обусловлен потреблением или генерированием только постоянного электрического тока.

100. **Мгновением значения переменного тока i** называется значение силы тока в рассматриваемый момент времени.

101. **Механическая характеристика электродвигателя** – зависимость вращающего момента от частоты вращения ротора вращающегося электродвигателя при неизменных напряжении, частоте тока питающей сети и внешних сопротивлениях в цепях обмоток двигателя.

102. **Механическая характеристика асинхронного двигателя** – зависимость между вращающимся моментом и скольжением.

103. **Мощность реактивная** – электрическая мощность, которой обмениваются между собой генератор и нагрузка при создании и исчезновении электромагнитного и электростатического полей.

104. **Нагрузочная характеристика генератора** – зависимость напряжения на выводах цепи обмотки якоря электромашиного генератора от тока возбуждения при неизменных токах нагрузки, частоте вращения.

105. **Назначенный срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

106. **Напряженность магнитного поля H** – вспомогательная производная физическая величина, являющаяся силовой характеристикой магнитного поля в каждой его точке, созданного катушкой с током, находящейся в вакууме.

107. **Нагрузка электрическая** – суммарная электрическая мощность, расходуемая всеми приемниками (потребителями) электроэнергии, присоединенными к источнику электрической энергии, включая мощность, расходуемую на покрытие потерь в процессе передачи и преобразования энергии.

108. **Неявнополюсная машина** – разноименнополюсная машина с равномерным основным воздушным зазором.

109. **Номинальный ток** – значение тока для заданного режима работы, на которое рассчитан источник или потребитель электроэнергии для обеспечения заданного срока службы.

110. **Номинальная мощность** – значение мощности для длительного режима работы, на которое рассчитан источник или потребитель электроэнергии.

111. **Номинальные данные электрической машины** – совокупность числовых значений электрических и механических параметров, обусловленных изготовителем и указанных на табличке, которым удовлетворяет вращающаяся электрическая машина в заданных условиях для обеспечения заданного срока службы.

112. **Номинальный режим работы электромашин** – режим работы электрической машины, для которого машина предназначена и при котором она должна нормально работать в течение всего срока службы.

113. **Нулевым проводом** называется провод, соединяющий общие узловые точки генератора и потребителя при соединении фаз звездой.

114. **Обмотка электрической машины** – совокупность витков или катушек, образующих электрическую цепь или часть цепи в электрической машине.

115. **Обмотка якоря машины постоянного тока** – замкнутая система проводников, определенным образом уложенных на сердечнике якоря и присоединенных к коллектору.

116. **Обратимость** – свойство электрических машин преобразовывать механическую энергию в электрическую и наоборот, т.е. работать как в качестве генератора, так и в качестве двигателя.

117. **Однородным магнитным полем** называется магнитное поле, в каждой точке которого вектор магнитной индукции B имеет одну и ту же величину и направление.

118. **Отношение короткого замыкания синхронной машины** – отношение тока возбуждения синхронной машины, соответствующего ее номинальному напряжению при холостом ходе, к току возбуждения при трехфазном коротком замыкании с номинальным током в обмотке якоря.

119. **Паз электрической машины** – углубление или полость вблизи поверхности магнитопровода статора или ротора электрической машины, обращенные к основному воздушному зазору, предназначенные для размещения проводов обмотки.

120. **Параллельная работа трансформаторов** – работа двух или нескольких трансформаторов при параллельном соединении не менее чем двух основных обмоток одного из них с таким же числом основных обмоток другого трансформатора (других трансформаторов).

121. **Первичная обмотка трансформатора напряжения** – обмотка, к которой прикладывается напряжение, подлежащее трансформации.

122. Первичное напряжение (трансформатора напряжения) – напряжение, приложенное к первичной обмотке трансформатора напряжения.

123. Перегрузка трансформатора – нагрузка трансформатора, при которой расчетный износ изоляции обмоток, соответствующий установленным превышениям температуры, превосходит износ, соответствующий номинальному режиму работы.

124. Переменным промышленным током называется периодический ток промышленной частоты (50 Гц), мгновенные значения которого изменяются по синусоидальному закону.

125. Повышающий трансформатор – трансформатор, у которого первичной обмоткой является обмотка низшего напряжения.

126. Понижающий трансформатор – трансформатор, у которого первичной обмоткой является обмотка высшего напряжения.

127. Полная мощность S – производная физическая величина, характеризующая максимально возможную активную мощность в данной цепи переменного тока при коэффициенте мощности $\cos \varphi$, равном единице.

128. Полус электрической машины – часть сердечника вращающейся электрической машины, на котором расположена обмотка возбуждения или выступающая в направлении воздушного зазора часть магнитопровода.

129. Полусное деление – часть поверхности якоря, приходящаяся на один полус: $X = nD / 2p$, где X – полусное деление, D – диаметр якоря, $2p$ – число главных полюсов в машине.

130. Приемник электрической энергии – устройство, в котором происходит преобразование электрической энергии в другой вид энергии для ее использования.

131. Прямой пуск электродвигателя – пуск электродвигателя путем непосредственного подключения его к питающей сети.

132. Прямолнейная коммутация коллекторной машины – коммутация коллекторной машины, при которой ток в коммутирующей секции изменяется в функции времени линейно.

133. Пускатель – комбинация всех коммутационных средств, необходимых для пуска и остановки двигателя в сочетании с надлежащей защитой от перегрузок.

134. Пусковой реостат – коммутационный электрический аппарат, предназначенный для пуска электродвигателей путем изменения величины вводимого в цепь сопротивления резисторов, являющихся частью этого аппарата.

135. Рабочие характеристики генератора – зависимости генерируемой мощности, тока в обмотке якоря, напряжения на выводах обмотки якоря, коэффициента полезного действия и коэффициента мощности гене-

ратора от полезной мощности на валу при неизменных частоте вращения и токе возбуждения.

136. Рабочие характеристики электродвигателя – зависимости подводимой мощности, тока в обмотке якоря, частоты вращения, коэффициента полезного действия электродвигателя от полезной мощности на валу при неизменных напряжении питающей сети и внешних сопротивлениях в цепях обмоток.

137. Расщепленная обмотка – обмотка, состоящая из двух или более гальванически не связанных частей, суммарная номинальная мощность которых, как правило, равна номинальной мощности трансформатора, и которые допускают независимую друг от друга нагрузку или питание.

138. Реактивная мощность Q – производная физическая величина, характеризующая максимальную скорость обмена электрической энергией между источником переменного тока и цепью и равная $Q = U I \sin \varphi$.

139. Реактивный синхронный двигатель – синхронный двигатель, вращающий момент которого обусловлен неравенством магнитных проводимостей по поперечной и продольной осям ротора, не имеющего обмоток возбуждения или постоянных магнитов.

140. Реактивная коммутационная ЭДС – электродвижущая сила, возникающая в коммутируемой секции коллекторной машины вследствие изменения тока в ней и токов в других одновременно коммутируемых секциях, имеющих индуктивную связь с ней.

141. Реакция якоря электрической машины – воздействие магнитодвижущей силы обмотки якоря на магнитное поле вращающейся электрической машины, создаваемое обмоткой возбуждения или постоянными магнитами.

142. Регулировочная характеристика генератора – зависимость тока в обмотке независимого возбуждения или тока в обмотке параллельного возбуждения от тока нагрузки при неизменном напряжении на выводах обмотки якоря и номинальной частоте вращения ротора генератора.

143. Ротор – вращающаяся часть машины.

144. Самосинхронизация синхронной машины – синхронизация, при которой синхронная машина, вращающаяся с частотой, близкой к синхронной, после включения ее в сеть и подачи постоянного тока в обмотку возбуждения сама входит в синхронизм.

145. Сила тока (величина тока) – основная физическая величина, характеризующая интенсивность электрического тока, выражаемая отношением величины заряда q , переносимого заряженными частицами сквозь площадь поперечного сечения проводника, ко времени его прохождения t .

146. Силовой трансформатор – трансформатор, предназначенный для преобразования электрической энергии в электрических сетях и в ус-

тановках, предназначенных для приема и использования электрической энергии.

147. Синхронный компенсатор – электрическая машина, используемая для повышения коэффициента мощности электрических установок.

148. Синхронная электрическая машина – машина переменного тока, в которой скорость вращения ротора находится в строго постоянном отношении к частоте сети переменного тока.

149. Синхронная частота вращения машины переменного тока – частота вращения ротора машины переменного тока, равная частоте вращения магнитного поля, определяемого частотой сети и числом ее полюсов.

150. Синхронизация синхронной машины – процесс, при котором синхронная машина приводится к синхронной и синфазной работе с другой, механически несвязанной с ней, синхронной машиной или сетью.

151. Синхронизм синхронной машины – устойчивая параллельная работа синхронной машины с питающей сетью или с другой синхронной машиной при синхронной частоте вращения.

152. Скоростная характеристика электродвигателя – зависимость частоты вращения ротора электродвигателя от потребляемого тока в заданных условиях.

153. Сопротивление изоляции – электрическое сопротивление, толщину изоляции токам утечки измеряемое в специальных условиях между двумя проводящими телами, изолированными друг от друга.

154. Скольжение – разность скоростей ротора и вращающегося поля статора.

155. Скорость скольжения — разность скоростей вращения магнитного поля (синхронной скорости) и вращения ротора двигателя.

156. Соединением по схеме звезда называется такое соединение фаз генератора или потребителя, при котором концы всех фаз соединены в общую узловую точку, а их начала – с проводами, соединяющими генератор и потребитель.

157. Соединением по схеме треугольник называется такое соединение фаз генератора или потребителя, при котором конец первой фазы соединен с началом второй фазы, конец второй фазы соединен с началом третьей и конец третьей – с началом первой, а полученные узловые точки соединены с линейными проводами, соединяющими генератор и потребитель.

158. Статическая устойчивость синхронной машины – способность синхронной машины сохранять устойчивую параллельную работу с питающей сетью с синхронной частотой вращения при плавном нарушении ее установившегося состояния.

159. **Статор** – часть электрической машины, которая включает неподвижный магнитопровод с обмоткой.

160. **Ток короткого замыкания** – сверхток, появляющийся в результате короткого замыкания, вызываемого повреждением или неправильным соединением в электрической цепи.

161. **Ток утечки** – ток через толщу изоляции, обусловленный несовершенством изоляции.

162. **Точная синхронизация синхронной машины** – синхронизация синхронной машины при которой напряжение, частота и фаза регулируются так, чтобы они были как можно ближе к соответствующим значениям питающей сети или машины, с которой осуществляется синхронизация.

163. **Трансформатор** – статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока, имеющую другие характеристики.

164. **Трансформатор, регулируемый под нагрузкой** – регулируемый трансформатор, допускающий регулирование хотя бы одной из его обмоток без перерыва нагрузки и без отключения его обмоток от сети.

165. **Трёхфазной цепью** называется совокупность трёх электрически связанных однофазных цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе и создаваемые общим источником электрической энергии.

166. **Турбогенератор** – синхронный генератор, приводимый во вращение от паровой или газовой турбины.

167. **Угловая характеристика синхронного генератора** – зависимость активной мощности синхронной машины от угла сдвига между напряжением на выводах обмотки якоря и ее электродвижущей силой по продольной оси при неизменных напряжении на выводах обмотки якоря, частоте тока в ней и токе возбуждения.

168. **Ударный ток короткого замыкания** – наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания, определяемое как сумма мгновенных значений вынужденного тока и свободного тока в процессе короткого замыкания.

169. **Ускоренная коммутация коллекторной машины** – коммутация коллекторной машины, при которой средняя скорость изменения тока в коммутирующей секции в первую половину периода коммутации больше чем во вторую.

170. **Установившееся напряжение генератора** – значение напряжения на выводах генератора после окончания переходного процесса.

171. **Фазным напряжением генератора или потребителя** в трёхфазной цепи называется напряжение между началом и концом соответствующей фазы.

172. **Фазным током генератора или потребителя** называется ток, протекающий по соответствующей фазе генератора или потребителя.

173. **Фазные обмотки (фазы генератора)** – три обмотки на статоре генератора переменного тока, сдвинутые в пространстве на 120° , используемые для получения трехфазного тока.

174. **Физическая нейтраль электрической машины** – линия на поверхности якоря электрической машины, вдоль которой радиальная составляющая магнитной индукции равна нулю.

175. **Характеристика холостого хода генератора** – зависимость электродвижущей силы обмотки якоря вращающегося электромашинного генератора от тока возбуждения при разомкнутой обмотке якоря и при заданной частоте вращения.

176. **Характеристика холостого хода асинхронного двигателя** – зависимость тока холостого хода асинхронного двигателя от напряжения питающей сети при номинальной частоте питающей сети.

177. **Характеристика короткого замыкания генератора** – зависимость тока в короткозамкнутой обмотке якоря генератора от тока возбуждения при заданной частоте вращения.

178. **Холостой ход трансформатора** – режим работы трансформатора при разомкнутой вторичной обмотке.

179. **Циркуляционное охлаждение** – охлаждение трансформатора с использованием принудительного повышения скорости движения заполняющего трансформатор теплоносителя при помощи насосов или вентиляторов.

180. **Частотный пуск электродвигателя** – пуск электродвигателя переменного тока с подачей питания от источника со значительно пониженной частотой, постепенно повышаемой по мере разворачивания двигателя.

181. **Электрическая мощность** – физическая величина, характеризующая скорость передачи или преобразования электрической энергии.

182. **Электрическое напряжение U** – производная физическая величина, являющаяся энергетической характеристикой электрического поля на некотором пути, выражающаяся работой, совершаемой электрическим полем по перемещению единичного положительного заряда из одной точки в другую вдоль пути, лежащего вне источника тока.

183. **Электрическая машина** – электрический преобразователь, который преобразует электрическую энергию в механическую и наоборот.

184. **Электрическая прочность изоляции** – испытательное напряжение, прикладываемое в специальных условиях, которое должна выдерживать изоляция устройства.

185. **Электрическое сопротивление** – производная физическая величина, характеризующая противодействие электрической цепи (или её участка) электрическому току за счет возникновения в электрической цепи

противоположно направленного электрического поля по отношению к электрическому полю источника тока.

186. **Электричество** – проявление одной из форм энергии, присущая электрическим зарядам как движущимися, так и находящимися в статическом состоянии.

187. **Электродвижущая сила (ЭДС)** источника электрической энергии – производная физическая величина, являющаяся энергетической характеристикой стороннего поля внутри источника, способного вызывать электрический ток и выражающаяся работой, совершаемой силами стороннего поля при переносе единичного положительного заряда вдоль всей цепи, включая и источник электрической энергии.

188. **Электрическое сопротивление** – производная физическая величина, характеризующая противодействие электрической цепи (или её участка) электрическому току за счет возникновения в электрической цепи противоположно направленного электрического поля по отношению к электрическому полю источника тока.

189. **Электрическим током проводимости** называется явление упорядоченного движения заряженных частиц под действием электрического поля в веществе, обладающем электропроводностью.

190. **Электрический ток переноса** (конвекции) представляет собой перенос электрических зарядов в свободном пространстве (пустоте, газе) движущимися заряженными частицами под действием электрического поля.

191. **Электрический ток смещения** представляет собой упорядоченное движение связанных заряженных частиц (диполей) в диэлектрике при изменении поляризации диэлектрика за счет изменения во времени электрического поля.

192. **Электрический двигатель** – электрическая машина, осуществляющая преобразование электрической энергии в механическую.

193. **Электромашинный усилитель** – электрическая машина, работающая в режиме генератора и усиливающая мощность электрических сигналов.

194. **Явнополюсная машина** – разноименнополюсная машина, в которой полюса выступают в сторону основного воздушного зазора.

195. **Якорь** – та часть коллекторной машины или синхронной машины, в которой индуктируется ЭДС и в которой протекает ток нагрузки.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Информация о дисциплине	3
1.1. Предисловие	3
1.2. Содержание дисциплины и виды учебной работы	5
2. Рабочие учебные материалы	6
2.1. Рабочая программа	6
2.2. Содержание и структура учебной дисциплины «Электрические машины»	10
3. Краткий конспект лекций по электрическим машинам	74
Л1. История развития и классификация ЭМ	74
Л2. Принцип действия и режим холостого хода трансформатора	79
Л3. Работа трансформатора под нагрузкой	88
Л4. Трёхфазные трансформаторы	95
Л5. Определение параметров и характеристики трансформатора	103
Л6. Параллельная работа трансформаторов	113
Л7. Многообмоточные трансформаторы	119
Л8. Переходные процессы в трансформаторах	127
Л9. Обмотки машин переменного тока	135
Л10. Устройство и принцип действия синхронных генераторов	143
Л11. Реакция якоря СГ	150
Л12. Векторные диаграммы и характеристики СГ	157
Л13. Параллельная работа СГ	166
Л14. Устойчивость генератора при работе с сетью	172
Л15. Переходные процессы в синхронных машинах	179
Л16. Устройство и принцип действия асинхронных двигателей	286
Л17. Работа асинхронных двигателей при неподвижном роторе	192
Л18. Работа асинхронных двигателей при вращающемся роторе	200
Л19. Вращающий момент асинхронных двигателей	207
Л20. Пуск и рабочие характеристики АД	216
Л21. Регулирование частоты вращения АД	223
Л22. Переходные процессы в АД	229
Л23. Устройство и принцип действия машин постоянного тока	236
Л24. Реакция якоря машины постоянного тока	243
Л25. Коммутация тока в машинах постоянного тока	249
Л26. Генераторы постоянного тока	257
Л27. Двигатели постоянного тока	266
4. Тезаурус по электрическим машинам	277

Учебное издание

**Рясков Юрий Иванович
Шайтор Николай Михайлович**

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Учебно-методическое пособие

