

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электротехники и электромеханики

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Энергетический институт

Специальности:

140601.65 - электромеханика

140602.65 - электрические и электронные аппараты

Направление подготовки бакалавра

140600.62 - электротехника, электромеханика и электротехнологии

Санкт-Петербург
Издательство СЗТУ
2009

Утверждено редакционно-издательским советом университета
УДК 621.313 (07)

Электрические машины: учебно-методический комплекс / сост.
В. Ф. Штыков - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2009. - 239 с.

Учебно-методический комплекс (УМК) разработан в соответствии с требованиями государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования.

Материал УМК направлен на создание необходимых условий для получения необходимых знаний и умений по дисциплине «Электрические машины», в том числе в сфере:

- общих вопросов электромеханического преобразования энергии;
- физических законов, лежащих в основе устройства и работы трансформаторов; асинхронных и синхронных машин, машин постоянного тока, специальных электрических машин;
- конструктивного исполнения, параметров и режимов работы электрических машин;
- основных характеристик электрических двигателей, генераторов и преобразователей;
- эксплуатационных требований к электрическим машинам;
- текущего состояния и тенденций развития электромашиностроения.

Рассмотрено на заседании кафедры электротехники и электромеханики 15.12.2008г.; одобрено и рекомендовано методическим советом энергетического института 19.02.2009.

Рецензенты: Кафедра электротехники и электромеханики (зав. кафедрой В. И. Рябуха, д-р техн. наук, проф.); Брандина Е.П., канд. техн. наук, проф.; Максаров В.В., д-р техн. наук, проф.

Составитель Штыков В. Ф., канд. техн. наук, доц.

© Северо-Западный государственный заочный технический университет, 2009
© В.Ф. Штыков, 2009

1. ИНФОРМАЦИЯ О ДИСЦИПЛИНЕ

1.1. Предисловие

Дисциплина «Электрические машины» изучается студентами на 4 курсе в объеме 170 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;
- Асинхронные машины;
- Синхронные 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 исследовательские задачи, связанные с проектированием электрических машин, их выбором, испытаниями и эксплуатацией.

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 проектирования, 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», «Материаловедение», «Метрология, стандартизация и сертификация», «Основы электромеханики» и др.

Одновременно знания и умения по курсу «Электрические машины» являются основой для успешного освоения других профессиональных дисциплин, таких как «Испытание электрических машин», «Эксплуатация и ремонт электрических машин», «Конструкция электрических машин» и др.

1.2. Содержание дисциплины и виды учебной работы

1.2.1. Содержание дисциплины в соответствии с ГОС

Шифр	Содержание дисциплины	Объем, час
ОПД.Ф.07	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.	170

1.2.2. Распределение объема дисциплины по видам учебной работы

Вид учебной работы	Всего часов		
	Форма обучения		
	очная	очно- заочная	заочная
Общая трудоемкость дисциплины	170		
Работа под руководством преподавателя (включая ДОТ)	102	102	102
в том числе: аудиторные занятия:	84	42	20
лекции	58	20	12
практические занятия	10	10	-
лабораторные работы	16	12	8
Самостоятельная работа студента	68	68	68
Промежуточный контроль, количество	6	8	8
в том числе: тестирование	6	6	6
контрольная работа		2	2
Вид итогового контроля (зачет, экзамен)	Зачет, экзамен		

Перечень видов практических занятий и контроля:

- контрольные работы (для очно-заочной и заочной форм обучения);
- практические занятия;
- лабораторные работы;
- текущее тестирование;
- зачет, экзамен (итоговое тестирование).

2. РАБОЧИЕ УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

(общая трудоемкость дисциплины - 170 часов)

Введение (1 час), [1], ч.1 с. 4-5; [2] с. 5 - 12

Структура дисциплины «Электрические машины» и порядок её освоения. Понятие о классической электрической машине. Место электрических машин в промышленности и быту. Общие сведения о видах и типах электрических машин.

Раздел 1: ОБЩИЕ ОСНОВЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

(22 часа)

1.1. Физические основы электромагнитного и электромеханического преобразования энергии в электрических машинах (10 часов)

[1], ч.1 с. 5-41; [2] с. 32-39

Основные понятия и соотношения, характеризующие магнитные цепи и магнитные поля. Электромагнитная индукция, индуктивность и индуктивное сопротивление электрическому току. Механическое проявление взаимодействия тока и магнитного поля. Признаки двигательного и генераторного (тормозного) режимов работы электромеханических преобразователей. Обратимость **электрических машин (ЭМ)**. Особенности применения ферромагнитных материалов в качестве магнитопроводов электрических машин. Потери энергии в магнитопроводе. Схемы замещения и векторные диаграммы электрических цепей, содержащих катушки индуктивности с ферромагнитными сердечниками.

1.2. Термины и определения, характеризующие режимы работы электрических машин (2 часа) [1], ч.1 с. 41-48; [2] с. 398-105

Общие термины и определения. Общие сведения о режимах работы электрических машин.

1.3. Основы классификации электрических машин (3 часа) [1], ч.1 с. 48-57; [2] с. 24-32

Классификация электрических машин по виду и типу, назначению, роду тока и принципу действия. Общая классификация электрических машин по конструктивному исполнению.

1.4. Потери и КПД электрических машин (3 часа) [1], ч.1 с. 57-68; [2] с. 106-110

Классификация потерь. Определение основных видов потерь в электрических машинах. Коэффициент полезного действия.

1.5. Нагрев и охлаждение электрических машин (3 часа)

[1], ч.1 с. 68-75; [2] с. 110-119

Допустимая температура частей электрической машины. Процессы нагревания и охлаждения электрических машин.

1.6. Требования, предъявляемые к электрическим машинам. Современное состояние и тенденции развития электромашиностроения (1 час) [1], ч.1 с. 75-87; [2] с. 119-127

Требования стандартов и классификационных организаций, предъявляемые к электрическим машинам. Современное состояние и тенденции развития производства и применения электрических машин.

Раздел 2 ТРАНСФОРМАТОРЫ (34 часа)

2.1. Общие сведения об устройстве, назначении и принципе действия трансформаторов (2 часа). [1], ч.2 с. 5-14; [2] с. 131-133

Общие сведения. Области применения трансформаторов. Принцип действия трансформатора

2.2. Конструктивные особенности трансформаторов (4 часа) [1]; ч.2 с. 14-30; [2] с. 156-1168.

Магнитная система. Конструкция обмоток, изоляции и внешних вводов (выводов). Конструкция систем охлаждения трансформаторов

2.3. Математическое описание физических процессов в электрических и магнитных цепях трансформатора (9 часов) [1], ч.2 с. 30-49; [2] с. 133-145

Режим холостого хода. Универсальная схема замещения трансформатора. Экспериментальное определение параметров универсальной расчетной эквивалентной схемы трансформатора (схемы замещения). Полная система уравнений электрического равновесия и векторные диаграммы трансформатора.

2.4. Особенности устройства и работы трехфазных трансформаторов (5 часов) [1], ч.2 с. 49-62; [2] с. 143-168

Общие сведения об особенностях трансформации трехфазных токов и напряжений. Группы соединения трансформаторов. Высшие гармоники тока и магнитного потока в трехфазных трансформаторах.

2.5. Эксплуатационные режимы работы и характеристики трансформатора (10 часов) [1], ч.2 с. 62-84; [2] с. 177-181, с. 205-220

Изменение напряжения трансформатора под нагрузкой. Параллельная работа трансформаторов. Переходные процессы в трансформаторе при коротком замыкании, включении на холостом ходу и внешних электромагнитных воздействиях. Энергетические диаграммы трансформатора для потоков активной и реактивной энергии. КПД трансформатора.

2.6. Автотрансформаторы и специальные трансформаторы (4 часа) [1], ч.2 с. 84-93; [2] с. 189-199, с. 220-230

Автотрансформаторы. Специальные трансформаторы (сварочные, измерительные, регулируемые с подмагничиванием, утроители частоты и магнитные усилители).

Раздел 3

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И УСТРОЙСТВА СИНХРОННЫХ И АСИНХРОННЫХ МАШИН (8 часов)

3.1. Фазные обмотки реальных трехфазных асинхронных и синхронных машин (4 часа) [1], ч.3 с. 14-24; [2] с. 68-84

Общие принципы выполнения трехфазных обмоток. Однослойная трехфазная обмотка с числом полюсов $2p = 2$. Алгоритм полного расчета схемы трехфазной двухслойной четырехполюсной обмотки для статора с числом пазов $Z = 24$. Пример выполнения однослойной трехфазной обмотки с числом полюсов $2p = 4$.

3.2. Способы подавления высших гармоник в кривых МДС и ЭДС синхронных и асинхронных электрических машин (4 часа) [1], ч.3 с. 24-31; [2] с. 76-84

Общие сведения. Распределение обмотки. Укорочение шага обмотки. Скок пазов

Раздел 4

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ (АМ) (46 часов)

4.1. Устройство и физические основы функционирования асинхронной машины в двигательном и тормозных режимах (5 часов) [1], ч. 4 с. 5-21; [2] с. 239-241, 332-338.

Общие сведения об устройстве АМ. Принципы создания вращающихся (перемещающихся) магнитных полей. Особенности возникновения электромагнитного момента АМ. Качественный анализ зависимостей тока ротора и электромагнитного момента АМ от скольжения.

4.2. Математическое описание установившихся процессов в электрических цепях асинхронной машины (13 часов) [1], ч.4 с. 21-52; [2] с. 241-245, 258-268.

T-образная схема замещения асинхронной машины при неподвижном и вращающемся роторе. Уравнения электрического равновесия АМ. Векторные диаграммы для различных режимов работы асинхронной машины. Энергетические диаграммы АМ для различных режимов её работы. КПД асинхронной машины. Г-образная схема замещения АМ. Рабочие характеристики и круговая диаграмма асинхронной машины.

4.3. Уравнения электромеханической и механической характеристик асинхронной машины (8 часов) [1], ч.4 с. 52-64; [2] с. 284-291

Вывод и анализ уравнения электромеханической характеристики АМ. Вывод и анализ уравнения механической характеристики АМ. Определение проектного значения электромагнитного момента АМ. Построение механической характеристики АМ по каталожным данным (формула Клосса). Изменение координат «особых» точек механической характеристики АМ.

4.4. Регулирование выходной скорости асинхронных двигателей (АД) (8 часов) [1], ч.4 с. 64-77; [2] с. 315-324

Регулирование частоты вращения за счет изменения угловой скорости поля. Регулирование выходной скорости АД изменением скольжения без использования мощности скольжения. Регулирование выходной скорости АД в асинхронных каскадах с использованием мощности скольжения.

4.5. Способы пуска асинхронных двигателей. АД с особыми пусковыми свойствами и естественными механическими характеристиками (4 часа) [1], ч.4 с. 77-91; [2] с. 308-315

Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Пуск асинхронных двигателей с фазным ротором. Асинхронные короткозамкнутые двигатели с улучшенными пусковыми свойствами.

4.6. Общие сведения о специальных конструкциях и режимах работы асинхронных машин (8 часов) [1], ч.4 с. 91-127; [2] с. 332-362.

Однофазные асинхронные двигатели. Асинхронные двигатели со сплошным ротором. Электромагнитные индукционные насосы. Линейные и дуговые асинхронные двигатели. Асинхронные микромашины автоматических устройств. Асинхронные исполнительные двигатели. Асинхронные тахогенераторы. Вращающиеся трансформаторы. Сельсины. Асинхронный автономный генератор. Асинхронный генератор - преобразователь частоты. Фазорегулятор. Трехфазный индукционный регулятор.

Раздел 5: СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ (СМ) (34 часа)

5.1. Устройство и физические основы функционирования синхронной машины в генераторном и двигательном режимах (5 часов) [1], ч.5 с.4-10; [2] с. 368-390, 459-463

Общие сведения об устройстве и принципе действия СМ в генераторном и двигательном режимах. Типовые конструкции СМ. Конструктивные и электрические отличия явнополюсных (ЯП) и неявнополюсных (НЯП) СМ.

5.2. Математическое описание установившихся процессов в электрических цепях синхронной машины (8 часов) [1], ч.5 с. 10-18; [2] с. 390-406, 412-429

Реакция якоря СМ при различном характере тока якоря. Теория двух реакций СМ. Эквивалентная расчетная схема и уравнения электрического равновесия НЯП СМ. Векторные диаграммы ненасыщенной и насыщенной НЯП СМ: а) для базового вектора E_0 ; б) базового вектора U_a . Эквивалентная расчетная схема и уравнения электрического равновесия ЯП СМ. Векторные диаграммы ЯП СМ: а) для базового вектора E_0 ; б) для базового вектора U_a . Электромагнитная мощность и электромагнитный момент (угловая

характеристика) НЯ и ЯП СМ.

5.3. Эксплуатационные режимы работы и характеристики синхронной машины (12 часов) [1], ч.5 с.18-28; [2] с. 406-438

Основные характеристики автономного синхронного генератора: холостого хода, нагрузочная, внешняя, регулировочная, короткого замыкания. Экспериментально-расчетные способы определения индуктивных сопротивлений НЯП СМ и ЯП СМ. Отношение короткого замыкания: способы определения и влияние на эксплуатационные свойства СМ. Параллельная работа СМ. Условия перехода СМ: а) в режим компенсатора; б) в режим двигателя; в) в режим генератора. Способы включения СМ на параллельную работу. Регулирование активной и реактивной мощности. Последствия невыполнения условий точной синхронизации. U-образная характеристика СМ. Конструктивные особенности, достоинства и недостатки синхронных двигателей (СД). Способы пуска, реверса и регулирования скорости СД.

5.4. Общие сведения о специальных конструкциях и режимах работы синхронных машин (4 часа) [1], ч.5 с. 28-33; [2] с. 463-474

Синхронный компенсатор. Синхронные микромашины: СМ с постоянными магнитами, реактивные двигатели, гистерезисные двигатели, индукторные машины, шаговые двигатели.

5.5. Неустановившиеся и переходные процессы синхронных машин (5 часов) [1], ч.5 с.33-41; [2] с. 68-84, 445-454

Внезапное короткое замыкание синхронного генератора. Устойчивость параллельной работы и колебания СМ.

Раздел 6: МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА (МПТ) (24 часа)

6.1. Устройство и физические основы функционирования машины постоянного тока в двигательном и тормозных режимах (6 часов) [1], ч.6 с. 4-11, 17-20; [2] с.с. 482-495.

Области применения МПТ. Принцип действия МПТ: описание физических процессов элементарной МПТ, признаки генераторного и двигательного режимов. Условия перехода ДПТ в различные режимы работы. Понятие о параллельных ветвях якорной обмотки МПТ. Вывод формул ЭДС и электромагнитного момента МПТ. Устройство реальных МПТ. Маркировка обмоток и схемы их включения для МПТ с различными типами возбуждения. Общие сведения о бесконтактных (бесколлекторных) МПТ.

6.2. Реакция якоря машины постоянного тока. Особенности работы щеточно-коллекторного узла (коммутация) МПТ (4 часа) [1], ч.5 с. 11-17; [2] с. 500-523

Поперечная реакция якоря МПТ при насыщенном и ненасыщенном

магнитопроводе. Способы компенсации. Продольная реакция якоря и ее влияние на эксплуатационные свойства генераторов и двигателей. Расчет МДС поперечной и продольной реакции якоря. Классическая теория коммутации МПТ: основные допущения и вывод основного уравнения. Способы улучшения коммутации. Настройка дополнительных полюсов.

6.3. Эксплуатационные режимы работы и характеристики генераторов постоянного тока (ГПТ) (7 часов) [1], ч.5 с. 20-25; [2] с. 523-533.

Основные характеристики ГПТ (внешняя, регулировочная, нагрузочная, холостого хода, короткого замыкания), их назначение и способы экспериментального определения. Способы расчета внешних и регулировочных характеристик ГПТ. Физические процессы при самовозбуждении генератора постоянного тока (ГПТ). Причины отсутствия самовозбуждения. Параллельная работа ГПТ: необходимость, условия включения, распределение нагрузок. Особенности параллельной работы ГПТ смешанного возбуждения. Общие сведения о бесконтактных (бесколлекторных) ГПТ.

6.4. Эксплуатационные режимы работы и характеристики двигателей постоянного тока (ДПТ) (7 часов) [1], ч.5 с. 25-30; [2] с. 533-557.

Вывод уравнений статических электромеханической (ЭМХ) и механической (МХ) характеристик ДПТ. Моментные и механические характеристики ДПТ с различными типами возбуждения. Изменение параметров режима ДПТ при изменении сопротивления якорной цепи, изменении напряжения якорной цепи, изменении тока возбуждения. Способы регулирования выходной скорости двигателей постоянного тока. Общие сведения о бесконтактных (бесколлекторных) ДПТ. Энергетические диаграммы МПТ для всех возможных режимов работы. Потери и КПД МПТ.

Заключение (1 час)

Общая характеристика рассмотренного учебного материала и перспективы расширения и углубления знаний по теории и практике производства и применения электрических машин.

2.2. ТЕМАТИЧЕСКИЕ ПЛАНЫ ДИСЦИПЛИНЫ

2.2.1. Тематический план дисциплины для студентов очной формы обучения

№ п/п	Наименование раздела, (отдельной темы)	Общее кол-во час.	Виды занятий и текущего контроля								
			Лекции		ПЗ		ЛР		Сам. раб.	Тесты рубежного контроля	Контр. раб.
			ауд.	ДОТ	ауд.	ДОТ	ауд.	ДОТ			
ВСЕГО		170	58	12	10	6	16	-	68	5	-

	Введение	1	1								
1.	Общие основы функционирования и устройства электрических машин	22	3	1					18	ТРК №1	
1.1.	Физические основы и электромагнитного и электромеханического преобразования энергии в электрических машинах.	11	1	1					9		
1.2.	Термины и определения, характеризующие режимы работы электрических машин.	2	1						1		
1.3.	Основы классификации электрических машин.	3							3		
1.4.	Потери и КПД электрических машин.	2	1						1		
1.5.	Нагрев и охлаждение электрических машин.	2							2		
1.6.	Требования, предъявляемые к электрическим машинам. Современное состояние и тенденции развития ЭМ.	2							2		
2.	Трансформаторы	34	12	4	3	1	4		10	ТРК №2	
2.1.	Общие сведения об устройстве, назначении и принципе действия трансформаторов.	2	1						1		
2.2.	Конструктивные особенности трансформаторов.	4	1	1					2		
2.3.	Математическое описание физических процессов в электрических и магнитных цепях трансформатора.	9	3	1	2		2		1		
					ПЗ №1		ЛР №1				
2.4.	Особенности устройства и работы трехфазных трансформаторов.	5	2	1					2		
2.5.	Эксплуатационные режимы работы и характеристики трансформатора.	10	4	1	1	1	2		1		
					ПЗ №2	ПЗ №2	ЛР №1				
2.6.	Автотрансформаторы и специальные трансформаторы.	4	1						3		

3.	Общие вопросы теории и устройства синхронных и асинхронных машин	8	4						4		
3.1.	Фазные обмотки реальных трехфазных асинхронных и синхронных машин.	4	2						2		
3.2.	Способы подавления высших гармоник в кривых МДС и ЭДС синхронных и асинхронных электрических машин.	4	2						2		
4.	Асинхронные машины (АМ)	46	17	1	3	4	4		17	ТРК №3	
4.1.	Устройство и физические основы функционирования асинхронной машины в двигательном и тормозных режимах.	5	3		1				1		
					ПЗ №3						
4.2.	Математическое описание установившихся процессов в электрических цепях асинхронной машины.	13	4		1	1	2		5		
					ПЗ №3	ПЗ №3	ЛР №2				
4.3.	Уравнения электромеханической и механической характеристик асинхронной машины.	8	3		1	1			3		
					ПЗ №4	ПЗ №4					
4.4.	Регулирование выходной скорости асинхронных двигателей (АД).	8	3			1	2		2		
						ПЗ №5	ЛР №2				
4.5.	Способы пуска асинхронных двигателей. АД с особыми пусковыми свойствами и естественными механическими характеристиками.	4	2			1			1		
						ПЗ №5					
4.6.	Общие сведения о специальных конструкциях и режимах работы асинхронных машин.	8	2	1					5		
5.	Синхронные машины (СМ)	34	12	3	2	1	4		12	ТРК №4	
5.1.	Устройство и физические основы функционирования синхронной машины в генераторном и двигательном режимах.	5	2	1					2		

5.2.	Математическое описание установившихся процессов в электрических цепях синхронной машины.	8	3	1	1	1			2		
					ПЗ №6	ПЗ №6					
5.3.	Эксплуатационные режимы работы и характеристики синхронной машины.	12	3	1	1		4		3		
					ПЗ №6		ЛР №3				
5.4.	Общие сведения о специальных конструкциях и режимах работы синхронных машин.	4	2						2		
5.5.	Неустановившиеся и переходные процессы синхронных машин.	5	2						3		
6.	Машины постоянного тока (МПТ)	24	8	3	2		4		7	ТРК №5	
6.1.	Устройство и физические основы функционирования машины постоянного тока в двигательном и тормозных режимах.	5	3						2		
6.2.	Реакция якоря машины постоянного тока. Особенности работы щеточно-коллекторного узла.	4	1						3		
6.3.	Эксплуатационные режимы работы и характеристики генераторов постоянного тока (ГПТ).	7	2	1	1		2		1		
					ПЗ №7		ЛР №4				
6.4.	Эксплуатационные режимы работы и характеристики двигателей постоянного тока (ДПТ).	8	2	2	1		2		1		
					ПЗ №7		ЛР №5				
	Заключение	1	1								

**2.2.2. Тематический план дисциплины
для студентов очно-заочной формы обучения**

№ п/п	Наименование раздела, (отдельной темы)	Общее кол-во час.	Виды занятий и текущего контроля									
			Лекции		ПЗ		ЛР		Сам. раб.	Тесты рубежного контроля	Контр. раб.	
			ауд.	ДОТ	ауд.	ДОТ	ауд.	ДОТ				

ВСЕГО		170	20	50	10	6	12	4	68	5	2
	Введение	1	1								
1.	Общие основы функционирования и устройства электрических машин	22		4					18	ТРК №1	
1.1.	Физические основы электромагнитного и электромеханического преобразования энергии в электрических машинах.	11		2					9		
1.2.	Термины и определения, характеризующие режимы работы электрических машин.	2		1					1		
1.3.	Основы классификации электрических машин.	3							3		
1.4.	Потери и КПД электрических машин.	2		1					1		
1.5.	Нагрев и охлаждение электрических машин.	2							2		
1.6.	Требования, предъявляемые к электрическим машинам. Современное состояние и тенденции развития ЭМ.	2							2		
2.	Трансформаторы	34	5	11	3	1	4		10	ТРК №2	№1 (ч.1)
2.1.	Общие сведения об устройстве, назначении и принципе действия трансформаторов.	2		1					1		
2.2.	Конструктивные особенности трансформаторов.	4	1	1					2		
2.3.	Математическое описание физических процессов в электрических и магнитных цепях трансформатора.	9	1	3	2		2		1		
					ПЗ №1		ЛР №1				
2.4.	Особенности устройства и работы трехфазных трансформаторов.	5	1	2					2		
2.5.	Эксплуатационные режимы работы и характеристики трансформатора.	10	1	4	1	1	2		1		
					ПЗ №2	ПЗ №2	ЛР №1				
2.6.	Автотрансформаторы и специальные трансформаторы.	4	1						3		

3.	Общие вопросы теории и устройства синхронных и асинхронных машин	8	2	2					4		
3.1.	Фазные обмотки реальных трехфазных асинхронных и синхронных машин.	4	1	1					2		
3.2.	Способы подавления высших гармоник в кривых МДС и ЭДС синхронных и асинхронных электрических машин.	4	1	1					2		
4.	Асинхронные машины (АМ)	46	5	13	3	4	2	2	17	ТРК №3	№1 (ч.2)
4.1.	Устройство и физические основы функционирования асинхронной машины в двигательном и тормозных режимах.	5	1	2	1 ПЗ №3				1		
4.2.	Математическое описание установившихся процессов в электрических цепях асинхронной машины.	13	1	3	1 ПЗ №3	1 ПЗ №3	1 ЛР №2	1 ЛР №2	5		
4.3.	Уравнения электромеханической и механической характеристик асинхронной машины.	8	1	2	1 ПЗ №4	1 ПЗ №4			3		
4.4.	Регулирование выходной скорости асинхронных двигателей (АД).	8	1	2		1 ПЗ №5	1 ЛР №1	1 ЛР №2	2		
4.5.	Способы пуска асинхронных двигателей. АД с особыми пусковыми свойствами и естественными механическими характеристиками.	4	1	1		1 ПЗ №5			1		
4.6.	Общие сведения о специальных конструкциях и режимах работы асинхронных машин.	8		3					5		
5.	Синхронные машины (СМ)	34	4	11	2	1	3	1	12	ТРК №4	№2 (ч.1)
5.1.	Устройство и физические основы функционирования синхронной машины в генераторном и двигательном режимах.	5	1	2					2		

5.2.	Математическое описание установившихся процессов в электрических цепях синхронной машины.	8	1	3	1	1			2		
					ПЗ №6	ПЗ №6					
5.3.	Эксплуатационные режимы работы и характеристики синхронной машины.	12	1	3	1		3	1	3		
					ПЗ №6		ЛР №3	ЛР №3			
5.4.	Общие сведения о специальных конструкциях и режимах работы синхронных машин.	4		2					2		
5.5.	Неустановившиеся и переходные процессы синхронных машин.	5	1	1					3		
6.	Машины постоянного тока (МПТ)	24	3	8	2		3	1	7	ТРК №5	№2 (ч.2)
6.1.	Устройство и физические основы функционирования машины постоянного тока в двигательном и тормозных режимах.	6	1	1	1				3		
					ПЗ №7						
6.2.	Реакция якоря машины постоянного тока. Особенности работы щеточно-коллекторного узла.	5	1	2					2		
6.3.	Эксплуатационные режимы работы и характеристики генераторов постоянного тока (ГПТ).	6		2	1		1	1	1		
					ПЗ №7		ЛР №4	ЛР №4			
6.4.	Эксплуатационные режимы работы и характеристики двигателей постоянного тока (ДПТ).	7	1	3			2		1		
							ЛР №5				
	Заключение	1		1							

2.2.3. Тематический план дисциплины для студентов **заочной** формы обучения

№ п/п	Наименование раздела, (отдельной темы)	Общее кол-во час.	Виды занятий и текущего контроля									
			Лекции		ПЗ		ЛР		Сам. раб.	Тесты рубежного контроля	Контр. раб.	
			ауд.	ДОТ	ауд.	ДОТ	ауд.	ДОТ				

ВСЕГО		170	12	58	-	16	8	8	68	5	2
	Введение	1		1							
1.	Общие основы функционирования и устройства электрических машин	22		8					14	ТРК №1	
1.1.	Физические основы электромагнитного и электромеханического преобразования энергии в электрических машинах.	11		3					8		
1.2.	Термины и определения, характеризующие режимы работы электрических машин.	2		1					1		
1.3.	Основы классификации электрических машин.	3		1					2		
1.4.	Потери и КПД электрических машин.	2		1					1		
1.5.	Нагрев и охлаждение электрических машин.	2		1					1		
1.6.	Требования, предъявляемые к электрическим машинам. Современное состояние и тенденции развития ЭМ.	2		1					1		
2.	Трансформаторы	34	3	10		4	2	2	13	ТРК №2	№1 (ч.1)
2.1.	Общие сведения об устройстве, назначении и принципе действия трансформаторов.	3		1		1			1		
2.2.	Конструктивные особенности трансформаторов.	5		2		1			2		
2.3.	Математическое описание физических процессов в электрических и магнитных цепях трансформатора.	8	1	2		1		1	3		
2.4.	Особенности устройства и работы трехфазных трансформаторов.	5	1	1					3		
2.5.	Эксплуатационные режимы работы и характеристики трансформатора.	9	1	2		1	2	1	2		
2.6.	Автотрансформаторы. и Специальные трансформаторы.	4		2					2		

3.	Общие вопросы теории и устройства синхронных и асинхронных машин	8		2					6		
3.1.	Фазные обмотки реальных трехфазных асинхронных и синхронных машин.	4		1		1			2		
3.2.	Способы подавления высших гармоник в кривых МДС и ЭДС синхронных и асинхронных электрических машин.	4		1		1			2		
4.	Асинхронные машины (АМ)	46	3	15		7		4	17	ТРК №3	№1 (ч.2)
4.1.	Устройство и физические основы функционирования асинхронной машины в двигательном и тормозных режимах.	5	1	1		2 ПЗ №3		1 ЛР №2			
4.2.	Математическое описание установившихся процессов в электрических цепях асинхронной машины.	12	1	4		2 ПЗ №4		1 ЛР №2	4		
4.3.	Уравнения электромеханической и механической характеристик асинхронной машины.	7	1	2		2 ПЗ №5		1 ЛР №2	1		
4.4.	Регулирование выходной скорости асинхронных двигателей (АД).	9		3		1 ПЗ №5		1 ЛР №2	4		
4.5.	Способы пуска асинхронных двигателей. АД с особыми пусковыми свойствами и естественными механическими характеристиками.	5		2					3		
4.6.	Общие сведения о специальных конструкциях и режимах работы асинхронных машин.	8		3					5		
5.	Синхронные машины (СМ)	34	3	15		3	2	2	9	ТРК №4	№2 (ч.1)
5.1.	Устройство и физические основы функционирования синхронной машины в генераторном и двигательном режимах.	5	1	2					2		

5.2.	Математическое описание установившихся процессов в электрических цепях синхронной машины.	6	1	2		1			2		
						ПЗ №6					
5.3.	Эксплуатационные режимы работы и характеристики синхронной машины.	13	1	5		2	2	2	1		
						ПЗ №6	ЛР №3	ЛР №3			
5.4.	Общие сведения о специальных конструкциях и режимах работы синхронных машин.	5		3					2		
5.5.	Неустановившиеся и переходные процессы синхронных машин.	5		3					2		
6.	Машины постоянного тока (МПТ)	24	3	6		2	2	2	9	ТРК №5	№2 (ч.2)
6.1.	Устройство и физические основы функционирования машины постоянного тока в двигательном и тормозных режимах.	6	1	2					3		
6.2.	Реакция якоря машины постоянного тока. Особенности работы щеточно-коллекторного узла.	4		2					2		
6.3.	Эксплуатационные режимы работы и характеристики генераторов постоянного тока (ГПТ).	7	1	1		1	1	1	2		
						ПЗ №7		ЛР №4	ЛР №4		
6.4.	Эксплуатационные режимы работы и характеристики двигателей постоянного тока (ДПТ).	7	1	1		1	1	1	2		
						ПЗ №7		ЛР №5	ЛР №5		
	Заключение	1		1							

2.3. Структурно-логическая схема дисциплины



2.4. Временной график изучения дисциплины при использовании информационно-коммуникативных технологий

№	Название раздела (темы)	Ориент. продолж. изуч. разд. (темы) (4 часа в день)
1.	Введение. Общие основы функционирования и устройства электрических машин (22+1=23 часа)	6 дней
2.	Трансформаторы (34 часа)	9 дней
3.	Общие вопросы теории и устройства синхронных и асинхронных машин (8 часов)	2 дня
4.	Асинхронные машины (46 часов)	12 дней
5.	Синхронные машины (34 часа)	9 дней
6.	Машины постоянного тока. Заключение (24+1=25 часов)	6 дней
ИТОГО		44 дня

2.5. Практический блок

2.5.1. Практические занятия

2.5.1.1. Практические занятия (очная и очно-заочная формы обучения)

Номер и название раздела (темы)	Наименование темы практических занятий	Кол-во часов	
		ауд.	ДОТ
2. Трансформаторы	Расчет параметров и режимов работы трансформатора	3	1
4. Асинхронные машины	Расчет параметров и режимов работы асинхронной машины	3	4
5. Синхронные машины	Расчет параметров и режимов работы синхронной машины	2	1
6. Машины постоянного тока	Расчет параметров и режимов работы машины постоянного тока	2	-
ИТОГО		10	6

2.5.1.2. Практические занятия (заочная форма обучения)

Номер и название раздела (темы)	Наименование темы практических занятий	Кол-во часов	
		ауд.	ДОТ
2. Трансформаторы	Расчет параметров и режимов работы трансформатора	-	4
4. Асинхронные машины	Расчет параметров и режимов работы асинхронной машины	-	7
5. Синхронные машины	Расчет параметров и режимов работы синхронной машины	-	3
6. Машины постоянного тока	Расчет параметров и режимов работы машины постоянного тока	-	2
ИТОГО		-	16

2.5.2. Лабораторный практикум

Номер и название раздела (темы)	Номер и наименование темы лабораторной работы	Кол-во часов (форма обучения)					
		очная		Очно- заочная		заочная	
		ауд.	ДОТ	ауд.	ДОТ	ауд.	ДОТ
2. Трансформаторы	№1: Исследование однофазного трансформатора	4	-	4	-	2	2
4. Асинхронные машины	№2: Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	4	-	2	2	2	2
5. Синхронные машины	№3: Исследование синхронного генератора	4	-	3	1	2	2
6. Машины постоянного тока	№4: Исследование генератора постоянного тока	2	-	1		1	1
	№5: Исследование двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением	2		2	1	1	1
	ИТОГО	16	-	12	4	8	8

ПРИМЕЧАНИЕ: при освоении дисциплины возможно использование материально-технической и методической базы учебно-исследовательской лаборатории кафедры электротехники и электромеханики СЗТУ, предоставляющей возможность выполнения лабораторных работ по сети ИНТЕРНЕТ с управлением реальными лабораторными стендами через удаленный компьютер (подробнее см. «Методические указания к выполнению лабораторных работ. Выпуск 1. Асинхронные машины с короткозамкнутым ротором / сост. А. А. Булгаков, В. Е. Воробьев, В. И. Рябуха, А.А. Томов.- СПб.: Изд-во СЗТУ, 2008.- 30 с.).

2.6. Балльно-рейтинговая система оценки знаний

Общие пояснения

Общее максимальное количество баллов, которое можно набрать по всем видам учебной нагрузки, составляет 100 баллов.

При этом каждый вид учебной нагрузки дает в целом следующее максимальное количество баллов:

- освоение теоретического материала, объем и содержание которого соответствуют рабочей программе и соответствующему тематическому плану – **60 баллов**;
- выполнение программы лабораторных работ – **20 баллов**;
- выполнение программы практических занятий (для очной формы

обучения) – **20 баллов**;

- выполнение программы контрольных работ (для очно-заочной и заочной формам обучения) – **20 баллов**.

Максимальное количество баллов, которое можно набрать по каждому виду учебной нагрузки (виду занятий) и каждому разделу дисциплины представлено в табл. 2.6.1.

Таблица 2.6.1.

Максимальное количество баллов, которое можно набрать по каждому разделу учебного материала и виду учебной нагрузки (виду занятий) при соответствующем тестировании или другом виде контроля

№ п/п	Наименование раздела,	Общее количество баллов	Виды занятий, их рейтинговый вес, и формы контроля		
			Лекционные занятия (тестирование или зачет)	Лабораторные работы, (зачет по материалу л/р)	Практические занятия (зачет по материалу к/р)
1.	Общие основы функционирования и устройства электрических машин	5	5	-	-
2.	Трансформаторы	23	13	5	5
3.	Общие вопросы теории и устройства синхронных и асинхронных машин	3	3	-	-
4.	Асинхронные машины (АМ)	26	16	5	5
5.	Синхронные машины (СМ)	24	14	5	5
6.	Машины постоянного тока (МПТ)	19	9	5	5
ВСЕГО		100	60	20	20

В табл. 2.6.2. указаны баллы, которые можно набрать на контрольных мероприятиях по теоретическому материалу каждой темы дисциплины (подробнее см. п. 4).

Табл. 2.6.2.

Рейтинговый «вес» теоретического материала

№ п/п	Наименование раздела и темы	«Вес»
1.	Общие основы функционирования и устройства электрических машин	5

1.1.	Физические основы электромагнитного и электромеханического преобразования энергии в электрических машинах	2,5
1.2.	Термины и определения, характеризующие режимы работы электрических машин	0,5
1.3.	Основы классификации электрических машин	0,5
1.4.	Потери и КПД электрических машин	0,5
1.5.	Нагрев и охлаждение электрических машин	0,5
1.6.	Требования, предъявляемые к электрическим машинам. Современное состояние и тенденции развития ЭМ	0,5
2.	Трансформаторы	13
2.1.	Общие сведения об устройстве, назначении и принципе действия трансформаторов	2,0
2.2.	Конструктивные особенности трансформаторов	1,5
2.3.	Математическое описание физических процессов в электрических и магнитных цепях трансформатора	3,0
2.4.	Особенности устройства и работы трехфазных трансформаторов	2,0
2.5.	Эксплуатационные режимы работы и характеристики трансформатора	3,0
2.6.	Автотрансформаторы и специальные трансформаторы	1,5
3.	Общие вопросы теории и устройства синхронных и асинхронных машин	3
3.1.	Фазные обмотки реальных трехфазных асинхронных и синхронных машин	2,0
3.2.	Способы подавления высших гармоник в кривых МДС и ЭДС синхронных и асинхронных электрических машин	1,0
4.	Асинхронные машины (АМ)	16
4.1.	Устройство и физические основы функционирования асинхронной машины в двигательном и тормозных режимах	3,5
4.2.	Математическое описание установившихся процессов в электрических цепях асинхронной машины	4,0
4.3.	Уравнения электромеханической и механической характеристик асинхронной машины	2,0
4.4.	Регулирование выходной скорости асинхронных двигателей (АД)	2,5
4.5.	Способы пуска асинхронных двигателей. АД с особыми пусковыми свойствами и естественными механическими характеристиками	2,0

4.6.	Общие сведения о специальных конструкциях и режимах работы асинхронных машин	2,0
5.	Синхронные машины (СМ)	14
5.1.	Устройство и физические основы функционирования синхронной машины в генераторном и двигательном режимах	4,0
5.2.	Математическое описание установившихся процессов в электрических цепях синхронной машины	3,0
5.3.	Эксплуатационные режимы работы и характеристики синхронной машины	4,0
5.4.	Общие сведения о специальных конструкциях и режимах работы синхронных машин	1,5
5.5.	Неустановившиеся и переходные процессы синхронных машин	1,5
6.	Машины постоянного тока (МПТ)	9
6.1.	Устройство и физические основы функционирования машины постоянного тока в двигательном и тормозных режимах	3
6.2.	Реакция якоря машины постоянного тока. Особенности работы щеточно-коллекторного узла	1,5
6.3.	Эксплуатационные режимы работы и характеристики генераторов постоянного тока (ГПТ)	2,0
6.4.	Эксплуатационные режимы работы и характеристики двигателей постоянного тока (ДПТ)	2,5
ВСЕГО		60

Подробнее о содержании и порядке организации текущего и итогового контроля знаний см. в п. 4.1. База тестовых заданий, из которых формируются тренировочные тесты, а также тесты рубежного и итогового контроля содержит примерно 320 заданий, охватывающих все темы дисциплины. С образцами указанных выше тестов можно ознакомиться в п.п. 4.3 и 4.4.

3. ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Библиографический список

Основная литература:

1. Штыков, В. Ф. Электрические машины [Электронный ресурс]: учебное пособие / В. Ф. Штыков.- СПб. : Изд-во СЗТУ, 2009.- 475 с. (170 Мб).
2. Копылов, И. П. Электрические машины: учебник для вузов / И. П. Копылов. - Изд. 5-е, испр. - М. : Высш. шк., 2004. – 608 с.

Дополнительная литература:

3. Брандина, Е. П. Электрические машины: опорный конспект (конспект лекций), примеры решения задач / Е. П. Брандина. - СПб. : Изд-во СЗТУ, 2007. - 99 с.
4. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - СПб. : Питер, 2008. - 319 с.
5. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - СПб.: Питер, 2008. - 349 с.
6. Герман-Галкин, С. Г. Электрические машины: лаб. работы на ПК / С. Г. Герман-Галкин, Г. А. Кардонов. - СПб. : КОРОНА принт, 2007. - 256 с. : рис. + 1 эл. гиб. диск. - (Компьютерная лаборатория).
7. Касаткин, А. С. Электротехника: учебник для вузов / А. С. Касаткин, М.В. Немцов.- М.: Академия, 2008.- 538 с.
8. Электрические машины: учеб.-метод. комплекс, информ. ресурсы дисциплины, метод. указания к выполнению лаб. работ / сост.: Е. П. Брандина, В. В. Воробьев. - СПб. : Изд-во СЗТУ, 2008. - 58 с.

Ресурсы Internet:

9. <http://www.edu.ru/modules.php?name>
10. <http://window.edu.ru/window/portals>
11. <http://www.google.com/search?q=Конспект>
12. <http://www.nwpi.ru/>

Примечание:

Электронная версия учебного пособия [1] сформирована в виде 6 файлов, соответствующих каждому из 6 разделов дисциплины: Shtykov_EM-1 (10,5 Мб), Shtykov_EM-2 (17,2 Мб), Shtykov_EM-3 (13,9 Мб), Shtykov_EM-4 (27,7 Мб), Shtykov_EM-5 (16,7 Мб), Shtykov_EM-6 (9 Мб), находящихся в каталоге Shtykov_EM.

3.2. ОПОРНЫЙ КОНСПЕКТ

3.2.1. Общие пояснения

Ниже приведен полный перечень тем дисциплины «Электрические машины», отражающий требования ГОС к обязательному минимуму содержания основной образовательной программы и соответствующий следующим разделам:

1. Общие основы функционирования и устройства электрических машин.
2. Трансформаторы.
3. Общие вопросы теории и устройства синхронных и асинхронных машин.
4. Асинхронные машины.
5. Синхронные машины.
6. Машины постоянного тока.

Для оценки объема и сложности учебного материала, а также для

самоконтроля своих знаний по дисциплине опорный конспект содержит:

- перечень разделов и тем в соответствии с рабочей программой дисциплины (п. 2.1);
- учебный теоретический материал по основным темам дисциплины (частично);
- вопросы для самоконтроля по каждой теме.

К сожалению, максимально допустимый объем опорного конспекта не позволяет включить в него весь теоретический учебный материал дисциплины, который можно найти в [1], [2], а также в других источниках информации, указанных в библиографическом списке (см. п. 3.1).

3.2.2. БАЗОВЫЙ УЧЕБНЫЙ МАТЕРИАЛ И ПЕРЕЧЕНЬ КОНТРОЛЬНЫХ ВОПРОСОВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Введение

К классическим электрическим машинам (ЭМ) относятся ЭМ, предназначенные для преобразования или механической энергии в электрическую, или электрической энергии в механическую. Таким образом, классическая электрическая машина представляет собой электромеханический преобразователь энергии.

Преобразование указанных выше видов энергии требует наличие двух обязательных условий:

- механического перемещения активных частей электрической машины относительно друг друга;
- электромагнитного взаимодействия между взаимно перемещающимися активными частями электрической машины.

Типовая конструктивная схема электромеханического преобразователя энергии имеет две основные части — вращающуюся, называемую ротором, и неподвижную, называемую статором (рис. В.1).

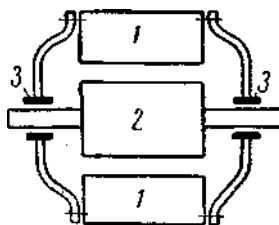


Рис. В.1. Типовая конструктивная схема электромеханического преобразователя энергии с вращающимся ротором:

1—статор; 2 — ротор; 3 — подшипники

К отдельному классу электрических машин относят **трансформаторы**, представляющие собой статические электромагнитные аппараты, которые

служат для преобразования переменного тока с одними параметрами в переменный ток с другими параметрами.

Трансформатор не является машиной в классическом понимании этого слова (он не имеет движущихся частей и в нем не происходит электромеханического преобразования энергии), однако основные соотношения между параметрами физических процессов в классических электрических машинах и трансформаторах едины.

Электрические машины, предназначенные для преобразования механической энергии в электрическую, называются **электрическими генераторами**. Электрические машины, предназначенные для преобразования электрической энергии в механическую, называются **электродвигателями**.

Электрические машины с вращающимся ротором применяются также для преобразования рода тока (например, переменного тока в постоянный), частоты и числа фаз переменного тока, постоянного тока одного напряжения в постоянный ток другого напряжения. Такие машины называются **электромашинными преобразователями**. В настоящее время роль электромашинных преобразователей существенно уменьшилась вследствие широкого применения экономически более выгодных статических полупроводниковых преобразователей.

Различают **машины переменного тока** и **машины постоянного тока** в зависимости от того, каким видом электрического тока (без применения промежуточных дополнительных преобразователей) они обеспечивают потребителей (в режиме генератора) или потребляют из сети (в режиме двигателя).

Отличительной конструктивной особенностью классической машины постоянного тока является то, что она, как правило, снабжается щеточно-коллекторным узлом, который служит:

- для получения на выходных зажимах генератора постоянного тока ЭДС одного направления (электромеханического выпрямления внутренней переменной ЭДС генератора);
- для преобразования (инвертирования) внешнего постоянного входного тока двигателя в переменные токи во внутренних частях его силовой цепи таким образом, чтобы результирующий электромагнитный момент, возникающий от взаимодействия рабочего магнитного поля и токов в обмотке ротора, действовал на ротор все время в одном направлении.

Широкое многообразие машин переменного тока можно разделить на две большие группы: **синхронные и асинхронные ЭМ**. В тех и других машинах в их рабочем зазоре возникает вращающееся рабочее (основное) магнитное поле. При этом, ротор синхронной машины вращается со скоростью, равной скорости вращения основного магнитного поля, а ротор асинхронной машины вращается со скоростью, не равной скорости вращения основного поля («проскальзывает» относительно силовых линий магнитного поля).

Машины переменного тока бывают **однофазные и многофазные** (чаще всего трехфазные): первые генерируют или потребляют однофазный ток, вторые — многофазный (трехфазный) ток.

Находят применение также **коллекторные машины переменного тока**, ротор которых выполняется так же, как ротор машины постоянного тока. Относительным преимуществом коллекторных машин переменного тока является возможность плавно и экономично регулировать их скорость вращения. Однако область их применения весьма ограничена вследствие высокой стоимости, сложности ухода за ними и относительно малой надежности в работе.

Электромашинные компенсаторы по конструкции являются синхронными машинами и осуществляют генерирование реактивной мощности в электрических установках переменного тока для улучшения их энергетических показателей (для повышения $\cos \varphi$).

Электромашинные усилители по конструкции являются машинами постоянного тока, их используют для управления объектами большой мощности, подключенных к зажимам якорной обмотки, посредством электрических сигналов малой мощности, подаваемых на обмотки управления (возбуждения).

Электрические машины небольшой мощности (до 600 Вт) относят к классу **микромашин**, в числе которых имеются:

силовые микродвигатели (применяются в качестве приводов различных бытовых механизмов и автоматических устройств, самопишущих приборов и т.п.), не требующих, как правило, регулирования скорости;

исполнительные двигатели (преобразуют подводимый к ним электрический сигнал в пропорциональный ему механический параметр (путь, угол и т.п.), связанный с перемещением рабочего органа);

тахогенераторы (преобразуют механические параметры вращательного движения (частоту вращения, угловую скорость) в электрический сигнал (напряжение, ток) пропорциональный величине этих параметров);

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, магнесины (обеспечивают синхронный и синфазный поворот или вращение нескольких механически не связанных между собой осей);

микромашинные гироскопических приборов - гироскопические двигатели (осуществляют вращение роторов гироскопов с высокой частотой, а также коррекцию их положения).

Кроме того, все электрические машины, независимо от их функционального назначения и принципа действия классифицируются по конструктивному исполнению в зависимости:

- **от способа их монтажа** (учитываются требования к способу крепления электрических машин, соединения их валов с валами других механизмов, ориентации в пространстве (горизонтальное, вертикальное и пр.);

- **от климатических условий их эксплуатации** (учитываются различные климатические условия, влажность, температура окружающего воздуха, давление (например, различная высота над уровнем моря), содержание в

окружающей среде тех или иных коррозионно-активных элементов, и другие условия, существенно отличающиеся от нормальных, для работы в которых предназначена машина);

•от степени защиты от попадания внутрь машины твердых посторонних тел и воды;

•от способа охлаждения электрических машин (учитывается та или иная система вентиляции, расположение вентилятора и система забора охлаждающего воздуха).

Раздел 1. ОБЩИЕ ОСНОВЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Тема 1.1. Физические основы электромагнитного и электромеханического преобразования энергии в электрических машинах

Учебный материал по данной теме имеет общий базовый характер и играет важное значение для дальнейшего понимания специальных тем. Материал подробно изложен в первой части учебного пособия [1] на с. 5-41, а также в литературе по общей электротехнике, например, [6]. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 1.1.

1. Дайте определение магнитной цепи электрической машины.
2. Что собой представляют генерирующие зоны магнитопроводов электрических машин?
3. Как направлены силовые линии магнитного поля вне генерирующей зоны и внутри её?
4. В каких реальных физических явлениях проявляет себя магнитное поле?
5. В каком случае в проводнике, движущемся в однородном магнитном поле, не индуцируется ЭДС?
6. В каком случае на проводник с током, находящийся в однородном магнитном поле, не действует электромагнитная сила?
7. Поясните практическое значение введения и применения понятия «напряженность магнитного поля».
8. За счет каких технических решений создается магнитодвижущая сила (МДС)? Как определить направление и величину МДС?
9. Сформулируйте законы Ома и Кирхгофа для магнитной цепи.
10. Приведите математическое выражение для закона электромагнитной индукции в формулировке Фарадея при произвольном движении проводника в однородном магнитном поле.
11. Продемонстрируйте применение «правила правой руки (ладони)».
12. Почему формулировка Максвелла для закона электромагнитной индукции является более универсальной, чем формулировка Фарадея?
13. Какому реальному физическому явлению соответствует расчетный параметр «индуктивное сопротивление электрическому току»?

14. Изобразите взаимное расположение вектора синусоидальной ЭДС, наводимой в катушке, и вектора синусоидального магнитного потока, вызвавшего эту ЭДС.

15. Изобразите взаимное положение вектора синусоидального электрического напряжения, приложенного к катушке, и вектора синусоидального тока, вызванного этим напряжением.

16. Объясните, на основе происходящих реальных физических явлений, почему индуктивное сопротивление катушки возрастает (уменьшается) при увеличении (уменьшении) частоты тока, протекающего по катушке, при увеличении (уменьшении) числа витков, сцепленных с «собственным» магнитным потоком, при уменьшении (увеличении) магнитного сопротивления магнитопровода.

17. В каком случае и как применяется «правило левой руки»?

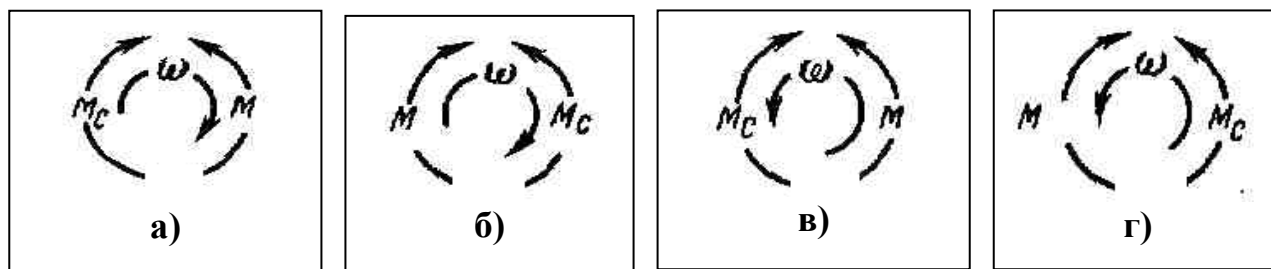
18. В каком случае рассматриваемый объект является для внешней среды (взаимодействующего с ним внешнего объекта) источником энергии?

19. В каком случае рассматриваемый объект является для внешней среды (взаимодействующего с ним внешнего объекта) потребителем энергии?

20. Какие элементы электрических машин являются границами, на которых происходит обмен энергией между электрической машиной и внешними объектами (нагрузкой)?

21. Какому режиму работы электрической машины соответствует положительный знак мощности (потока энергии) электрической сети, развиваемой на зажимах машины?

22. Какому режиму работы электрической машины соответствуют указанные ниже схемы установившихся режимов работы электрической машины (ω – угловая скорость вращения вала; M – электромагнитный момент электрической машины; M_c – момент механизма, сопряженного с валом электрической машины)?:



23. С какой целью магнитопроводы электрических машин и аппаратов изготавливают из ферромагнитных материалов?

24. Назовите наиболее часто применяемые ферромагнитные материалы.

25. Поясните, почему при синусоидальном питающем напряжении ток в катушке с ферромагнитным сердечником является несинусоидальным?

26. Какие потери характеризуются площадью статической петли гистерезиса?

27. Какие потери характеризуются разностью площадей динамической и статической петель гистерезиса?

28. Какие меры принимают для уменьшения потерь от вихревых токов?

29. От чего зависят потери на гистерезис?

30. Изложите основные подходы и принципы построения векторных диаграмм для цепей переменного тока.

31. Приведите алгоритм расчета параметров обмотки (тока и числа витков) по заданному значению магнитного потока Φ или магнитной индукции B , создаваемых ей в магнитопроводе.

Тема 1.2. Термины и определения, характеризующие режимы работы электрических машин

Термины и определения в области характеристик, расчетных параметров и режимов работы машин установлены ГОСТами и являются обязательными для применения в документации всех видов, в учебниках и учебных пособиях, в технической и справочной литературе. Стандарты содержат более 200 терминов и определений. В настоящем материале приводятся основные из них, относящиеся ко всем или ко многим типам вращающихся электрических машин независимо от их назначения и конструктивного исполнения.

Номинальными данными электрической машины называют данные, характеризующие ее работу в режиме, для которого она предназначена заводом-изготовителем. К номинальным данным относятся мощность, напряжение, ток, частота, КПД, коэффициент мощности, частота вращения и ряд других данных в зависимости от типа и назначения машины.

Номинальным режимом работы электрической машины называется порядок чередования и продолжительности нагрузки, холостого хода, торможения, пуска и реверса машины во время ее работы, установленный заводом-изготовителем и которому соответствуют номинальные данные машины.

Номинальная мощность — мощность, для работы с которой в номинальном режиме машина предназначена заводом-изготовителем. Для различных типов машин к номинальной мощности относят:

для генераторов переменного тока — полную электрическую мощность на внешних выводах при номинальном коэффициенте мощности;

для генераторов постоянного тока — электрическую мощность на внешних выводах машины;

для двигателей переменного и постоянного тока — механическую мощность на валу;

для синхронных и асинхронных компенсаторов — реактивную мощность на внешних выводах компенсатора.

Номинальное напряжение — напряжение, на которое машина рассчитана заводом-изготовителем для работы в номинальном режиме с номинальной мощностью. **Номинальным напряжением трехфазных машин** называют линейное напряжение, т. е. напряжение между фазами сети, к которой подключена машина.

Номинальный ток — ток, соответствующий работе машины в номинальном режиме с номинальной мощностью и частотой вращения при номинальном напряжении.

Номинальным напряжением ротора асинхронного двигателя с трехфазной обмоткой называют напряжение на выводах разомкнутой обмотки ротора (напряжение на контактных кольцах) при неподвижном роторе и включенной на номинальное напряжение обмотке статора.

Номинальное напряжение возбуждения машины — напряжение на выводах (или контактных кольцах) обмотки возбуждения с учетом падения

напряжения под щетками при питании ее номинальным током возбуждения, когда активное сопротивление приведено к расчетной рабочей температуре, при работе машины в номинальном режиме с номинальными мощностью, напряжением и частотой вращения.

Номинальный ток возбуждения — ток возбуждения, соответствующий работе машины в номинальном режиме с номинальной мощностью и частотой вращения при номинальном напряжении.

Номинальная частота вращения — частота вращения вала, соответствующая работе машины при номинальных напряжении, мощности и частоте тока и номинальных условиях применения.

Номинальные условия применения — условия, установленные в стандарте или технических условиях на данный конкретный тип машины.

Номинальный коэффициент полезного действия — отношение величины всей полезной (отдаваемой) мощности к величине всей затрачиваемой (подводимой) мощности при работе машины с номинальными мощностью, напряжением, частотой тока и частотой вращения.

Номинальный коэффициент мощности машин переменного тока:

- для генераторов — отношение величины отдаваемой активной электрической мощности к величине полной отдаваемой электрической мощности;
- для двигателей — отношение величины активной потребляемой электрической мощности к величине полной потребляемой электрической мощности при работе машины в номинальном режиме, с номинальными мощностью на валу, напряжением, частотой тока и частотой вращения.

Нагрузка — мощность, которую развивает электрическая машина в данный момент времени. Нагрузка может быть выражена в единицах активной или полной мощности, либо в долях номинальной мощности. Она также может выражаться величиной тока, потребляемого или отдаваемого электрической машиной.

Номинальная нагрузка — нагрузка, соответствующая номинальной мощности машины.

Практически неизменная нагрузка — нагрузка, при которой отклонение тока и напряжения якоря и мощности машины от значений, соответствующих заданному режиму, составляет не более 3 %, тока возбуждения и частоты — не более 1 %.

Практически симметричная трехфазная система напряжений — трехфазная система напряжений, в которой напряжение обратной последовательности не превышает 1 % от напряжения прямой последовательности.

Практически симметричная система токов — трехфазная система, для которой ток обратной последовательности не превышает 5 % от тока прямой последовательности.

Начальный пусковой ток электродвигателя — установившийся ток в обмотке электродвигателя при неподвижном роторе, номинальном подведенном напряжении и номинальной частоте, при соединении обмоток

машины, соответствующем номинальным условиям работы двигателя.

Начальный пусковой момент электродвигателя — вращающий электромагнитный момент электродвигателя, развиваемый при неподвижном роторе, установившемся токе, номинальном подведенном напряжении, номинальной частоте и соединении обмоток, соответствующем номинальным условиям работы двигателя.

Максимальный (критический) вращающий момент электродвигателя переменного тока — наибольший момент вращения, развиваемый двигателем в установившемся режиме при номинальных напряжении и частоте питающей сети, при соединении обмоток, соответствующем номинальным условиям работы, и (для синхронных двигателей) при номинальном токе возбуждения.

Номинальное изменение напряжения электрических генераторов — изменение напряжения на выводах генератора, работающего на автономную сеть с неизменной и равной номинальной частотой вращения при изменении его нагрузки от номинальной до холостого хода. Для генераторов с независимым возбуждением, кроме того, — при сохранении номинального тока возбуждения, а для генераторов с самовозбуждением — при неизменном сопротивлении всей цепи обмотки возбуждения. Номинальное изменение напряжения выражают в процентах или в долях от номинального напряжения генератора.

Номинальное изменение частоты вращения электродвигателя — изменение частоты вращения двигателя, работающего при номинальном напряжении на его выводах и номинальной частоте тока, при изменении нагрузки от номинальной до нулевой, а для двигателей, не допускающих нулевой нагрузки, — от номинальной до 25% номинальной. Номинальное изменение частоты вращения выражают в процентах или в долях номинальной частоты вращения.

Каждая электрическая машина имеет **паспортную табличку**, выбитую на металлической пластине и прикрепленную к корпусу. В этой табличке указаны тип машины и ее номинальные данные, характеризующие основные энергетические показатели и условия работы, на которые она рассчитана. В паспортной табличке приводятся также название завода-изготовителя, год выпуска, класс изоляции и дополнительные данные, необходимые для монтажа и эксплуатации машины (масса, схема включения обмоток и др.).

Электрические машины выпускают на **стандартные номинальные напряжения**, согласованные со стандартными напряжениями электрических сетей. Стандартные напряжения генераторов примерно на 5... 10% выше, чем двигателей; например, если стандартное напряжение двигателя 220 В, то стандартное напряжение генератора — 230 В и т. п. Разница в стандартных напряжениях двигателей и генераторов обусловлена потерями напряжения в электрических сетях, к которым подключены генераторы и двигатели. В трансформаторах стандартные напряжения на первичных обмотках (входных) принимаются равными «двигательным», а на вторичных обмотках (выходных) — «генераторным».

Более подробно учебный материал по данной теме изложен в первой части

учебного пособия [1] на с. 41-48. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 1.2.

1. Дайте определения следующим терминам:

- номинальные данные;
- номинальный режим работы;
- номинальная мощность для генераторов переменного тока;
- номинальная мощность для генераторов постоянного тока;
- номинальная мощность для двигателей переменного и постоянного тока;
- номинальная мощность для синхронных и асинхронных компенсаторов;
- номинальное напряжение;
- номинальное напряжение трехфазных машин;
- номинальный ток;
- номинальное напряжение ротора асинхронного двигателя с трехфазной обмоткой;
- номинальное напряжение возбуждения машины;
- номинальный ток возбуждения;
- номинальная частота вращения;
- номинальные условия применения;
- номинальный коэффициент полезного действия;
- номинальный коэффициент мощности генератора переменного тока;
- номинальный коэффициент мощности двигателя переменного тока;
- нагрузка;
- номинальная нагрузка;
- практически неизменная нагрузка;
- практически симметричная трехфазная система напряжений;
- практически симметричная система токов;
- начальный пусковой ток электродвигателя;
- начальный пусковой момент электродвигателя;
- максимальный (критический) вращающий момент электродвигателя;
- номинальное изменение напряжения электрических генераторов;
- номинальное изменение частоты вращения электродвигателя;
- паспортная табличка;
- стандартное номинальное напряжение;

2. Какой режим работы электрической машины называется «продолжительным режимом работы»? Какое условное обозначение имеет этот режим?

3. Какой режим работы электрической машины называется «кратковременным режимом работы»? Какое условное обозначение имеет этот режим?

4. Какой режим работы электрической машины называется «повторно-кратковременным режимом работы»? Какое условное обозначение имеет этот режим?

5. Какой режим работы электрической машины называется «перемежающимся режимом работы»? Какое условное обозначение имеет этот режим?

Тема 1.3. Основы классификации электрических машин

Учебный материал по данной теме подробно изложен в первой части учебного пособия [1] на с. 48-57. Сведения по теме приведены также во введении. Для общего представления о содержании темы и объеме

необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 1.3.

1. Какие конструктивные элементы содержит типовой электромеханический преобразователь энергии?
2. Какие машины называются электромашинными преобразователями?
3. Какие машины называются трансформаторами?
4. Почему трансформатор нельзя отнести к классической электрической машине?
5. На какие две большие группы можно разделить все многообразие машин переменного тока?
6. По каким конструктивным особенностям можно отличить машины постоянного тока от машин переменного тока?
7. Для чего предназначены тахогенераторы?
8. Для чего предназначены машины синхронной связи (сельсины, магнесины)?
9. Как обозначаются машины в зависимости от климатических условий, для которых они предназначены?
10. Как конструкции электрических машин классифицируются по степени защиты от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями электротехнических изделий и от попадания твердых тел и воды внутрь корпуса?
11. Какие способы применяют для охлаждения электрических машин?

Тема 1.4. Потери и КПД электрических машин

Учебный материал по данной теме подробно изложен в первой части учебного пособия [1] на с. 57-68. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 1.4.

1. Зачем необходимо уметь определять потери электрической машины?
2. Каким образом можно уменьшить потери в электрических машинах?
3. Из чего состоят потери, зависящие от нагрузки электрической машины (переменные потери)?
4. Из чего состоят потери, не зависящие от нагрузки электрической машины (постоянные потери)?
5. Дайте определение КПД электрической машины.
6. Какую формулу целесообразно применять для определения КПД электродвигателей, находящихся в эксплуатации или на испытаниях?
7. Какую формулу целесообразно применять для определения КПД электрогенераторов, находящихся в эксплуатации или на испытаниях?
8. В каких режимах работы электрической машины её КПД имеет нулевые значения?
9. Сформулируйте условия, при которых КПД электрической машины будет иметь максимальное значение.

Тема 1.5. Нагрев и охлаждение электрических машин

Учебный материал по данной теме подробно изложен в первой части учебного пособия [1] на с. 68-75. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей

программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 1.5.

1. Зачем необходимо следить за температурой электрической машины и принимать меры к её снижению?
2. Чем определяются допустимые значения температуры различных частей электрических машин?
3. Перечислите классы нагревостойкости электроизоляционных материалов и допустимых перегревов для каждого класса.
4. Как определить постоянную времени нагрева электрической машины?

Тема 1.6. Общие требования к электрическим машинам и тенденции развития электромашиностроения

Учебный материал по данной теме подробно изложен в первой части учебного пособия [1] на с. 75-87. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 1.6.

1. Какие параметры номинального режима электрической машины регламентированы стандартами России и рекомендациями МЭК?
2. Какие уровни номинального напряжения переменного тока являются стандартными для условий бывшего СССР?
3. Назовите основные тенденции в развитии электромашиностроения в России и других передовых в данной отрасли странах?
4. Какие показатели электрической машины можно улучшить при снижении момента инерции её подвижной части? За счет каких решений это достигается?
5. Какие показатели электрической машины можно улучшить за счет улучшения эффективности её охлаждения?
6. Какие показатели электрической машины можно улучшить за счет применения изоляции с повышенной электрической и механической прочностью?
7. Какие элементы конструкции электрических машин относятся к активным (главным), а какие к конструктивным (вспомогательным)?
8. Может ли одна и та же машина иметь разную номинальную мощность?

Раздел 2

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Тема 2.1. Общие сведения об устройстве, назначении и принципе действия трансформаторов

Трансформатором (в классическом смысле этого слова) называется электромагнитное устройство, имеющее несколько индуктивно связанных между собой и неподвижных относительно друг друга обмоток, предназначенное для преобразования, посредством электромагнитной индукции, одной или нескольких систем переменного тока с одними параметрами в одну или несколько систем переменного тока с другими

параметрами.

Одну из обмоток трансформатора называют **первичной** и подключают к источнику энергии переменного тока (электрической сети). Вторую обмотку трансформатора называют **вторичной** и подключают на входные зажимы потребителей энергии переменного тока (нагрузки).

Обычно электрическое соединение между первичной и вторичной обмотками трансформатора отсутствует, и энергия из сети в нагрузку передается через трансформатор только лишь за счет электромагнитной связи между обмотками. Для того, чтобы усилить эту связь, обмотки трансформатора размещают (наматывают) на замкнутом магнитопроводе, выполненном из ферромагнитного материала, уменьшая тем самым магнитное сопротивление контура, по которому проходит главный магнитный поток трансформатора.

В зависимости от числа фаз первичной и вторичной обмоток различают **однофазные, трехфазные и многофазные** трансформаторы.

Трансформатор, имеющий две однофазные или многофазные электрически не связанные между собой обмотки, называется **двухобмоточным**; трансформатор, имеющий три или более электрически не связанные между собой обмотки — **трехобмоточным** или **многообмоточным**.

Особой разновидностью трансформатора является **автотрансформатор**, в котором первичная и вторичная обмотки, кроме магнитной связи, имеют еще и электрическое соединение. Поэтому в автотрансформаторах часть энергии из первичной цепи во вторичную передается «прямым» электрическим путем за счет электрического контакта между обмотками.

Каждая из фазных обмоток трансформатора представляет собой многовитковую катушку, охватывающую соответствующий участок магнитопровода.

В зависимости от соотношения между напряжениями первичной и вторичной обмоток различают трансформаторы **понижающие и повышающие**.

В повышающем трансформаторе вторичная обмотка является обмоткой высшего напряжения (ВН).

В понижающем трансформаторе вторичная обмотка является обмоткой низшего напряжения (НН).

На рисунке 2.1.1 представлена физическая схема однофазного двухобмоточного трансформатора, работающего в режиме холостого хода, который состоит из двух обмоток 1 и 2, размещенных на замкнутом магнитопроводе 3, выполненном из ферромагнитного материала.

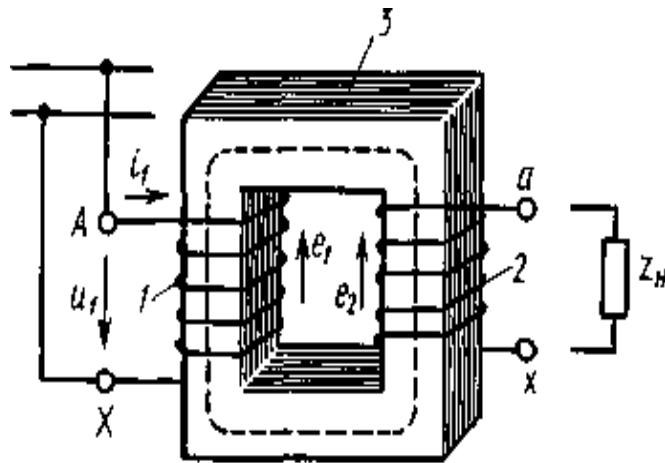


Рис. 2.1.1. Работа трансформатора на холостом ходу

Обмотка 1 является первичной и подключается к электрической сети с напряжением u_1 .

Обмотка 2 является вторичной и может быть подключена на входные зажимы нагрузки с сопротивлением Z_H .

Начала и концы первичной обмотки обозначены на схеме соответственно буквами «А» и «Х», а вторичной обмотки — буквами «а» и «х».

При подключении первичной обмотки к сети в ней возникает небольшой переменный ток холостого хода i_{10} , который создает переменную магнитодвижущую силу $i_{10}W_1$ и переменный магнитный поток Φ , замыкающийся по сердечнику. Поток Φ , в соответствии с законом электромагнитной индукции, индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС — e_1 и e_2 , пропорциональные количеству витков W_1 и W_2 соответствующей обмотки и скорости изменения потока $d\Phi/dt$.

Таким образом, мгновенные значения ЭДС, индуцированные общим потоком Φ в каждой обмотке, определяются следующими выражениями:

$$e_1 = - W_1 d\Phi/dt \quad (2.1.1)$$

$$e_2 = - W_2 d\Phi/dt \quad (2.1.2)$$

Отношение величины ЭДС обмотки высшего напряжения (мгновенного $e_{ВН}$ или действующего $E_{ВН}$ значения) к величине ЭДС обмотки низшего напряжения (мгновенного $e_{НН}$ или действующего $E_{НН}$ значения), или отношение их чисел витков ($W_{ВН}$ к $W_{НН}$) называют **коэффициентом трансформации $k_{тр}$** , т.е.:

$$k_{тр} = e_{ВН} / e_{НН} = E_{ВН} / E_{НН} = W_{ВН} / W_{НН} \quad (2.1.3)$$

В соответствии с приведенным выше определением, коэффициент трансформации всегда больше единицы.

Подбирая соответствующим образом числа витков обмоток, при

имеющемся (заданном) напряжении сети U_1 , можно получить любое желаемое (заданное) напряжение U_2 . При этом:

- если необходимо **повысить** напряжение на вторичной стороне, то число витков W_2 вторичной обмотки нужно взять **большим**, чем число витков W_1 , первичной обмотки;

- если требуется **понижить** напряжение на вторичной стороне, то число витков W_2 вторичной обмотки нужно взять **меньшим** чем число витков W_1 первичной обмотки.

Если пренебречь падениями напряжения в обмотках трансформатора, которые обычно не превышают 3...5% от номинальных значений напряжений первичной и вторичной обмоток, то можно считать, что приблизительно:

$$k_{тр} = U_{вн} / U_{нн} \quad (2.1.4)$$

Ток первичной обмотки создает не только магнитный поток Φ , замыкающийся по магнитопроводу, но и **поток рассеяния** Φ_{s1} , замыкающийся частично по воздуху и сцепляющийся только с витками первичной обмотки и также индуцирующий в ней ЭДС **самоиндукции** $e_{s1} = -W_1 d\Phi_{s1}/dt$.

Однако в режиме холостого хода поток рассеяния Φ_{s1} и создаваемая им ЭДС самоиндукции e_{s1} чрезвычайно малы и ими можно пренебречь. Это связано с тем, что ЭДС первичной обмотки e_1 практически равна по модулю входному напряжению u_1 и находится с ним в противофазе. Вследствие этого в любой момент времени в цепи первичной обмотке действует результирующая ЭДС $e_{1\Sigma}$, равная разности между u_1 и e_1

$$e_{1\Sigma} = u_1 - e_1 \quad (2.1.5)$$

и ток первичной обмотки на холостом ходу (действующее значение):

$$I_{10} = E_{1\Sigma} / Z_1 \quad (2.1.6)$$

где: Z_1 — общее комплексное сопротивление первичной цепи, составляет всего несколько процентов от номинального тока.

При подключении нагрузки Z к внешним выводам вторичной обмотки трансформатора (рис. 2.1.2) по цепи вторичной обмотки начинает протекать ток I_2 , величина которого определяется соотношением

$$I_2 = E_2 / Z_{2\Sigma} = U_2 / Z \quad (2.1.7)$$

где:

E_2 – внутренняя ЭДС вторичной обмотки;

$Z_{2\Sigma}$ - суммарное комплексное сопротивление вторичной цепи;

U_2 – выходное (внешнее) напряжение вторичной обмотки.

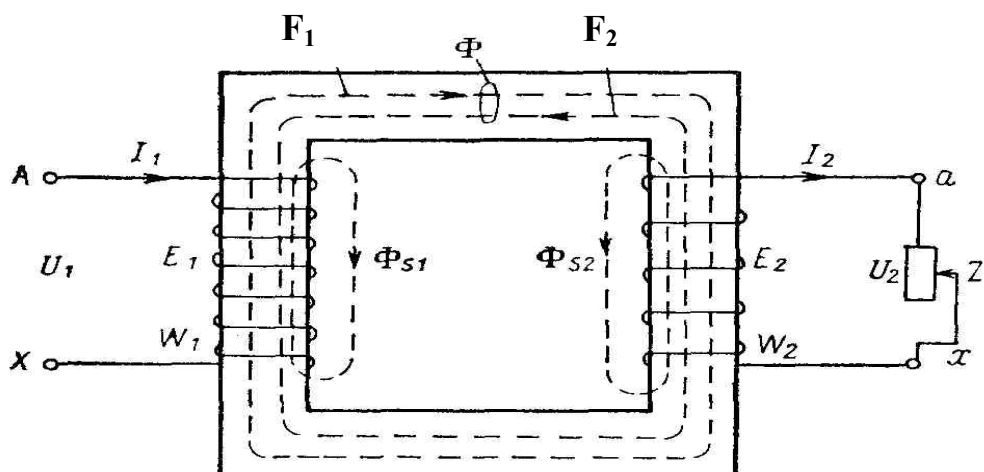


Рис. 2.1.2. Работа трансформатора под нагрузкой.

С ростом тока нагрузки I_2 одновременно возрастает создаваемая им магнитодвижущая сила $F_2 = I_2 W_2$. Так как мгновенные значения МДС F_1 и F_2 находятся практически в противофазе, то с ростом тока нагрузки вначале происходит **размагничивание** сердечника трансформатора, т.е. результирующий магнитный поток начинает уменьшаться и уменьшается индуцируемая им в первичной обмотке ЭДС E_1 .

Из-за этого, вследствие возрастания разности между U_1 и E_1 , ток I_1 в первичной обмотке, в соответствии с (2.1.6), увеличивается. Её МДС F_1 также растёт, «компенсируя» размагничивающее действие МДС F_2 первичной обмотки и восстанавливая результирующий магнитный поток Φ практически до прежнего значения.

В итоге результирующий магнитный поток Φ трансформатора при всех значениях нагрузки остается практически неизменным.

В трансформаторе преобразуется только напряжение и ток. Мощность на первичной стороне остается приблизительно равной мощности на вторичной стороне (она несколько уменьшается из-за потерь энергии в трансформаторе).

Следовательно

$$P_1/P_2 = U_1 I_1 / U_2 I_2 = \text{const} \quad (2.1.8)$$

Откуда

$$U_1 / U_2 = I_2 / I_1 \quad (2.1.9)$$

Это означает, что **в трансформаторе, находящемся в эксплуатации, при любом фиксированном значении развиваемой трансформатором мощности, ток на стороне обмотки высшего напряжения $I_{ВВ}$ будет в $k_{тр}$ раз меньше тока $I_{НН}$ на стороне обмотки низшего напряжения.**

Это означает также, что **в проектируемом трансформаторе при заданной допустимой (номинальной) мощности трансформатора увеличение (или уменьшение) вторичного номинального напряжения $U_{2н}$ трансформатора в**

$k_{тр}$ раз, по сравнению с первичным номинальным напряжением $U_{1н}$, должно сопровождаться уменьшением (или увеличением) в $k_{тр}$ раз допустимого (номинального) тока $I_{2н}$ во вторичной обмотке.

Трансформатор может работать только в цепях переменного тока. Если первичную обмотку трансформатора подключить к источнику постоянного тока, то в его магнитопроводе образуется магнитный поток, постоянный во времени, по величине и направлению. Поэтому в первичной и вторичной обмотках в установившемся режиме не индуцируются ЭДС, и следовательно, электрическая энергия не передается из первичной цепи во вторичную. **Кроме того, такой режим опасен для трансформатора, так как из-за отсутствия противоЭДС E_1 и E_{S1} в первичной обмотке ток в ней ограничивается лишь небольшим активным сопротивлением R_1 провода обмотки и может достигать величин соизмеримых с токами короткого замыкания.**

Более подробно учебный материал по данной теме изложен во второй части учебного пособия [1] на с. 5-14. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 2.1.

1. Дайте определение трансформатора и поясните его назначение.
2. Перечислите основные активные части трансформатора и поясните их назначение.
3. Как классифицируются трансформаторы в зависимости от соотношения количества витков первичной и вторичной обмоток, числа фаз, количества вторичных обмоток, характера связи между первичной и вторичной стороной, назначения и специфики работы?
4. Каким фундаментальным соотношением определяется мгновенное значение ЭДС, возникающих в обмотках трансформатора?
5. Какую величину называют коэффициентом трансформации трансформатора? Как можно изменить его значение?
6. Как нужно изменить количество витков вторичной обмотки, чтобы снизить напряжение на зажимах нагрузки?
7. Объясните механизм саморегулирования трансформатора.
8. Почему ошибочное подключение рабочих обмоток трансформатора к источнику постоянного тока является аварийным режимом, опасным для трансформатора?

Тема 2.2. Конструктивные особенности трансформаторов.

Учебный материал по данной теме подробно изложен во второй части учебного пособия [1] на с. 14-30. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 2.2.

1. Поясните особенности стержневых, броневых и тороидальных трансформаторов.
2. Какие положительные и отрицательные свойства анизотропной холоднокатанной стали проявляются при применении её в трансформаторостроении?
3. Как в современных трансформаторах располагают первичную и вторичную обмотки?

4. Почему в трансформаторах напряжением 35 кВ и выше две начальные и две конечные катушки обмотки высшего напряжения выполняют с усиленной изоляцией?
5. Зачем в трансформаторах напряжением 110 кВ и выше на концевых катушках обмотки высшего напряжения применяют экранирующие витки и емкостные кольца?
6. Как выполняется изоляция между катушками, слоями и витками обмоток?
7. Из каких элементов состоят устройства ввода и вывода трансформаторов?
8. Какие способы применяются для охлаждения активных элементов силовых трансформаторов?
9. Какие системы охлаждения применяются в «сухих» трансформаторах?
10. Как система охлаждения сухого трансформатора проявляется в его маркировке?
11. Чем продиктовано применение «масляных» трансформаторов?
12. Опишите типовую систему охлаждения «масляного» трансформатора.
13. С какой целью применяют трансформаторы, охлаждаемые негорючим жидким диэлектриком?

Тема 2.3. Математическое описание физических процессов трансформатора

Математическое описание физических процессов трансформатора в режиме холостого хода

Так как принято считать (см. п.2.1), что приложенное к трансформатору синусоидальное напряжение u_1 в каждый момент времени практически уравновешивается ЭДС e_1 , которая создается основным магнитным потоком Φ , то форму изменения потока во времени также нужно считать синусоидальной. Следовательно, если выбрать магнитный поток Φ за базовую величину, можно написать:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (2.3.1)$$

где:

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

$f = 1/T$ – частота сети;

T — период повторения синусоиды напряжения сети.

Следовательно

$$\begin{aligned} e_1 &= -W_1 d\Phi/dt = \\ &= -W_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = W_1 \omega \Phi_m \sin (\omega t - \pi/2) \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

$$\begin{aligned} e_2 &= -W_2 d\Phi/dt = \\ &= -W_2 \omega \Phi_m \cos \omega t = W_2 \omega \Phi_m \sin (\omega t - \pi/2) \end{aligned} \quad (2.3.3)$$

Из сравнения уравнений (2.3.1), (2.3.2) и (2.3.3) следует важный вывод о том, что **синусоиды ЭДС e_1 и e_2 , индуцируемых основным магнитным потоком Φ в первичной и вторичной обмотках трансформатора, совпадая по фазе друг с другом, отстают от синусоиды основного потока на электрический угол $\pi/2$ или на четверть периода.**

Уравнения (2.3.2) и (2.3.3) можно записать следующим образом:

$$e_1 = W_1 \omega \Phi_m \sin (\omega t - \pi/2) = E_{m1} \sin (\omega t - \pi/2) \quad (2.3.4)$$

$$e_2 = W_2 \omega \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2) = E_{m2} \sin(\omega t - \pi/2) \quad (2.3.5)$$

откуда:

- максимумы первичной и вторичной ЭДС E_{m1} и E_{m2} :

$$E_{m1} = \omega W_1 \Phi_m = 2\pi f W_1 \Phi_m \quad (2.3.6)$$

$$E_{m2} = \omega W_2 \Phi_m = 2\pi f W_2 \Phi_m \quad (2.3.7)$$

- действующие значения первичной и вторичной ЭДС E_1 и E_2 :

$$E_1 = E_{m1}/\sqrt{2} = (2\pi/\sqrt{2}) f W_1 \Phi_m = 4,44 f W_1 \Phi_m \quad (2.3.8)$$

$$E_2 = E_{m2}/\sqrt{2} = (2\pi/\sqrt{2}) f W_2 \Phi_m = 4,44 f W_2 \Phi_m \quad (2.3.9)$$

В трансформаторах со стальным магнитопроводом зависимость потока Φ от синусоидального тока холостого хода i_0 выражается динамической петлей гистерезиса (см. раздел 1 «Общие основы функционирования и устройства электрических машин»), поэтому ток холостого хода, создающий синусоидальный поток, имеет несинусоидальную форму. Вследствие влияния вихревых токов и «вязкости» ферромагнитных материалов поток Φ отстает от первой гармонической составляющей разложенной в ряд Фурье кривой тока холостого хода i_0 на угол α — угол гистерезисного отставания.

Вследствие этого отставания, ток холостого хода i_0 состоит из **активной составляющей** i_{0a} , обусловленной углом гистерезисного отставания α , и **реактивной (индуктивной) составляющей** i_{0p} (намагничивающего тока), создающей магнитный поток Φ (см. векторную диаграмму на рис. 2.3.1 а).

Поток Φ создает ЭДС e_1 и e_2 , отстающие от потока на угол $\pi/2$. Кроме того, ток i_0 создает в первичной обмотке поток рассеяния Φ_{s1} , который наводит ЭДС рассеяния e_{s1} . Так как поток Φ_{s1} замыкается главным образом по воздуху, то вектор его совпадает с вектором тока i_0 , а ЭДС e_{s1} отстает от него на угол $\pi/2$. Пропорциональность ЭДС e_{s1} току i_0 и отставание от него на угол $\pi/2$ в комплексном (векторном) виде выражается так:

$$\underline{E}_{s1} = -j X_1 \underline{I}_0 \quad (2.3.10)$$

где X_1 — индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки.

Таким образом, ЭДС рассеяния e_{s1} заменяется в расчетах **численно равным ей падением напряжения** от тока \underline{I}_0 на **условном индуктивном сопротивлении рассеяния** X_1 .

Таким образом, приложенное к первичной обмотке трансформатора напряжение u_1 уравнивается ЭДС e_1 и частично теряется на активном r_1 и индуктивном X_1 сопротивлениях первичной обмотки, т. е. (в векторной форме):

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + r_1 \underline{I}_0 + j X_1 \underline{I}_0 \quad (2.3.11)$$

На рис. 2.3.1 представлены схема замещения и векторная диаграмма трансформатора для режима холостого хода, соответствующие уравнению 2.3.11.

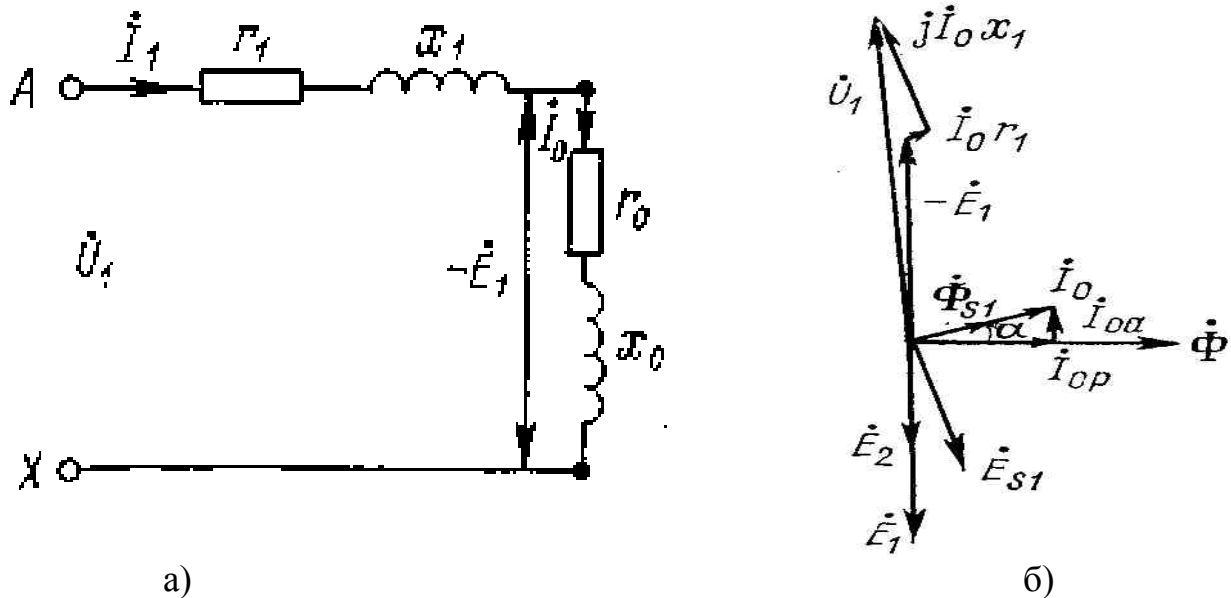


Рис. 2.3.1. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) для режима холостого хода трансформатора

Универсальная схема замещения трансформатора

Для того, чтобы получить универсальную схему замещения трансформатора, которую можно было бы использовать для расчета и анализа любых режимов работы трансформатора, рассмотрим более подробно физические процессы, протекающие в трансформаторе при подключении на внешние выводы вторичной обмотки трансформатора нагрузки с комплексным сопротивлением Z_n .

Представленная на рисунке 2.3.2 схема, состоящая из двух отдельных, не имеющих электрического контакта контуров, наиболее близко отражает реальные физические процессы, происходящие в электрических цепях первичной и вторичной обмоток трансформатора, однако более простой и удобной для расчета и анализа режимов работы трансформатора является эквивалентная, так называемая Т-образная схема замещения трансформатора, представленная на рисунке 2.3.3, в которой цепи первичной и вторичной обмотки соединяются между собой с помощью так называемого «контура намагничивания».

Правомерность такого объединения электрических цепей первичной и вторичной обмоток следует из приведенного ниже порядка формирования схемы контура намагничивания трансформатора.

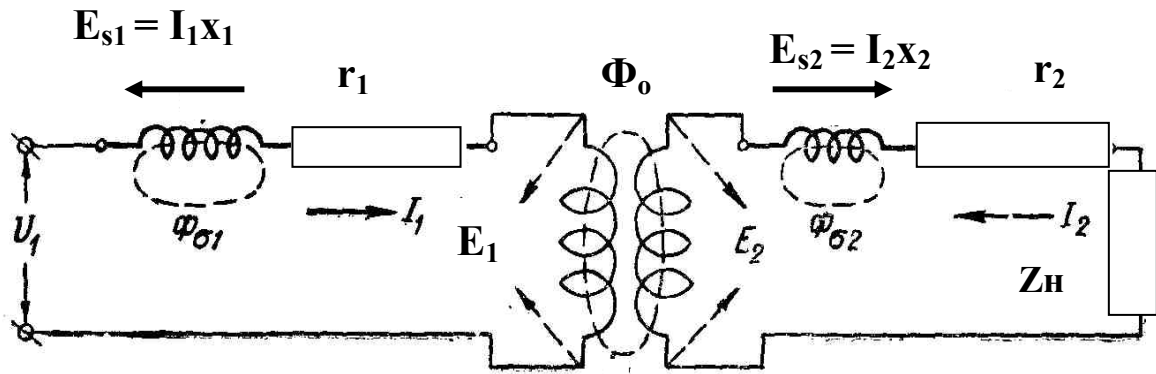


Рис. 2.3.2. Электрическая схема замещения трансформатора с отдельными контурами первичной и вторичной обмоток

Формирование схемы контура намагничивания

Как уже говорилось выше, подведенное к первичной обмотке трансформатора напряжение U_1 практически полностью уравновешивается ЭДС первичной обмотки E_1 , поэтому результирующий магнитный поток трансформатора Φ пропорционален подведенному напряжению независимо от изменения нагрузки. Если к трансформатору и при холостом ходе, и при нагрузке подводится одно и то же напряжение U_1 , то результирующий магнитный поток Φ будет оставаться постоянным при всех режимах нагрузки. Следовательно, при всех режимах нагрузки будет оставаться постоянной и результирующая МДС, создающая этот поток.

На холостом ходу трансформатора результирующая МДС и основной магнитный поток определяется током холостого хода I_0 :

$$F_0 = I_0 W_1; \quad (2.3.12)$$

$$\Phi = I_0 W_1 / R_\mu, \quad (2.3.13)$$

где R_μ — сопротивление магнитопровода прохождению магнитного потока (магнитное сопротивление).

При работе трансформатора с нагрузкой, результирующая МДС и основной магнитный поток определяется векторной суммой МДС создаваемых токами первичной $I_1 W_1$ и вторичной $I_2 W_2$ обмоток

$$\Phi = (I_1 W_1 + I_2 W_2) / R_\mu \quad (2.3.14)$$

Так как и основной магнитный поток Φ и магнитное сопротивление R_μ в уравнениях (2.3.13) и (2.3.14) остаются неизменными, то справедливо следующее векторное уравнение:

$$I_1 W_1 + I_2 W_2 = I_0 W_1 \quad (2.3.15)$$

откуда, после деления правой и левой частей на W_1 , следует **важнейшее уравнение для токов в узле контура намагничивания**:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2(W_2/W_1) = \underline{I}_0 \quad (2.3.16)$$

Уравнение (2.3.16) можно записать в окончательном виде:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2' = \underline{I}_0, \quad (2.3.17)$$

где: параметр \underline{I}_2' называется приведенным током вторичной цепи:

$$\underline{I}_2' = \underline{I}_2(W_2/W_1) \quad (2.3.18)$$

Для формирования представленной на рис. 2.3.3 T-образной схемы замещения трансформатора, необходимо выполнить следующие операции:

- на основании конструктивных расчетов или экспериментальными методами (например, в опытах холостого хода и короткого замыкания) определить значения $r_1, x_1, r_2, x_2, r_0, x_0$;

- «привести» ЭДС, ток и электрические сопротивления вторичной цепи к первичной.

В «приведенной» схеме замещения за ЭДС первичной обмотки принимается падение напряжения на комплексном сопротивлении Z_0 контура намагничивания от тока \underline{I}_0 холостого хода, а вместо реальной ЭДС вторичной обмотки \underline{E}_2 принимается вторичная ЭДС \underline{E}_2' , приведенная к первичной обмотке и равная по величине и по фазе ЭДС первичной обмотки \underline{E}_1 .

Такая подмена не вызывает большой погрешности и широко применяется в «трансформаторной» теории и практике.

Таким образом, с целью облегчения условий для разработки аналитических и графических методов расчета и анализа режимов работы трансформатора при наличии нагрузки на вторичной стороне, **реальный трансформатор с коэффициентом трансформации $k_{тр}$** , в общем случае не равным единице, заменяют эквивалентным трансформатором с коэффициентом трансформации $k_{тр экв} = 1$. Такой трансформатор называется приведенным.

В приведенном трансформаторе (рис. 2.3.3) параметры первичной обмотки остаются неизменными, вторичную же обмотку с числом витков W_2 у реального трансформатора заменяют в приведенном трансформаторе обмоткой с числом витков W_1 .

Эквивалентность реального и приведенного трансформаторов состоит в том, что все мощности и все углы сдвига фаз электрических величин в их вторичных цепях остаются неизменными. При указанных условиях приведенный трансформатор можно использовать для расчета и анализа любых режимов работы реального трансформатора.

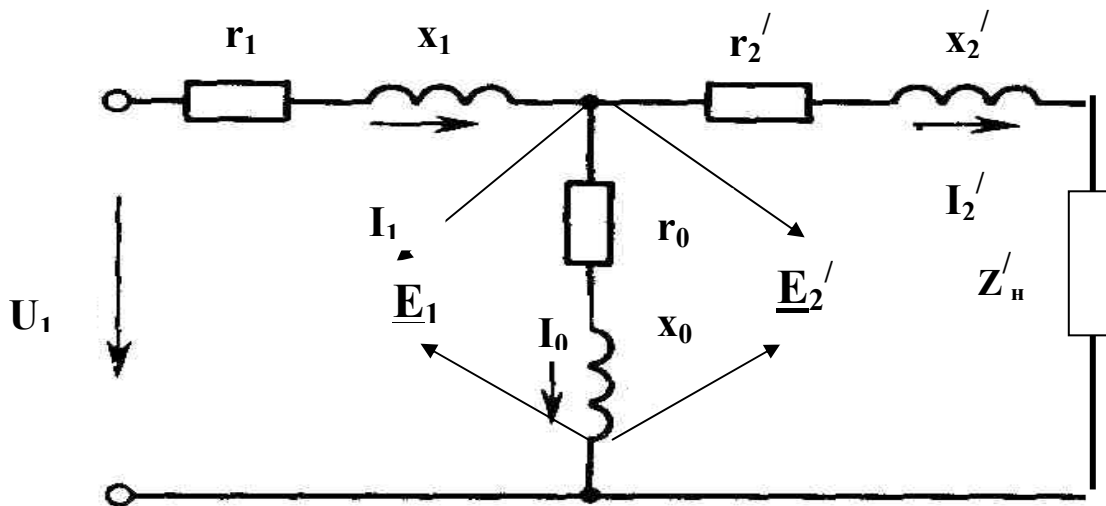


Рис. 2.3.3. Т-образная схема замещения фазы трансформатора.

Приведенное значение ЭДС вторичной обмотки E_2' определяется исходя из условия $k_{тр экв} = 1$

$$E_2' = E_1 = E_2 k_{12} \quad (2.3.19)$$

где коэффициент трансформации ЭДС k_{12} реального трансформатора:

$$k_{12} = E_1 / E_2 \quad (2.3.20)$$

Приведенное значение тока ротора I_2' определяется исходя из условия равенства электромагнитной (полной) мощности вторичной цепи до и после приведения, то есть, с учетом (2.3.19):

$$I_2' E_2' = I_2' E_1 = I_2 E_2 \quad (2.3.21)$$

откуда:

$$I_2' = I_2 E_2 / E_1 = I_2 / k_{12} \quad (2.3.22)$$

Приведенное значение активного сопротивления вторичной обмотки трансформатора определяется из условия равенства активной электрической мощности выделяемой на активном сопротивлении вторичной обмотки до и после приведения, то есть:

$$I_2'^2 r_2' = I_2^2 r_2 \quad (2.3.23)$$

откуда:

$$r_2' = (I_2 / I_2')^2 r_2 = r_2 k_{12}^2 \quad (2.3.24)$$

Приведенное значение индуктивного сопротивления вторичной обмотки трансформатора определяется из условия равенства реактивной (кажущейся) электрической мощности, выделяемой на индуктивном сопротивлении рассеяния вторичной обмотки до и после приведения, т. е.

$$I_2' x_2' = I_2^2 x_2 \quad , \quad (2.3.25)$$

откуда:

$$x_2' = (I_2 / I_2')^2 x_2 = x_2 k_{12}^2 \quad (2.3.26)$$

Приведенное значение модуля полного комплексного сопротивления вторичной обмотки трансформатора:

$$Z_2' = \sqrt{(r_2^2 + x_2^2)} = Z_2 k_{12}^2 \quad (2.3.27)$$

Приведенное значение модуля полного комплексного сопротивления нагрузки:

$$Z_H' = Z_H k_{12}^2 \quad (2.3.28)$$

Экспериментальное определение параметров универсальной расчетной эквивалентной схемы трансформатора (схемы замещения) производится с помощью опыта холостого хода и опыта короткого замыкания.

Подробное описание применяемых схем и порядка проведения опытов холостого хода и короткого замыкания см. в [1], а также в других источниках информации, указанных в приведенном выше списке рекомендуемой литературы.

В результате проведения **опыта холостого хода** определяются потери в стали p_c , коэффициент трансформации $k_{тр}$, а также следующие параметры схемы замещения трансформатора: Z_0 ; r_0 ; x_0 .

В результате проведения **опыта короткого замыкания трансформатора** определяются следующие параметры:

- значение напряжения короткого замыкания трансформатора u_k ;
- полное сопротивление короткого замыкания трансформатора Z_k ;
- активное сопротивление короткого замыкания трансформатора r_k ;
- индуктивное сопротивление короткого замыкания трансформатора x_k ;
- активная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора $u_{ка}$;
- индуктивная составляющая напряжения короткого замыкания $u_{кр}$;
- мощность потерь в обмотках трансформатора p_k (потери в меди).

При этом важно отметить, что **напряжением короткого замыкания $u_{1к}$** называется такое напряжение, поданное на вход первичной обмотки трансформатора при замкнутой накоротко вторичной обмотке, при котором в первичной и вторичной обмотках устанавливаются номинальные токи.

Напряжение короткого замыкания $u_{1к}$, выраженное в процентах к номинальному первичному напряжению, имеет для каждого трансформатора одно единственное значение и является паспортным параметром трансформатора, характеризующим величину и характер сопротивлений его внутренних электрических цепей.

Полная система уравнений электрического равновесия

трансформатора в соответствии с приведенной на рис. 2.3.3 Т-образной схемой замещения выглядит следующим образом:

- уравнение электрического равновесия цепи первичной обмотки:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + r_1 \underline{I}_1 + j x_1 \underline{I}_0 \quad (2.3.29)$$

- уравнение электрического равновесия цепи вторичной обмотки:

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - r_2 \underline{I}_2 - j x_2 \underline{I}_2 \quad (2.3.30)$$

или для приведенных величин:

$$\underline{U}'_2 = \underline{E}'_2 - r'_2 \underline{I}'_2 - j x'_2 \underline{I}'_2 \quad (2.3.31)$$

- уравнение электрического равновесия токов в узле контура намагничивания:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_0 \quad (2.3.32)$$

- уравнение электрического равновесия магнитодвижущих сил в пределах магнитопровода трансформатора:

$$\underline{I}_1 W_1 + \underline{I}_2 W_2 = \underline{I}_0 W_1 \quad (2.3.33)$$

На рисунке 2.3.4 представлена **векторная диаграмма трансформатора для режима работы со смешанной активно-индуктивной нагрузкой**.

Данному режиму работы трансформатора соответствует полная Т-образная схема замещения (рис. 2.3.3) и исходная система уравнений электрического равновесия (2.3.29) – (2.3.33).

При построении векторной диаграммы рис. 2.3.4 использованы следующие обозначения и применены следующие правила для её построения.

$\underline{\Phi}$ – вектор основного магнитного потока, создаваемого результирующей МДС первичной и вторичной обмоток трансформатора: **является базовым вектором**.

\underline{E}_1 – вектор ЭДС, наводимой в первичной обмотке основным магнитным потоком: **в соответствии с законом электромагнитной индукции отстает от вектора $\underline{\Phi}$ на 90°** .

\underline{E}'_2 (равная \underline{E}_1) – «приведенная» ЭДС вторичной обмотки: **в соответствии с законом электромагнитной индукции также, как и \underline{E}_1 , отстает от вектора $\underline{\Phi}$ на 90°** .

\underline{I}_0 – вектор тока холостого хода: **опережает вектор основного магнитного потока на «гистерезисный» угол α** .

\underline{I}'_2 – «приведенный» ток вторичной цепи (ток нагрузки): **вследствие активно-индуктивного характера цепи отстает от вектора \underline{E}'_2 на угол ψ_2** .

\underline{I}_1 – ток статорной обмотки: **определяется в соответствии с уравнением (2.3.32) как сумма векторов \underline{I}_0 и $-\underline{I}'_2$** .

$\underline{I}_1 r_1$ – вектор падения напряжения на активном сопротивлении r_1 первичной обмотки от протекающего по ней тока \underline{I}_1 : **совпадает по фазе с вектором тока \underline{I}_1** .

$j \underline{I}_1 x_1$ – вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении x_1 первичной обмотки от протекающего по ней тока \underline{I}_1 : **опережает вектор тока \underline{I}_1 на 90°** .

\underline{U}_1 – вектор напряжения сети: **получается в соответствии с уравнением**

(2.3.29) как результат сложения векторов - \underline{E}_1 , $\underline{I}_1 r_1$ и $j\underline{I}_1 x_1$.

$\underline{I}_2' r_2'$ – вектор падения напряжения на «приведенном» сопротивлении r_2' вторичной обмотки от протекающего по ней тока \underline{I}_2' : **совпадает по фазе с вектором тока \underline{I}_2'** .

$j\underline{I}_2' x_2'$ – вектор падения напряжения на «приведенном» индуктивном сопротивлении x_2' вторичной обмотки от протекающего по ней тока \underline{I}_2' : **опережает вектор тока \underline{I}_2' на 90°** .

\underline{U}_2' – вектор выходного напряжения трансформатора: **получается в соответствии с уравнением (2.3.30) как результат вычитания из вектора \underline{E}_2' , векторов $j\underline{I}_2' x_2'$ и $\underline{I}_2' r_2'$** .

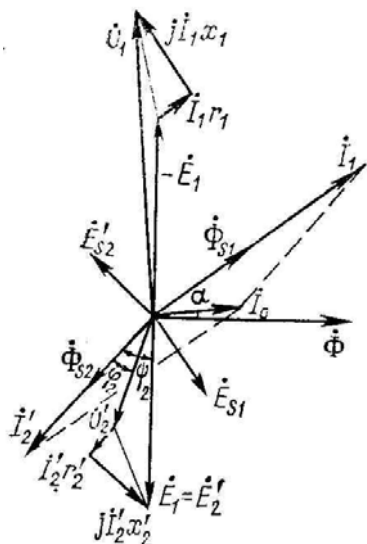


Рис.2.3.4. Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке

Токи \underline{I}_1 и \underline{I}_2' создают вокруг витков первичной и вторичной обмоток потоки рассеяния $\underline{\Phi}_{S1}$ и $\underline{\Phi}_{S2}$, векторы которых совпадают с векторами создающих их токов (так как потоки рассеяния замыкаются по воздуху и «гистерезисный» угол отсутствует). Потоки рассеяния $\underline{\Phi}_{S1}$ и $\underline{\Phi}_{S2}$ создают ЭДС \underline{E}_{S1} и \underline{E}_{S2} , векторы которых отстают от векторов вызвавших их магнитных потоков на угол 90° . **Важно отметить, что векторы \underline{E}_{S1} и \underline{E}_{S2} в расчетной практике не применяются и заменяются (в соответствии с принципом компенсации) падениями напряжения (с противоположными знаками) на соответствующих индуктивных сопротивлениях рассеяния (в данном случае векторами - $j\underline{I}_1 x_1$ и - $j\underline{I}_2' x_2'$** .

Более подробно учебный материал по данной теме изложен **во второй части учебного пособия [1]** на с. 30-49. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 2.3.

1. Напишите выражения для мгновенных значений ЭДС первичной и вторичной обмоток трансформатора.
2. Напишите выражения для действующих значений ЭДС первичной и вторичной обмоток трансформатора.
3. Из каких составляющих состоит ток холостого хода трансформатора?
4. Как отражается на схемах замещения и векторных диаграммах наличие потока рассеяния первичной и вторичной обмоток?
5. Изобразите универсальную Т-образную схему замещения трансформатора.
6. Изобразите схему замещения трансформатора для режимов холостого хода и

короткого замыкания.

7. Каким образом «приводятся» к первичной обмотке ЭДС, ток и электрические сопротивления вторичной цепи?

8. Какие параметры определяют в опыте холостого хода трансформатора? Изобразите электрическую принципиальную схему экспериментальной установки для проведения опыта холостого хода однофазного трансформатора.

9. Какие параметры определяют в опыте короткого замыкания трансформатора? Изобразите электрическую принципиальную схему экспериментальной установки для проведения опыта короткого замыкания однофазного трансформатора.

10. Дайте определение термину «напряжение короткого замыкания трансформатора». Почему каждый трансформатор имеет одно единственное значение напряжения короткого замыкания?

11. Величину каких внутренних параметров трансформатора косвенно отражает его напряжение короткого замыкания?

12. Приведите полную систему уравнений электрического равновесия электрических цепей трансформатора в соответствии с его Т-образной схемой замещения.

13. Изобразите векторную диаграмму для режима работы трансформатора со смешанной активно-индуктивной нагрузкой. Ход построения поясните.

Тема 2.4. Особенности устройства и работы трехфазных трансформаторов

Общие сведения об особенностях трансформации трехфазных токов и напряжений

Трансформация трехфазных токов и напряжений может быть произведена либо с помощью группы из трех однофазных двухобмоточных трансформаторов (рис. 2.4.1), либо с помощью трехфазного двухобмоточного трансформатора, обмотки которого размещаются на общем магнитопроводе стержневой или бронестержневой конструкции (рис. 2.4.2).

Обмотки отдельных фаз трехфазного трансформатора соединяются в «звезду», треугольник (см. схему вторичной обмотки НН на рис. 2.4.2б), реже по схеме «звезда – зигзаг» (см. рис. 2.4.3).

Схему соединения двухобмоточного трансформатора обозначают в виде дроби, в числителе которой помещают обозначение обмотки ВН, в знаменателе — обмотки НН. Например, схема соединения трансформатора по рис. 2.4.2а обозначается Y/Y , схема по рис. 2.4.2б обозначается Y/Δ , схема по рис. 2.4.3 обозначается Y/Z .

Согласно ГОСТ, начало и конец обмотки ВН однофазного трансформатора обозначают «А» и «Х», обмотки НН — «а» и «х».

Для начал и концов обмотки ВН трехфазного трансформатора применяют обозначения «А», «В», «С» и «Х», «У», «Z»; для обмотки НН — «а», «b», «с» и «х», «у», «z».

Вывод нулевой точки звезды обозначают соответственно «О» (для ВН) и «о» (для обмотки НН).

Индекс «н» у буквенного обозначения «звезды» или «звезды – зигзаг» говорит о том, что нулевая точка обмотки выведена из трансформатора и может быть использована для присоединения внешних цепей (например, нулевого провода).

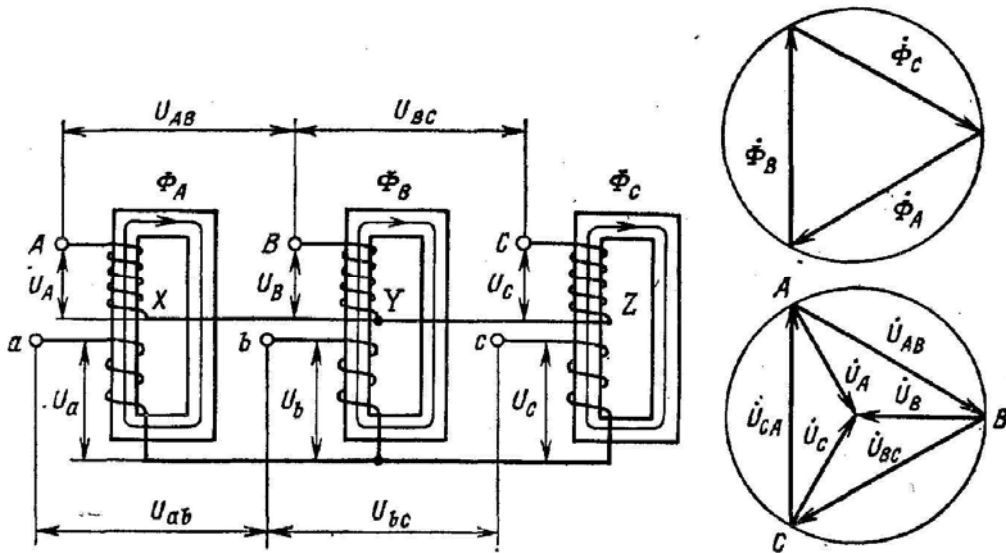


Рис. 2.4.1. Трехфазная группа, состоящая из трех однофазных двухобмоточных трансформаторов

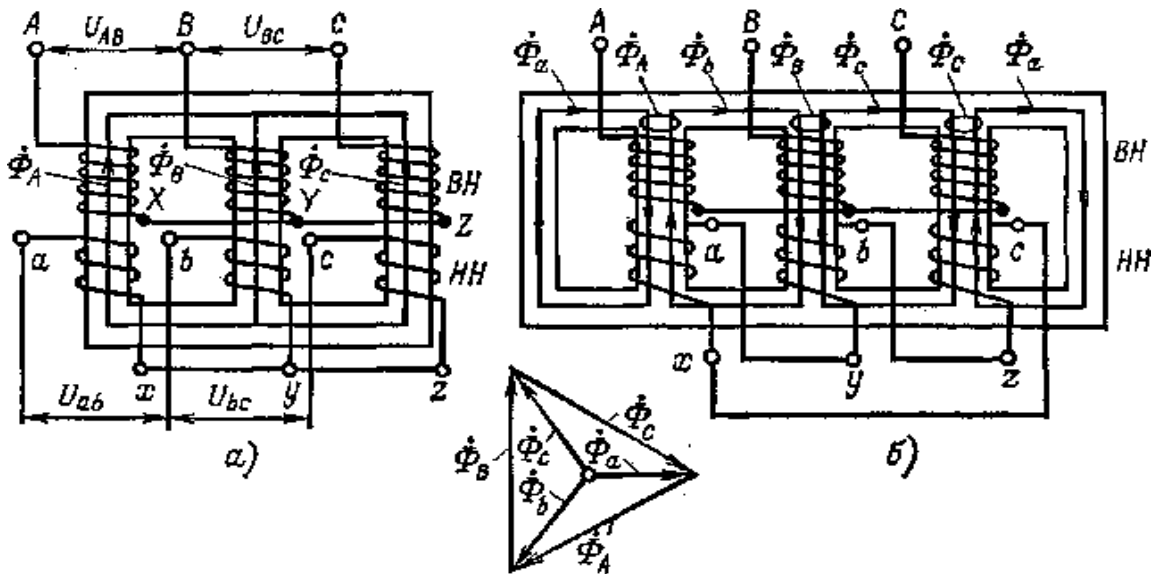


Рис. 2.4.2. Трехфазные трансформаторы с общим магнитопроводом стержневой (а) и бронестержневой (б) конструкции

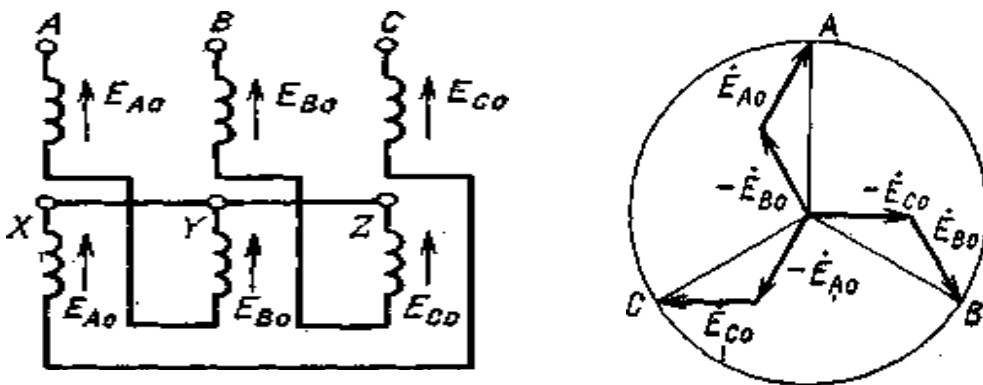


Рис. 2.4.3. Соединение по схеме звезда — зигзаг

При симметричных режимах работы трехфазного трансформатора к каждой его фазе, образованной из первичной и вторичной обмоток, расположенных на одном стержне, полностью применимы все соотношения, выведенные для однофазного трансформатора.

Группы соединения трансформаторов

При эксплуатации трансформаторов в различных электрических системах и установках часто необходимо знать электрический угол сдвига по фазе относительно друг друга векторов линейных синусоидальных ЭДС обмоток высшего и низшего напряжений. Этот угол понимается как электрический угол между «одноименными» векторами (или синусоидами) ЭДС обмотки ВН и обмотки НН, измеренными на соответствующих (одноименных) выводах: например, между векторами ЭДС обмотки ВН, измеренной на выводах «А» и «В» и ЭДС обмотки НН на выводах «а» и «b» (между вектором \underline{E}_{AB} и вектором \underline{E}_{ab}).

Одно из возможных взаимных положений векторов линейных ЭДС \underline{E}_{AB} и вектором \underline{E}_{ab} в трехфазных трансформаторах показано на рис. 2.4.4.

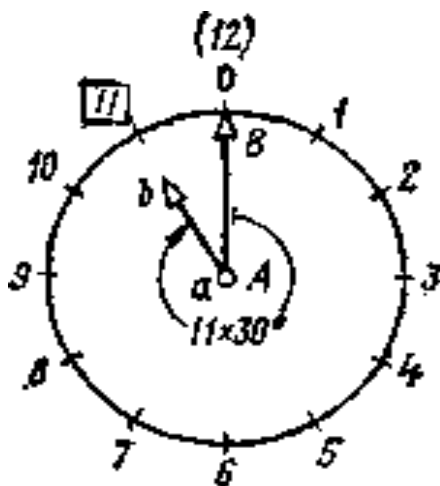


Рис. 2.4.4. Принцип определения группы соединения обмоток трансформатора

Поскольку угол сдвига фаз между соответствующими векторами трехфазных величин во всех случаях кратен 30° , его, при обозначении группы соединения трансформатора, принято выражать не в градусах или радианах, а в числе делений часового циферблата (угол между его соседними делениями равен 30°).

Трансформаторы, имеющие одинаковые углы между векторами ЭДС ВН и НН, относятся к одной и той же группе соединения, характеризующейся своим обозначением (номером), выраженном в терминах часового циферблата.

При этом под номером группы соединения понимается время на часах, минутная стрелка которых совмещена с вектором линейной ЭДС ВН и установлена на цифре 0 (12), а часовая стрелка совмещена с вектором

одноименной линейной ЭДС НН.

В обозначении группы соединения трансформатора номер группы указывается после обозначения схемы соединения его обмоток (например, Y/Y-0 или Y/Δ-11).

В однофазных трансформаторах существует всего два варианта сдвига фаз между векторами ЭДС ВН и НН: 0 или 180°. Соответственно, для однофазных трансформаторов существуют только две группы соединений: «1/1 – 0 (12)» и «1/1 – 6».

Линейные ЭДС обмоток ВН и НН трехфазных трансформаторов могут быть сдвинуты на любой угол, кратный 30°. Применение указанного выше правила для трехфазного трансформатора иллюстрируется рис. 2.4.5, на котором показано взаимное расположение ЭДС трансформатора для групп соединения: Y/Y - 0, Y/Y - 6, Y/Δ - 11, Y/Δ - 5.

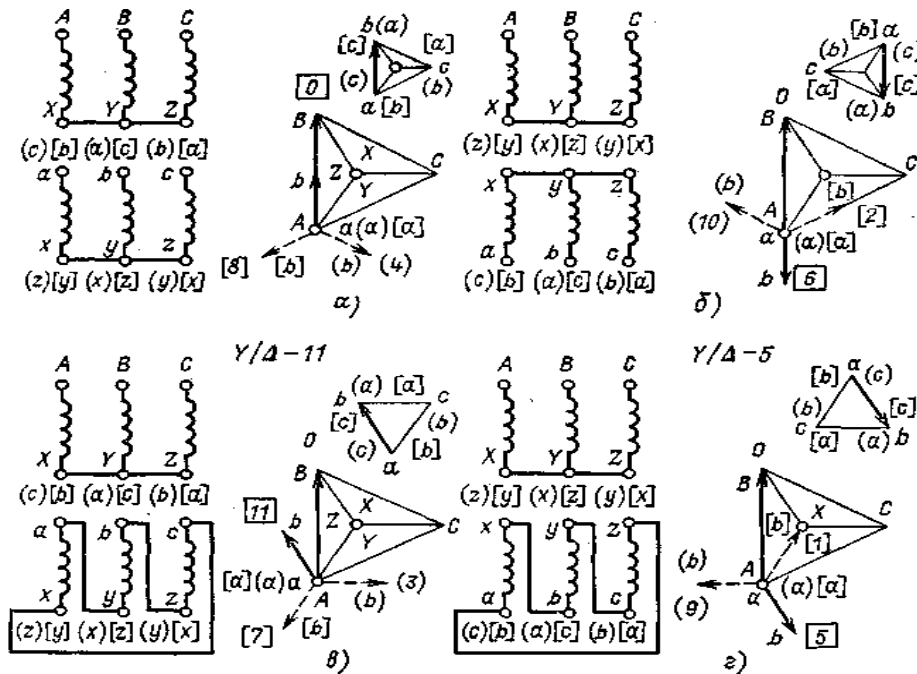


Рис. 2.4.5. Группы соединения трехфазных трансформаторов

Переход от одной группы к другой не требует реальных физических пересоединений в самом трансформаторе, он может быть осуществлен путем перемаркировки выводов.

Анализ возможных вариантов взаимного положения линейных векторов ЭДС обмоток ВН и НН трехфазных трансформаторов необходимо вести сравнивая фазные ЭДС соответствующих фаз трехфазного трансформатора, попарно находящиеся на одних и тех же стержнях магнитопровода (E_{Ax} и E_{ax} , E_{By} и E_{by} , E_{Cz} и E_{cz}).

Анализируя заданную схему обмоток трехфазного трансформатора с учетом указанных выше соображений можно построить векторную диаграмму соответствующих друг другу линейных ЭДС (или линейных напряжений)

обмоток ВН и НН (можно ограничиться построением одной пары соответствующих векторов, например, например, \underline{AB} и \underline{ab}). Затем, совмещая их одноименные точки («А» и «а» или «В» и «b») и применяя приведенное выше **правило циферблата**, можно легко определить **группу соединений** для данной схемы обмоток и маркировки их внешних выводов (рис. 2.4.5).

При этом важно отметить, что **четные номера групп соединений могут быть получены только в схеме Y/Y, а нечетные - только в схеме Y/Δ**.

Из всех возможных групп соединения трехфазных двухобмоточных трансформаторов **стандартизованных существует только две группы: 0 и 11** с выводом, в случае необходимости, нулевой точки «н» «звезды» ($Y/ Y_n - 0$, $Y_n / \Delta - 11$).

Кроме того, ГОСТ предусмотрена группа соединения, в которой треугольником соединены обмотки ВН ($\Delta/Y - 11$).

Более подробно учебный материал по данной теме изложен **во второй части учебного пособия [1]** на с. 49-62. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 2.4.

1. Как можно трансформировать трехфазные системы токов и напряжений?
2. Как соединяют обмотки отдельных фаз трехфазного трансформатора? Ответ продемонстрируйте на схемах.
3. Дайте определение термину «группа соединения трансформатора». Ответ поясните.
4. Как обозначается и что означает номер группы соединения трансформатора, указанный в его паспорте или на схеме?
5. Какие существуют стандартные группы соединения трехфазных двухобмоточных трансформаторов?
6. Как по схеме и маркировке обмоток можно определить группу соединения трехфазного трансформатора?
7. В чем в трехфазных трансформаторах заключаются особенности проявления гармонических составляющих фазных токов, порядок которых кратен трем?
8. Какие схемы соединения фазных обмоток трехфазного трансформатора являются наиболее благоприятными, с точки зрения вредных последствий несинусоидальности намагничивающего тока? Ответ поясните.

Тема 2.5. Эксплуатационные режимы работы и характеристики трансформаторов

Изменение напряжения трансформатора под нагрузкой

В условиях эксплуатации нагрузка трансформатора непрерывно изменяется. Вследствие изменения сопротивления нагрузки Z , вторичный ток I_2 изменяется от нуля до номинального и выше, также изменяется и фаза этого тока по отношению к напряжению.

Как было выяснено ранее, в соответствии с принципом саморегулирования

трансформатора (см. п. 2.1) изменение его вторичного тока сопровождается почти пропорциональным изменением первичного тока и приводит к очень небольшим изменениям магнитного потока. Поэтому, при $U_1 = \text{const}$ и $I_1 \gg I_0$ так же, как для режима короткого замыкания, можно пренебречь током холостого хода, т.е. принять $I_0 = 0$.

В этом случае в Т-образной схеме замещения трансформатора (рис. 2.3.3) может быть отброшен контур намагничивания, в результате чего получится упрощенная схема замещения трансформатора, представленная на рис. 2.5.1.

В упрощенной схеме замещения трансформатора первичный ток I_1 не отличается по величине от приведенного вторичного тока I_2' и соответствует векторному уравнению $I_1 = -I_2'$, а уравнения напряжений для первичной и вторичной цепей трансформатора могут быть объединены в одно векторное уравнение

$$\underline{U}_1 = -U_2' + \underline{Z}_k I_1, \quad (2.5.1)$$

в котором комплексное сопротивление короткого замыкания трансформатора:

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2' = (r_1 + r_2') + j(x_1 + x_2') \quad (2.5.2)$$

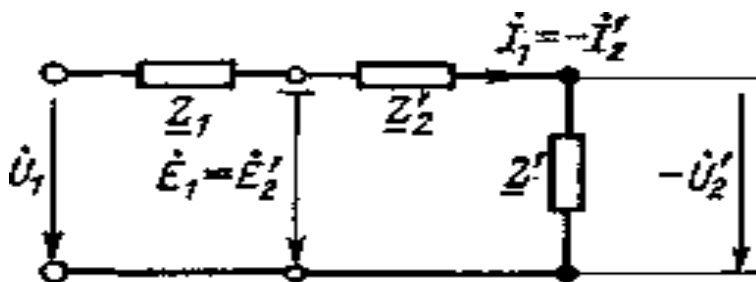


Рис. 2.5.1. Упрощенная схема замещения трансформатора при $I_1 \gg I_0$

Одной из важнейших эксплуатационных характеристик трансформатора, как важнейшего звена в системе электроснабжения различных потребителей, является **внешняя характеристика трансформатора, которой называется зависимость вторичного напряжения трансформатора U_2 от вторичного тока I_2 при $\phi_2 = \text{const}$ и $U_1 = \text{const}$** . Типовая форма указанной зависимости представлена в относительных единицах на рис. 2.5.2.

Характер изменения вторичного напряжения зависит не только от величины, но и от характера вторичной нагрузки.

При активно-индуктивной нагрузке ($\phi_2 > 0$) напряжение U_2 убывает с ростом тока I_2 .

При сильно выраженной емкостной составляющей вторичного тока ($\phi_2 \sim \pi/2$) напряжение при нагрузке может быть больше номинального напряжения $U_{2н}$ на холостом ходу.

При заданных напряжении U_1 , токе I_2 и угле ϕ_2 напряжение U_2 может быть определено графически с помощью векторной диаграммы, соответствующей схеме замещения трансформатора.

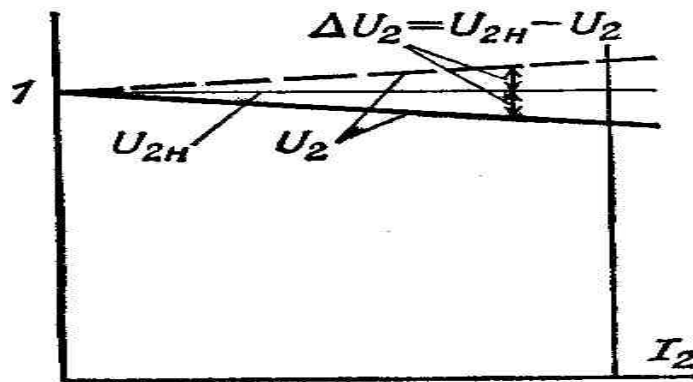


Рис. 2.5.2. Внешние характеристики трансформатора $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$: сплошная линия - активно-индуктивная нагрузка ($\varphi_2 = \text{const} > 0$); штриховая линия - активно-емкостная нагрузка ($\varphi_2 = \text{const} < 0$).

При этом уравнение 2.5.1 удобней переписать в следующем виде:

$$\underline{U}_1 = -U'_2 + \underline{Z}_k I_1 = -U'_2 + R_k I_1 + jX_k I_1 \quad (2.5.3)$$

где:

$$R_k = r_1 + r_2'; \quad X_k = x_1 + x_2'$$

Однако значительно удобнее и точнее решать рассмотренную выше задачу аналитически, введя понятие изменения вторичного напряжения (при $U_1 = U_{1н} = \text{const}$)

$$\Delta U = U_{20} - U_{2н} \quad , \quad (2.5.4)$$

где: U_{20} – напряжение холостого хода на внешних выводах вторичной обмотки трансформатора;

$U_{2н}$ – напряжение на внешних выводах вторичной обмотки трансформатора при номинальном токе нагрузки.

Изменение напряжение чаще всего указывается в относительных единицах

$$\Delta u = \Delta U / U_{20} \quad (2.5.5)$$

Если известно изменение напряжения, то вторичное напряжение в относительных единицах вычисляется по формуле:

$$U_{2*} = 1 - \Delta u \quad . \quad (5.6)$$

Уравнение изменения напряжения трансформатора, полученное с помощью упрощенной векторной диаграммы, имеет следующий вид (вывод опускается):

$$\Delta u = (u_a \cos \varphi_2 + u_r \sin \varphi_2) \beta = \beta u_k \cos (\varphi_k - \varphi_2) \quad (2.5.7)$$

где u_a - активная составляющая напряжения короткого замыкания; u_r - реактивная составляющая напряжения короткого замыкания.

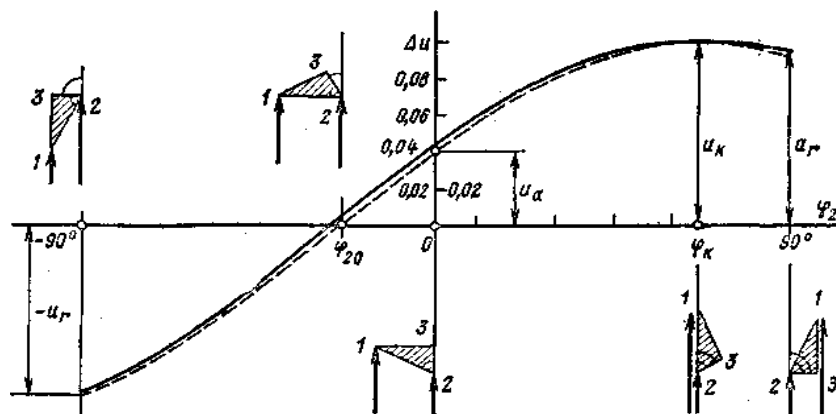


Рис. 2.5.3. Зависимости изменения напряжения ΔU от угла φ_2 при $I_2 = I_{2н}$, ($\beta = 1$): штриховая линия - по уравнению 2.5.7; сплошная линия - по уточненной векторной диаграмме .

Как видно из уравнения 2.5.7, изменение вторичного напряжения трансформатора существенно зависит от угла φ_2 нагрузки, причем, **наибольшее изменение напряжения $\Delta u = u_k$ наблюдается при $\varphi_k = \varphi_2$, когда $\text{Cos}(\varphi_k - \varphi_2) = 1$.**

При емкостном характере нагрузки (угол φ_2 отрицательный) можно добиться равенства $\varphi_k - \varphi_2 = 90^\circ$, при котором $\Delta u = u_k$, т.е. изменения напряжения не происходит.

В качестве примера на рис. 2.5.3 показана зависимость Δu от φ_2 при $\beta = 1$ для трансформатора, имеющего $u_k = 0,1$, $u_a = 0,04$, $u_r = 0,0918$.

Параллельная работа трансформаторов

Параллельное включение нескольких трансформаторов (рис. 2.5.4) широко применяется в электрических системах. Во многих случаях только при использовании параллельного включения нескольких трансформаторов, каждый из которых принимает на себя часть общей нагрузки, могут быть трансформированы те огромные мощности, которые требуется передавать на большие расстояния.

В крупных энергосистемах установка одного трансформатора, рассчитанного на всю передаваемую мощность, может вызвать непреодолимые трудности при его изготовлении на заводе и транспортировке к месту установки.

Кроме того, при параллельной работе трансформаторов лучше обеспечивается высокая эксплуатационная эффективность энергосистем: в энергосистеме всегда может быть включено на параллельную работу такое количество трансформаторов, при котором каждый из них несет оптимальную нагрузку и преобразует энергию с максимальным КПД, а при выходе из строя одного из трансформаторов остальные продолжают работать и замена поврежденного трансформатора может быть организована в режиме бесперебойного питания потребителей.

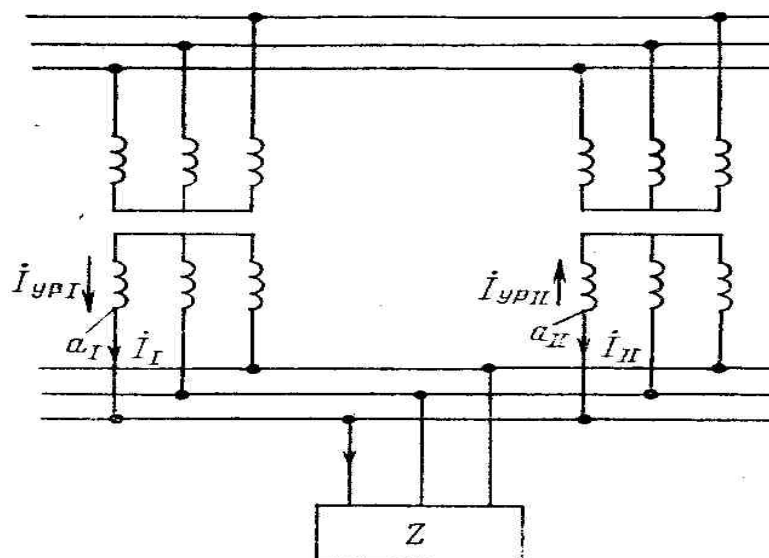


Рис. 2.5.4. Схема параллельного включения трехфазных трансформаторов

Признаками нормальной работы параллельно включенных трансформаторов являются:

1. **На холостом ходу:** отсутствие тока в общих цепях их вторичных обмоток.
2. **При подключении к объединенным выводам вторичных обмоток параллельно работающих трансформаторов общей нагрузки:** ток и мощность общей нагрузки должны распределяться между вторичными обмотками параллельно работающих трансформаторов пропорционально значениям их номинальных (паспортных) мощностей.

Для обеспечения указанных выше показателей нормальной параллельной работы трансформаторов должны быть выполнены следующие условия:

- 1) равенство коэффициентов трансформации параллельно работающих трансформаторов, т. е. $k_{тр1} = k_{тр2} = k_{тр3} = \dots$;
- 2) тождественность групп соединений параллельно работающих трансформаторов;

3) равенство между собой напряжений короткого замыкания параллельно работающих трансформаторов, а также их активных и реактивных составляющих (так называемых треугольников короткого замыкания), т. е. $u_{к1} = u_{к2} = u_{к3} = \dots$; $u_{ка1} = u_{ка2} = u_{ка3} = \dots$; $u_{кр1} = u_{кр2} = u_{кр3} = \dots$

Третье условие означает равенство между собой относительных значений сопротивлений короткого замыкания параллельно работающих трансформаторов, т. е. $Z_{к1*} = Z_{к2*} = Z_{к3*} = \dots$; $r_{к1*} = r_{к2*} = r_{к3*} = \dots$; $x_{к1*} = x_{к2*} = x_{к3*} = \dots$.

Стандартами не допускается параллельное включение трансформаторов с расхождением коэффициентов трансформации более чем на 0,5—1 %.

Включать на параллельную работу трансформаторы различных групп соединений (например, Y/Y—0 и Y/Δ — 11) категорически нельзя, так как

возникающая между одноименными зажимами вторичных обмоток векторная разность вторичных напряжений ΔU , вследствие сдвига их по фазе, вызывает появление очень большого уравнивающего тока, **сравнимого с током короткого замыкания**.

При соблюдении двух первых условий и несоблюдении третьего при холостом ходе у параллельно включенных трансформаторов векторы вторичных напряжений равны друг другу по величине и по фазе. Поэтому, между одноименными зажимами трансформаторов разности потенциалов не будет и уравнивающий ток холостого хода будет отсутствовать.

При подключении нагрузки у одного и у другого параллельно включенных трансформаторов появляются треугольники внутреннего падения вторичного напряжения, а так как соответствующие стороны этих треугольников не равны, то «внутренние» вторичные напряжения не уравниваются друг друга ни по величине, ни по фазе. Вследствие этого, в замкнутом контуре вторичных обмоток возникает разность напряжений ΔU , поэтому один из трансформаторов (с меньшим значением u_k) нагружается большим током и большей мощностью и может быть перегружен, а второй (с большим значением u_k) нагружается меньшим током и меньшей мощностью, в результате чего недоиспользуется.

Поэтому параллельно включаемые трансформаторы должны иметь одинаковые относительные напряжения короткого замыкания (на практике допускается различие в напряжениях короткого замыкания до 10%).

Переходные процессы в трансформаторе

При всяком изменении состояния трансформатора (включение, выключение), изменении нагрузки, питающего напряжения или при внешних электромагнитных воздействиях (например, во время грозы) в трансформаторе начинаются переходные процессы, причем токи и напряжения в обмотках трансформатора во время некоторых переходных процессов могут во много раз превышать допустимые значения.

Поэтому, эксплуатация трансформаторов должна организовываться с учетом возможных последствий переходных процессов. Кроме того, без учета переходных процессов в трансформаторе при его проектировании не могут быть правильно выбраны размеры, определены условия, в которых он должен эксплуатироваться, и сформулированы требования к его защите.

Более подробно учебный материал по данной теме изложен во второй части учебного пособия [1] на с. 62-84. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 2.5.

1. Что называется внешней характеристикой трансформатора?
2. Какая величина называется изменением напряжение трансформатора?

3. Как изменяется вторичное напряжение трансформатора от величины угла φ_2 нагрузки?
4. Каким образом можно добиться отсутствия изменения напряжения нагруженного трансформатора?
5. С какой целью применяется параллельное включение нескольких трансформаторов?
6. Какие признаки говорят о нормальной работе параллельно включенных трансформаторов? Какие условия должны быть выполнены для безаварийного включения и нормальной работы параллельно работающих трансформаторов?
7. Каковы последствия невыполнения условий включения трансформаторов на параллельную работу?
8. Перечислите основные опасности, связанные с симметричным коротким замыканием силового трансформатора.
9. Почему включение трансформатора в сеть на холостом ходу может сопровождаться опасными последствиями?
10. Какие меры защиты Вы можете предложить от негативных последствий переходных процессов?
11. Назовите последствия внешних электромагнитных воздействий на трансформатор и меры для их предотвращения.
12. Изобразите общий вид диаграммы потока активной энергии (активной мощности) нагруженного трансформатора.
13. Как можно определить коэффициент полезного действия (КПД) нагруженного трансформатора?
14. Почему для определения КПД трансформатора необходимо определять потери энергии в его внутренних элементах?
15. Из каких условий определяется нагрузка трансформатора, при которой достигается наибольшее значение КПД?

Тема 2.6. Автотрансформаторы и специальные трансформаторы

Материал по данной теме подробно изложен во второй части учебного пособия [1] на с. 84-93. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 2.6.

1. Какая принципиальная особенность отличает автотрансформатор от классического трансформатора?
2. Перечислите принципиальные преимущества и недостатки автотрансформатора по сравнению с классическим трансформатором.
3. Какими особенностями обладает сварочный трансформатор?
4. Расскажите об устройстве и принципе действия регулируемых трансформаторов с подмагничиванием шунта.
5. Как устроен и как работает трансформаторный утроитель частоты?
6. Расскажите об устройстве и принципе действия трансформатора тока. Какова его главная особенность по сравнению с классическим трансформатором?
7. По какой причине обрыв вторичной цепи трансформатора тока является тяжелым аварийным режимом?
8. Чем отличаются измерительный трансформатор напряжения от обычного силового трансформатора?

Раздел 3

ОБЩИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ И УСТРОЙСТВА СИНХРОННЫХ И АСИНХРОННЫХ МАШИН

Тема 3.1. Фазные обмотки реальных трехфазных асинхронных и синхронных машин

Общие принципы выполнения трехфазных обмоток

Ниже, в разделах 4 «Асинхронные машины» и 5 «Синхронные машины», при рассмотрении принципов создания вращающихся магнитных полей и многофазных систем ЭДС, напряжений и токов, даны понятия о простейших сосредоточенных трехфазных обмотках машин переменного тока.

В реальных многофазных синхронных и асинхронных машинах для получения больших значений ЭДС, МДС, а также для более полного использования пазовой (активной) зоны статора, фазные обмотки якоря выполняют многовитковыми (многосекционными) и распределенными по поверхности статора.

При этом основным элементом обмотки является виток (катушка, секция), состоящая из двух активных сторон, уложенных в пазы магнитопровода на расстоянии шага y и соединенных между собой вне пазовой зоны ЭМ так называемыми «лобовыми» соединениями. На рис. 3.1.1 изображены некоторые возможные формы выполнения катушек (секций) реальных фазных обмоток ЭМ.

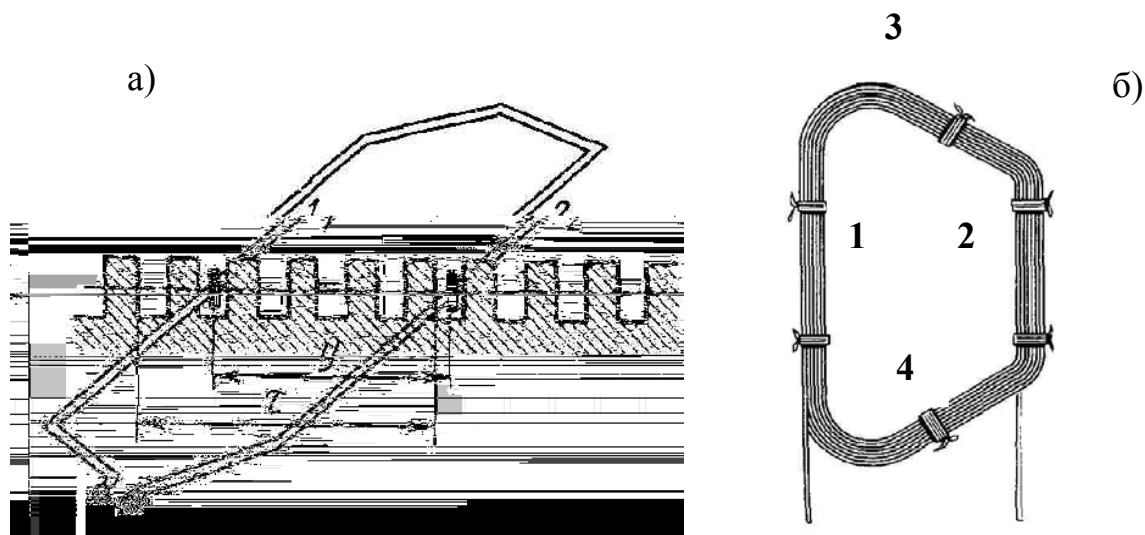


Рис. 3.1.1. Формы выполнения одновитковой (а) многовитковой катушек (секций) реальных фазных обмоток ЭМ: 1-2 – активные стороны; 3-4 – лобовые соединения; y – первый частичный шаг обмотки

Для создания трехфазной обмотки внутреннюю пазовую поверхность статора необходимо разбить на фазные зоны (рис. 3.1.2), в которых, в пределах каждого полюсного деления, будут располагаться q активных сторон одновитковых (рис. 3.1.1а) или многовитковых (рис. 3.1.1б) катушек (секций)

фазы **A**, **q** активных сторон катушек (секций) фазы **B** и **q** активных сторон катушек (секций) фазы **C**.

При этом ширину фазной зоны можно измерить или расстоянием $l_{фз}$ (например, в сантиметрах), в пределах которого на внутренней поверхности статора расположена фазная зона, или шириной дуги $\alpha_{фз}$ по внутренней поверхности статора, занимаемой фазной зоной, или числом пазов статора на полюс и фазу **q**.

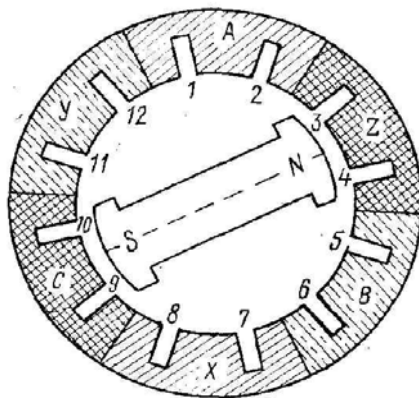


Рис. 3.1.2. Внутренняя пазовая поверхность статора, разбитая на фазные зоны A-X, B-Y, C-Z для размещения катушек (секций) фазных обмоток статора

При этом

$$l_{фз} = \pi D_c / 2pm \quad ; \quad (3.1.1)$$

$$\alpha_{фз} = 360/2pm \quad (\text{градусов}) \quad ; \quad (3.1.2)$$

$$\alpha_{фз} = \pi/pm \quad (\text{радиан}) \quad ; \quad (3.1.3)$$

$$q = Z / 2pm \quad , \quad (3.1.4)$$

где: **Dc** – диаметр внутренней поверхности статора (расточки статора);

p - число пар полюсов обмотки статора;

m - число фаз обмотки статора;

Z - число пазов статора.

Пазы каждой фазной зоны могут быть заполнены катушками (секциями) в один или в два слоя. В первом случае каждая активная сторона катушки (секции) полностью занимает весь паз (рис. 3.1.3а). Во втором случае катушки (секции) в пазах расположены в два слоя, в каждом пазу имеется две активные стороны различных катушек: одна в нижней части паза, а другая в верхней части паза (рис. 3.1.3б).

Поэтому, для однослойных обмоток

$$N_k = Z / 2 \quad (3.1.5)$$

а для двухслойных:

$$N_k = Z \quad (3.1.6)$$

где: **N_k** - общее число катушек (секций), из которых состоит обмотка.

Катушки (секции) каждой фазы, расположенные в «своих» фазных зонах в пределах двойного полюсного деления, соединяются между собой в катушечные группы согласно-последовательно, т.е. конец предыдущей секции

присоединяется к началу следующей (по ходу обмотки) секции, образуя таким образом полюса обмотки.

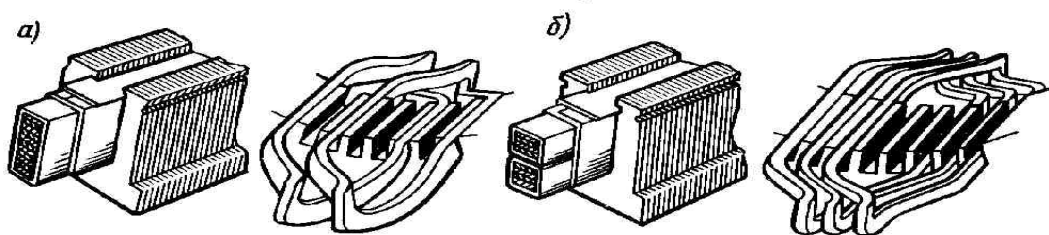


Рис. 3.1.3. Конструкция секций однослойных (а) и двухслойных (б) обмоток реальных электрических машин и положение их в пазу

В каждой фазе однослойной обмотки пара полюсов создается одной катушечной группой. Поэтому в однослойной обмотке число катушечных групп равно числу пар полюсов ($N_{кг} = p$).

Для лучшего представления об этом на рисунке 3.1.4 представлена схема образования одной из фаз однослойной 4-х полюсной сосредоточенной ($q = 1$) обмотки машины переменного тока с диаметральной шагом ($y = \tau$), состоящей из 2-х катушечных групп (двух катушек).

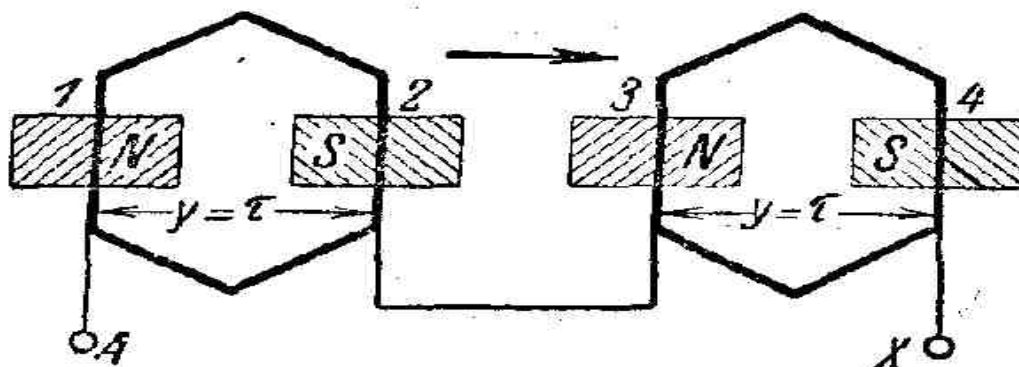


Рис. 3.1.4. Схема образования одной из фаз однослойной 4-х полюсной сосредоточенной обмотки машины переменного тока

На рисунке 3.1.5 представлена схема образования катушечной группы однослойной распределенной обмотки, состоящей из 4-х последовательно-согласно соединенных между собой катушек (секций) ($q = 4$).

В каждой фазной зоне двухслойной обмотки расположено двойное, по сравнению с однослойной обмоткой, количество катушек. Поэтому **каждая пара полюсов в двухслойной обмотке создается с помощью двух катушечных групп.** Следовательно, для двухслойной обмотки $N_{кг} = 2p$.

Для окончательного образования фазной обмотки катушечные группы каждой фазы могут соединяться между собой либо последовательно, либо параллельно, но так, чтобы полярность образуемых катушечными группами полюсов в каждой фазе чередовалась по ходу обмотки.

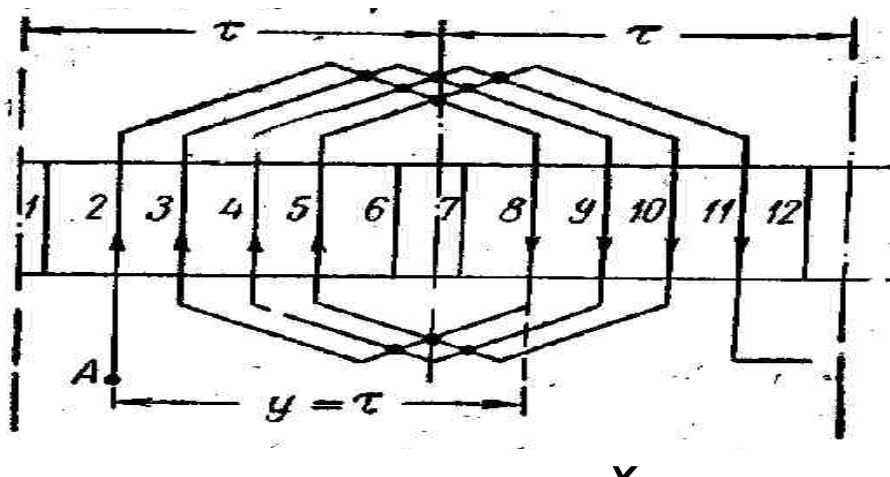


Рис. 3.1.5. Схема образования катушечной группы однослойной распределенной обмотки

Важным условием выполнения трехфазных обмоток является их симметрия. Симметричная трехфазная обмотка обеспечивает следующие электрические свойства ЭМ:

1. ЭДС, индуктируемые в фазах обмотки, равны по величине, идентичны по форме и сдвинуты между собой по фазе на 120 электрических градусов.

2. Активные и индуктивные сопротивления различных фаз обмотки равны между собой.

Для выполнения условий симметрии необходимо, чтобы оси фаз обмотки были сдвинуты между собой в пространстве на одинаковый угол, для чего, как минимум, должно выполняться следующее конструктивное соотношение:

$$Z / tm = \text{целое число} \quad (3.1.7)$$

где: Z – число пазов;

m – число фаз;

t - наибольший общий делитель для Z и p .

Для однослойных обмоток, кроме того, должно выполняться следующее соотношение

$$Z / 2m = \text{целое число} \quad (3.1.8)$$

Кроме того, необходимо, чтобы все фазы обмотки имели одинаковое число витков и были выполнены проводами одинакового сечения.

На внешние клеммы (зажимы) ЭМ выводятся начала и концы каждой фазы обмотки. При этом применяется следующая стандартная маркировка зажимов трехфазных статорных обмоток:

начало 1-й фазы – $C1$ (или $U1$), конец 1-й фазы - $C4$ (или $U2$);

начало 2-й фазы – $C2$ (или $V1$), конец 2-й фазы – $C5$ (или $V2$);

начало 3-й фазы – $C3$ (или $W1$), конец 3-й фазы – $C6$ или ($W2$).

Более подробно материал по данной теме с примерами расчета и выполнения схем однослойной трехфазной обмотки с числом полюсов $2p = 2$ и двухслойной трехфазной четырехполюсной обмотки изложен в третьей части учебного пособия [1] на с. 14-24. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 3.1.

1. Приведите примеры простейших трехфазных обмоток машин переменного тока.
2. Приведите изображения возможных форм выполнения катушек (секций) реальных фазных обмоток ЭМ. Укажите активные стороны и лобовые соединения катушек (секций).
3. Чем отличаются сосредоточенные обмотки от распределенных?
4. Чем конструктивно отличаются однослойные и двухслойные обмотки?
5. Что такое «катушечная группа» обмотки? Как она образуется?
6. Каково соотношение количества полюсов и количества катушечных групп имеет каждая фаза однослойной обмотки?
7. Каково соотношение количества полюсов и количества катушечных групп имеет каждая фаза двухслойной обмотки?
8. Каким образом соединяются между собой катушечные группы фазных обмоток?
9. Как маркируются внешние зажимы (выводы) фазных обмоток статора трехфазных электрических машин?
10. На сколько полюсов выполнена однослойная трехфазная обмотка статора электрической машины, если ширина её фазной зоны составляет 60° по окружности статора?
11. На сколько полюсов выполнена однослойная трехфазная обмотка статора электрической машины, если ширина её фазной зоны составляет 30° по окружности статора?
12. Изложите алгоритм расчета и вычерчивания развернутой схемы трехфазной обмотки.

Тема 3.2. Способы подавления высших гармоник в кривых МДС и ЭДС синхронных и асинхронных электрических машин

Идеальной, с точки зрения формы кривых ЭДС и МДС, трехфазной электрической машиной является ЭМ, которая обеспечивает:

- чисто синусоидальное распределение в рабочем зазоре магнитного потока индуктора (для синхронных машин);
- чисто синусоидальную форму ЭДС на выходных зажимах синхронной ЭМ при её работе в режиме генератора (при условии синусоидального распределения в рабочем зазоре МДС индуктора);
- чисто синусоидальную форму МДС якорной (статорной) обмотки в рабочем зазоре синхронной или асинхронной ЭМ при их работе в режиме двигателя при питании якорной (статорной) обмотки от симметричной трехфазной системы синусоидальных напряжений.

В реальных электрических машинах ни одно из перечисленных выше свойств недостижимо из-за наличия технологических трудностей (связанных, в частности, с неоднородностью магнитного сопротивления магнитопровода ЭМ и ступенчатости выполнения якорных (статорных) обмоток.

Неоднородности магнитного сопротивления вызваны, прежде всего, наличием пазов в магнитопроводе ЭМ, в которые укладывается обмотка (в районе зубцов оно меньше, в районе пазов - больше), из-за чего (даже при

чисто синусоидальной форме МДС индуктора) кривая магнитного потока в рабочем зазоре имеет гребенчатую форму.

Ступенчатая форма конструктивного исполнения якорных (статорных) обмоток ЭМ приводит к тому, что форма создаваемых ими МДС (или индуцируемых в них ЭДС) имеет ступенчатый характер.

Для примера на рисунке 3.2.1 изображена схема электрической машины, имеющей сосредоточенную обмотку на статоре, выполненную в виде одного витка (а), и график (б) распределения МДС в её рабочем зазоре.

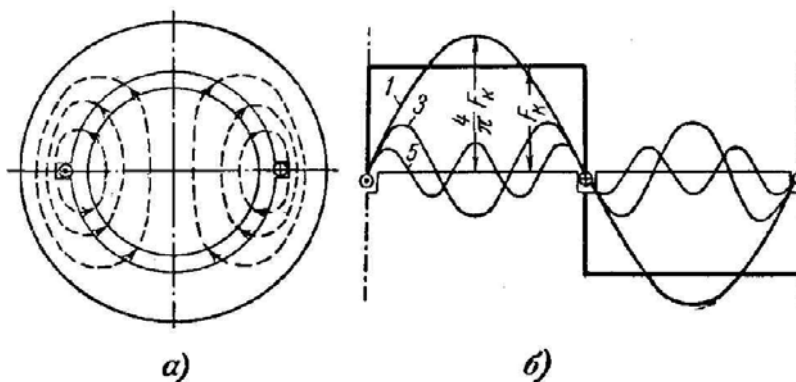


Рис. 3.2.1. Схема электрической машины, имеющей сосредоточенную обмотку на статоре, выполненную в виде одного витка (а), и график (б) распределения МДС в её рабочем зазоре

При разложении прямоугольной МДС, создаваемой каждой фазой указанной обмотки, в гармонический ряд Фурье (за независимый аргумент функции при этом принимается расстояние x от оси симметрии фазы по длине рабочего зазора) становится видно, что, кроме первой (основной) волны МДС:

$$F_1(x) \sim 0,9 I_\phi w \text{Cos } \pi x / \tau \quad (3.2.1)$$

в рабочем зазоре ЭМ возникают пространственные волны МДС нечетных гармоник:

$$F_v(x) = I_\phi w (1/v) \text{Cos } v\pi x / \tau \quad (3.2.2)$$

где: I_ϕ - ток фазы;

w - количество витков катушки;

x - расстояние от оси симметрии фазы по длине рабочего зазора;

τ - полюсное деление (расстояние между активными сторонами катушки);

$v = 3, 5, 7 \dots$ - номер гармоники.

Третьи и кратные им гармоники МДС всех трех фаз трехфазной ЭМ, складываясь в пространстве компенсируют друг друга и не создают магнитных полей в рабочем зазоре ЭМ.

МДС остальных нечетных гармоник каждой фазы ЭМ создают пространственные волны магнитного поля с v пар полюсов, которые вращаются в рабочем зазоре с частотой вращения

$$n_v = n_1/v \quad (3.2.3)$$

где: n_1 - скорость вращения магнитного поля от первой (основной) гармоники МДС.

В создании полезного электромагнитного момента электрических двигателей участвует только первая гармоника МДС обмотки. Высшие гармонические МДС создают паразитные электромагнитные моменты, искажающие форму рабочих характеристик электрических двигателей.

Высшие гармоники присутствуют также и в кривых ЭДС, индуцированных в фазных обмотках электрических машин.

В трехфазных электрических машинах ЭДС третьей и кратных ей гармоник, индуцированные в фазных обмотках, совпадают с друг другом по фазе и также как в трехфазном трансформаторе взаимно уничтожаются при соединении фаз обмотки в «звезду».

При соединении фаз обмотки в «треугольник» третьи и кратные им гармоники ЭДС суммируются (вследствие совпадения по фазе) и образуют в замкнутом контуре обмотки паразитные токи, которые, хотя и не выходят во внешнюю цепь, увеличивают электрические потери ЭМ, её нагрев, и снижают КПД ЭМ.

Более подробно материал по данной теме, в том числе о конструктивных способах подавления высших гармоник в кривых МДС и ЭДС синхронных и асинхронных электрических машин изложен в третьей части учебного пособия [1] на с. 24-30. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 3.2.

1. Назовите причины, из-за которых в кривых ЭДС и МДС трехфазной электрической машины появляются высшие гармоники?
2. Каким образом распределение фазной обмотки улучшает форму кривых МДС и ЭДС электрической машины?
3. Каким образом укорочение шага фазной обмотки улучшает форму кривых МДС и ЭДС электрической машины?
4. Для борьбы с какими гармониками осуществляют относительный скос пазов статора и ротора электрической машины?

Раздел 4.

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Тема 4.1. Устройство и физические основы функционирования асинхронной машины в двигательном и тормозных режимах

Принципы создания магнитных полей, вращающихся (перемещающихся) в рабочих зазорах электрических машин

Принцип действия асинхронной машины базируется на взаимодействии вращающегося магнитного поля, создаваемого обмоткой статора, с током обмотки ротора, поэтому, прежде чем приступить к анализу электромагнитных

процессов в асинхронной машине, рассмотрим принципы создания в её рабочем зазоре вращающегося магнитного поля.

Для того, чтобы с помощью стационарной (неподвижной) системы получить магнитное поле, вращающееся (в общем виде – перемещающееся) в рабочем зазоре ЭМ, необходимо выполнить два обязательных условия:

во-первых, **на статоре ЭМ необходимо расположить обмотку, состоящую из нескольких фазных обмоток, оси которых сдвинуты в пространстве на некоторое расстояние (угол) друг относительно друга;**

во-вторых, **необходимо обеспечить, чтобы через каждую упомянутую выше фазную обмотку ЭМ протекали переменные периодические электрические токи, временные фазы которых сдвинуты относительно друг друга.**

Для получения симметричного (кругового) вращающегося магнитного поля необходимо, чтобы пространственный угол сдвига осей фазных обмоток был равен временному углу сдвига фаз токов, протекающих по этим обмоткам. **Важно при этом подчеркнуть, что пространственные углы сдвига осей фазных обмоток и временные углы сдвига фаз токов, протекающих по катушкам в этом случае необходимо измерять в электрических градусах (радианах) с учетом соотношений (5.1.1) – (5.1.4).**

Вращающееся (перемещающееся) магнитное поле наиболее просто получить с помощью многофазной статорной обмотки ЭМ, принципы устройства которой описаны выше, при её подключении к соответствующей симметричной многофазной системе питающего напряжения.

На рис. 4.1.1, на примере **первого в мире трёхфазного асинхронного двигателя, предложенного в 80-х годах 19-го века русским инженером Доливо-Добровольским**, проиллюстрирован принцип получения вращающегося магнитного поля.

Каждая фаза статорной обмотки указанного двигателя (рис. 4.1.1а) представляет собой сосредоточенную катушку, намотанную на явно выраженные полюсные сердечники **1, 2, 3** статора, оси которых сдвинуты в пространстве на угол **120°**.

Указанные катушки включены в трехфазную сеть по схеме «звезда» (концы «**К**» фазных катушек соединены между собой, а начала «**Н**» подключены к соответствующим зажимам трехфазной сети переменного тока). Так как рассматриваемая обмотка имеет в каждой своей фазе одну пару полюсов, то понятия геометрического и электрического угла для неё полностью совпадают.

Токи **I_A, I_B, I_C**, протекающие по каждой из фазных катушек (см. рис. 4.1.1б) создают вдоль их осей пульсирующие магнитодвижущие силы и магнитные поля, мгновенные направления которых в пространстве можно определить по правилу буравчика (С – «северный» полюс, Ю – «южный» полюс).

Максимум индукции пульсирующего магнитного поля сердечника **1** (фаза **В**) отстает во времени от максимума индукции пульсирующего магнитного поля сердечника **3** (фаза **А**) на одну треть периода. В свою очередь, максимум индукции пульсирующего магнитного поля сердечника **2** (фаза **С**) также отстает также на одну треть периода от максимума индукции пульсирующего

магнитного поля сердечника 1 (фаза В).

Благодаря пространственному сдвигу осей фазных катушек А, В и С на одну треть окружности статора, пульсация магнитных полей отдельных фазных катушек создает эффект движения волны суммарного магнитного потока от оси одной фазной катушки к оси другой в сторону отставания токов соответствующих фаз (на рис. 4.1.16 – по часовой стрелке: от сердечника 3 к сердечнику 1 и затем к сердечнику 2).

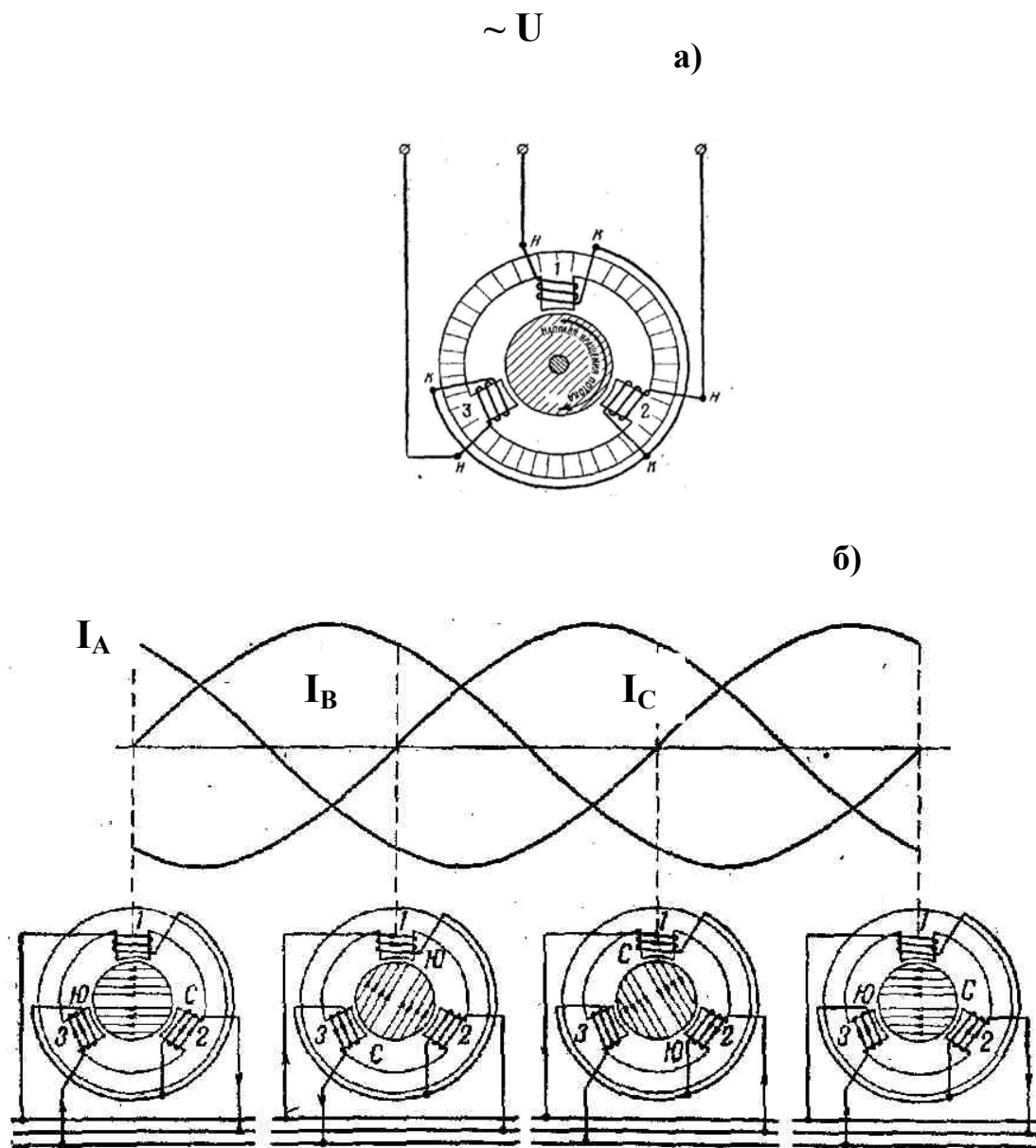


Рис. 4.1.1 Конструктивная схема первого в мире асинхронного двигателя (а), предложенного в 80-х гг. XIX века русским инженером Доливо-Добровольским и принцип получения в его рабочем зазоре вращающегося магнитного поля (б)

Направление вращения (перемещения) магнитного поля задается порядком подключения фаз питающего напряжения к зажимам фазных обмоток статора (порядком следования фаз статора).

Для изменения направления вращения (перемещения) магнитного поля необходимо изменить порядок следования фаз обмотки статора за счет изменения схемы подключения обмотки статора к сети.

В случае трехфазной системы для изменения направления вращения (перемещения) магнитного поля необходимо поменять местами любые две фазы питающего напряжения, подключенные к зажимам трехфазной обмотки статора.

Фазные системы современных ЭМ переменного тока выполняют неявнополюсными, распределяя активные проводники их фазных обмоток по пазам на рабочих поверхностях статора или ротора. При этом расстояние y между соседними активными проводниками секции (витка) фазной обмотки (**шаг обмотки**) выбирают близким к так называемому «полюсному делению» τ (при $y = \tau$ шаг называется диаметральной), которое определяется следующим образом:

$$\tau = \pi D_c / 2p \quad (4.1.1)$$

где: D_c – внутренний диаметр статора;

p – число пар полюсов, на которое выполнена каждая фаза обмотки.

В реальных машинах, с целью подавления нечетных гармоник (см. раздел 3) в кривой ЭДС и МДС, шаг обмотки делают укороченным ($y \sim 0,8\tau$).

За один период действия электрического тока ось магнитного поля проходит расстояние, равное двойному полюсному делению. Следовательно, угловая скорость вращения магнитного поля ω_1 , создаваемого симметричной трехфазной статорной обмоткой, подключенной к симметричной трехфазной системе напряжений частотой f_1 определяется следующим соотношением (рад/с):

$$\omega_1 = 2\tau/T = 2\pi / pT = 2\pi f_1/p \quad (4.1.2)$$

В случае, если каждая фаза статорной обмотки имеет одну пару полюсов, ось суммарного магнитного поля будет совершать полный оборот вокруг оси ЭМ в течение каждого периода действия электрического тока, т.е. угловая скорость вращения магнитного поля ω_1 (**синхронная скорость**) будет равна циклической частоте ω_0 напряжения сети:

$$\omega_1 = \omega_0 = 2\pi f_1 \quad (4.1.3)$$

На практике вместо угловой скорости используют понятие частоты вращения n , которая измеряется количеством оборотов в минуту. В этом случае выражение (4.1.2) принимает следующий вид, об/мин

$$n_1 = 60\omega_1/2\pi = 60f_1/p \quad (4.1.4)$$

На основании соотношения (4.1.4) можно составить следующую таблицу фиксированных значений частот вращения магнитного поля n_1 создаваемого симметричной трехфазной статорной обмоткой, подключенной к симметричной трехфазной системе напряжений стандартной частоты 50 Гц в зависимости от количества пар полюсов p , на которое выполнена обмотка:

p	1	2	3	4	5	6
n₁ (об/мин)	3000	1500	1000	750	600	500

Линейная синхронная скорость v_1 перемещения оси магнитного поля в рабочем зазоре ЭМ определяется следующим выражением:

$$v_1 = D_c \omega_1 / 2p \quad (4.1.5)$$

где: D_c – внутренний диаметр статора.

Общие сведения об устройстве реальных АМ.

К основным конструктивным частям типовой АМ относятся неподвижный статор и вращающийся ротор. Существуют также линейные АМ, конструкция которых позволяет статору и ротору линейно перемещаться друг относительно друга без применения дополнительных механических устройств преобразования движения.

Сердечники статора и ротора являются частями общего магнитопровода АМ и выполняются шихтованным, то есть собранным из спрессованных между собой и изолированных друг от друга пластин электротехнической стали.

Статор АМ (рис. 4.1.2) содержит как активные элементы (магнитопровод и фазную обмотку), непосредственно участвующие в процессе электромагнитного и электромеханического преобразования энергии, так и элементы, которые служат для придания электрической машине конструктивной устойчивости (станина, подшипниковые щиты и т.д).

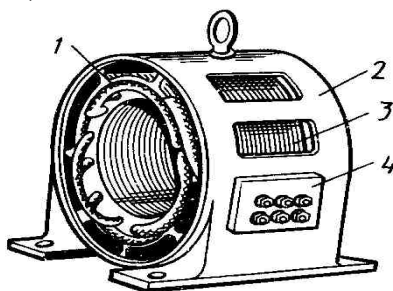


Рис. 4.1.2. Основные элементы конструкции статора АМ
(1 – обмотка; 2 – корпус (станина); 3 – сердечник магнитопровода; 4 – панель внешних выводов)

Основными активными элементами ротора АМ являются закрепленный на валу стальной сердечник и обмотка, расположенная в его пазах.

Обмотка ротора может быть выполнена в двух основных исполнениях:

- фазной (см. рис. 4.1.3), полностью идентичной обмотке статора и имеющей возможность непосредственного контакта с внешними цепями через контактные кольца и электрические щетки (АМ с фазным ротором);
- короткозамкнутой (см. рис. 4.1.4), не имеющей связи с внешними электрическими цепями (АМ с короткозамкнутым ротором).

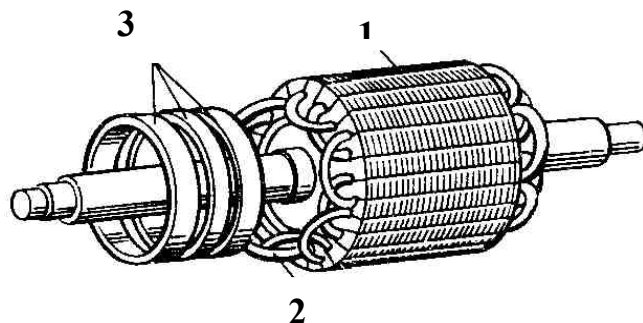


Рис. 4.1.3. Основные элементы фазного ротора АМ: 1 – сердечник; 2 – обмотка; 3 – контактные кольца

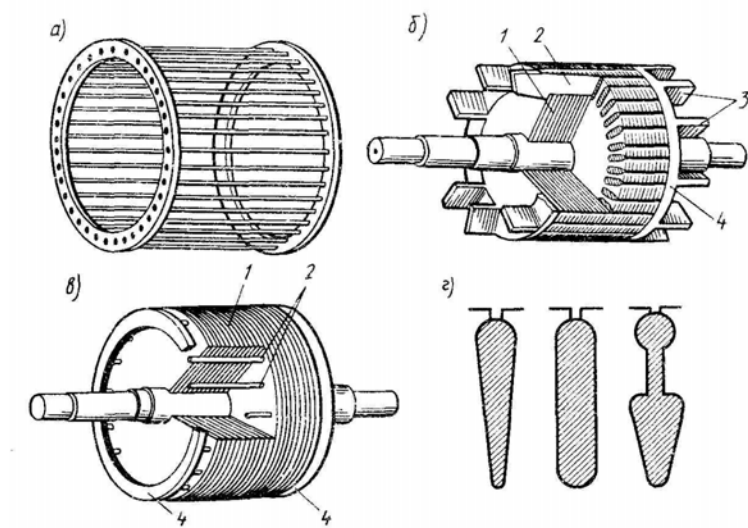


Рис. 4.1.4. Элементы конструкции короткозамкнутого ротора АМ: а – стержни и короткозамыкающие кольца обмотки («белчьей клетки»); б и в – ротор в сборе; г – формы пазов ротора, заполненных материалом стержней обмотки; 1 – сердечник; 2 – проводники (стержни) обмотки; 3 – вентиляционные лопатки; 4 – короткозамыкающие кольца

Если трехфазная АМ имеет фазный ротор, то концы каждой фазы обмотки ротора соединяются друг с другом внутри машины, образуя «звезду» или «треугольник», а начала фаз через контактные кольца и электрические щетки выводятся на внешние зажимы АМ, которые обозначаются русскими буквами «Р1», «Р2» и «Р3» (в машинах отечественного производства) или латинскими буквами К, L, М.

В последнем случае роторная обмотка изготавливается методом заливки

пазов ротора медью, бронзой или алюминием, в результате чего образуется система проводников, находящихся в пазах стального шихтованного сердечника ротора и замкнутых со стороны торцов ротора специальными контактными кольцами.

На рис. 4.1.5 показаны стандартные обозначения выводов трехфазной обмотки статора АМ и схемы её подключения к трехфазной сети «звездой» (а) и «треугольником» (б).

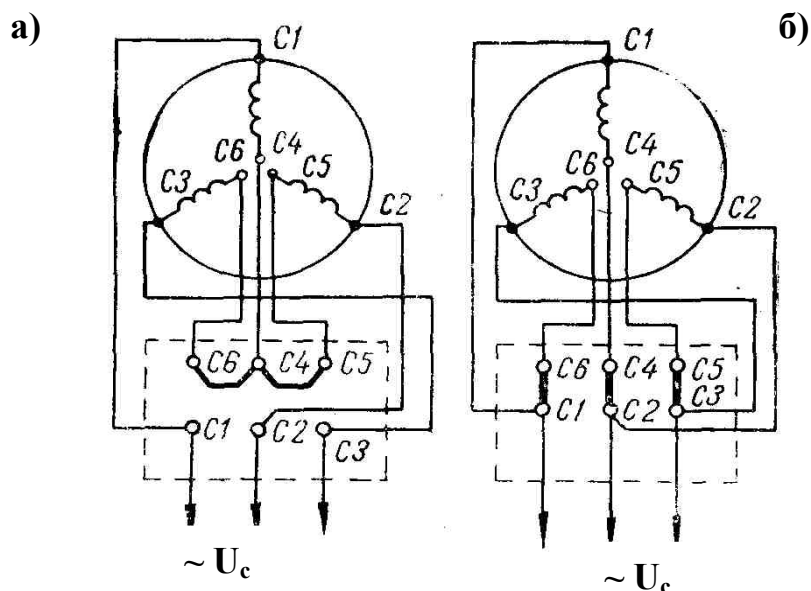


Рис. 4.1.5. Стандартные обозначения внешних выводов и схемы подключения обмотки статора АМ к трехфазной сети «звездой» (а) и «треугольником» (б)

Особенности возникновения электромагнитного момента АМ

Рассмотрим работу АМ на примере трехфазной АМ с фазным ротором.

При подключении статорной обмотки трехфазной АМ к трехфазной симметричной системе напряжений в её рабочем зазоре, в соответствии с закономерностями, рассмотренными выше, образуется магнитный поток, вращающийся с частотой

$$n_1 = 60 f_1 / p \quad (4.1.6)$$

где: n_1 – частота вращения магнитного поля (синхронная частота вращения, об/мин);

f_1 – частота питающего напряжения (Гц);

p – число пар полюсов, создаваемых каждой фазой обмотки статора.

Вращающийся в рабочем зазоре АМ магнитный поток, пересекая активные проводники обмотки ротора, индуцирует в каждом из них переменную ЭДС ротора e_2 , направление которой в каждый момент времени можно определить по правилу правой руки с учетом полярности соответствующей полуволны магнитного поля.

Если цепь обмотки ротора замкнуть, то в ней, под действием ЭДС ротора, начнет протекать переменный электрический ток ротора i_2 . Взаимодействие тока ротора с вращающимся магнитным полем приводит к возникновению электромагнитных сил, действующих на каждый активный проводник обмотки ротора, что, в свою очередь, приводит к созданию электромагнитного момента, приложенного к валу АМ.

Так как ток ротора имеет активно-индуктивный характер, то его можно рассматривать условно как сумму двух составляющих: активной i_{2a} , которая совпадает по фазе с ЭДС ротора и индуктивной i_{2p} , которая отстаёт от ЭДС ротора на 90° . При этом очень важно рассмотреть результаты электромагнитного взаимодействия вращающегося в рабочем зазоре машины основного магнитного потока Φ_0 с каждой из указанных выше составляющих тока ротора.

На рис. 4.1.6 представлена картина такого взаимодействия. Направление действия элементарных электромагнитных моментов $\mu_{эм}$, создаваемых каждым условным проводником обмотки ротора, определяется по правилу левой руки.

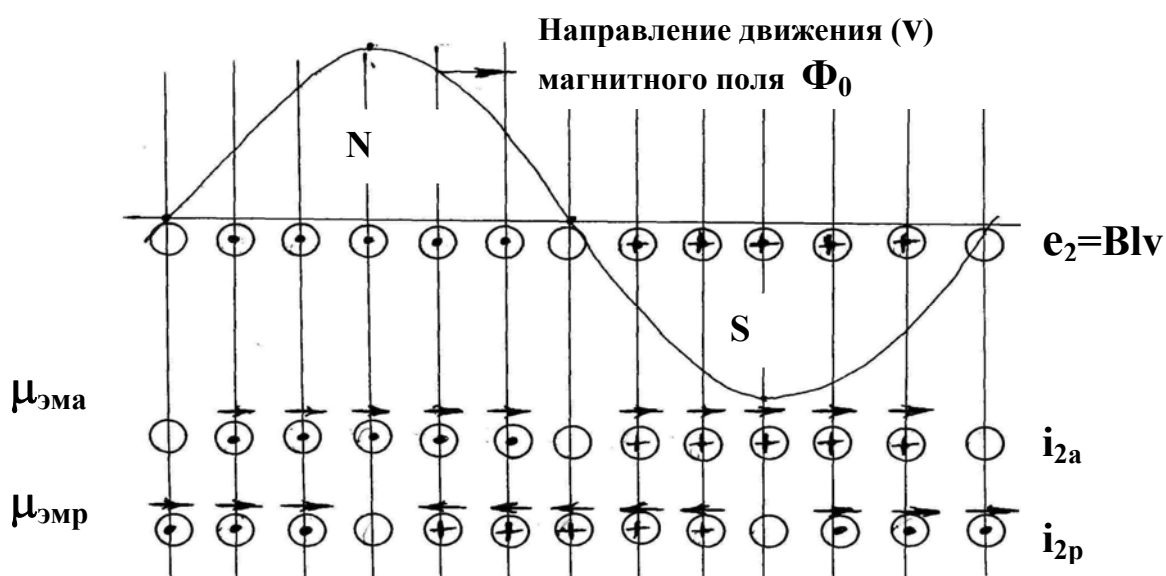


Рис. 4.1.6. Направление элементарных электромагнитных моментов $\mu_{эма}$ и $\mu_{эмп}$, создаваемых условными проводниками обмотки ротора асинхронной машины с активной i_{2a} и индуктивной i_{2p} составляющими тока

При этом приняты следующие условные обозначения: Φ_0 – основная волна магнитного потока в рабочем зазоре АМ (N - северный полюс; S - южный полюс); e_2 – мгновенное значение ЭДС ротора; «точка» - направление тока или ЭДС в сечении проводника «к нам»; «плюс» - направление тока или ЭДС в сечении проводника «от нас»)

Из анализа рис. 4.1.6 следует несколько важнейших выводов:

1. Элементарные электромагнитные моменты $\mu_{эм}$, возникающие от взаимодействия бегущей волны магнитного потока Φ_0 с индуктивной составляющей тока ротора i_{2p} не участвуют в создании общего

электромагнитного момента АМ, так как взаимно компенсируют друг друга.

2. Электромагнитный момент, действующий на вал асинхронной машины, создается от взаимодействия только лишь активной составляющей тока ротора и магнитного потока, вращающегося в рабочем зазоре АМ.

3. Направление электромагнитного момента, действующего на вал АМ, всегда совпадает с направлением движения магнитного потока относительно поверхности ротора.

Качественный анализ зависимостей тока ротора и электромагнитного момента АМ от скольжения

Основная волна вращающегося магнитного потока АМ распределена в её рабочем зазоре по синусоидальному закону, поэтому также по синусоидальному закону изменяются во времени потокосцепления обмотки статора и обмотки ротора с основным магнитным полем.

Следовательно, трехфазную АМ в электромагнитном и электрическом смысле можно рассматривать как трехфазный трансформатор, первичной обмоткой которого является обмотка статора, а вторичной – обмотка ротора. Если статорная обмотка при этом подключена к трехфазной сети, а ротор находится в неподвижном (заторможенном) состоянии, то аналогия между АМ и трансформатором почти полная.

Вращающийся магнитный поток индуцирует в обмотках статора и ротора переменные ЭДС, действующие значения которых, также как и в трансформаторе, определяются следующими соотношениями:

$$E_1 = 4,44 k_{обм1} f_1 w_1 \Phi_m \quad (4.1.7)$$

$$E_2 = 4,44 k_{обм2} f_2 w_2 \Phi_m \quad (4.1.8)$$

где E - действующие значения ЭДС обмотки статора (E_1) и ротора (E_2);

f_1 – частота напряжения питающей сети;

f_2 – частота ЭДС (тока) обмотки ротора;

w_1 – число последовательно включенных витков фазы обмотки статора;

w_2 – число последовательно включенных витков фазы обмотки ротора;

Φ_m – максимальное значение волны вращающегося магнитного потока.

$k_{обм1}$, $k_{обм2}$ – обмоточные коэффициенты для первых гармоник ЭДС статора и ротора, причем $k_{обм} = k_p k_y k_c$, где

k_p – коэффициент распределения обмотки;

k_y – коэффициент укорочения шага;

k_c – коэффициент скоса пазов.

Рассмотрим несколько характерных режимов работы АМ с фазным ротором и условия, в которых они возникают.

1. Трансформаторный режим холостого хода.

Трансформаторный режим холостого хода АМ с фазным ротором можно получить, если статорную обмотку АМ подключить к симметричной трехфазной сети, а цепь обмотки ротора оставить разомкнутой.

Так как при разомкнутой цепи обмотки ротора ток в ней отсутствует и электромагнитный вращающий момент не создается, то ротор остается неподвижным.

При неподвижном роторе скорости движения силовых линий вращающегося магнитного поля относительно статора и ротора равны между собой, следовательно, частота ЭДС неподвижного ротора $f_{2к}$ равна частоте сети f_1 и АМ становится полностью идентичной трансформатору, работающему на холостом ходу (при разомкнутой вторичной обмотке). Поэтому отношение ЭДС обмотки статора E_1 к ЭДС $E_{2к}$ обмотки неподвижного ротора у АМ, также как у трансформатора, называется коэффициентом трансформации:

$$k_{тр} = E_1 / E_{2к} = k_{обм1} w_1 / k_{обм2} w_2 \quad (4.1.9)$$

У асинхронной машины с фазным ротором величина $E_{2к}$ может быть измерена непосредственно на внешних выводах разомкнутой обмотки ротора (или на контактных кольцах).

2. Пусковой режим.

Для осуществления пуска рассматриваемой АМ в режиме двигателя необходимо при подключенной к сети обмотке статора замкнуть накоротко или на симметричную внешнюю цепь (сопротивление) внешние выводы обмотки неподвижного ротора. При этом, в каждой фазе обмотки ротора начнет протекать пусковой ток $I_{2пуск}$.

Так как в начале пуска (иногда его называют режимом короткого замыкания АМ) ротор неподвижен, то ЭДС обмотки ротора максимальна, вследствие чего пусковой ток ротора также максимален:

$$I_{2пуск} = E_{2к} / Z_{2к} \quad (4.1.10)$$

где: $E_{2к}$ - действующее значение ЭДС обмотки неподвижного ротора;

$Z_{2к}$ – модуль комплексного сопротивления обмотки неподвижного ротора;

При этом:

$$Z_{2к} = \sqrt{(R_2^2 + X_{2к}^2)} \quad (4.1.11)$$

где R_2 – активное сопротивление фазы обмотки ротора (для АМ общепромышленного исполнения R_2 можно принять неизменным для всех режимов работы АМ);

$X_{2к}$ – индуктивное сопротивление фазы обмотки неподвижного ротора, которое определяется следующим соотношением:

$$X_{2к} = 2\pi f_{2к} L_2 \quad (4.1.12)$$

где L_2 – индуктивность фазы обмотки ротора.

$f_{2к} = f_1$ – частота ЭДС и тока в обмотке неподвижного ротора.

Взаимодействие тока обмотки ротора с вращающимся магнитным полем вызовет появление электромагнитного момента, приложенного к валу АМ. Уравнение для электромагнитного момента можно выразить, в соответствии с выводами, изложенными в п. выше, в следующей форме:

$$M_{эм} = k\Phi_0 I_2 \cos\psi_2 \quad (4.1.13)$$

где: $M_{эм}$ – суммарный (средний) электромагнитный момент, приложенный к валу АМ;

I_2 – действующее значение тока, протекающего по каждой фазе обмотки ротора;

ψ_2 – угол сдвига фаз между мгновенными значениями ЭДС ротора e_2 и током ротора I_2 .

K – коэффициент пропорциональности, связанный с конструктивными особенностями АМ.

При этом

$$\cos\psi_2 = R_2 / Z_2 \quad (4.1.14)$$

У асинхронных двигателей (АД) общепромышленного исполнения при прямом пуске (при отсутствии ограничивающих устройств в цепях статорной и роторной обмоток) пусковой ток ротора может достигать 5 – 7 кратных значений номинального тока, в то время как пусковой электромагнитный момент не превышает значений, равных 1,3 – 1,5 от номинального значения.

Причина этого парадокса заключается в том, что частота пускового тока ротора очень велика (равна частоте питающего напряжения), вследствие чего велик угол $\psi_{2к}$ сдвига фаз между ЭДС и током неподвижного ротора. Поэтому значительную долю пускового тока занимает не участвующая в создании электромагнитного момента индуктивная составляющая:

$$I_{2кр} = I_{2к} \sin\psi_{2к} \quad (4.1.15)$$

При этом, активная составляющая пускового тока ротора относительно мала:

$$I_{2ка} = I_{2к} \cos\psi_{2к} \quad . \quad (4.1.16)$$

3. Двигательный режим АМ.

Если возникший и приложенный к валу внутренний электромагнитный момент АМ больше, чем моменты сопротивления, действующие с внешней стороны вала, то ротор АМ придет в движение в сторону вращения магнитного поля, преодолевая моменты сопротивления на валу. При этом магнитный поток относительно ротора будет вращаться уже не с прежней синхронной частотой

n_1 (см. соотношение 4.1.6), а с меньшей частотой вращения, которая определяется разностью Δn частот вращения поля n_1 и ротора n_2 .

В соответствии с 4.1.6 частота ЭДС и тока в обмотке вращающегося ротора будет определяться следующим соотношением:

$$f_2 = \Delta n p / 60 = (n_1 - n_2) p / 60 = s f_1 \quad , \quad (4.1.17)$$

где величина s называется скольжением и является одной из важнейших характеристик режима работы АМ. Скольжение определяется следующим соотношением:

$$s = (n_1 - n_2) / n_1 \quad . \quad (4.1.18)$$

Подставляя значение f_2 в 4.1.8 и 4.1.12, получим выражения для значений ЭДС E_2 индуктивного сопротивления X_2 обмотки ротора при любых режимах работы (при любых значениях скольжения):

$$E_2 = 4,44 k_{обм2} s f_1 w_2 \Phi_m = s E_{2к} \quad ; \quad (4.1.19)$$

$$X_2 = 2 \pi s f_1 L_2 = s X_{2к} \quad , \quad (4.1.20)$$

где: $E_{2к}$ – ЭДС обмотки неподвижного ротора;

$X_{2к}$ – индуктивное сопротивление неподвижного ротора.

При разгоне ротора скольжение уменьшается и в соответствии с (4.1.19) и (4.1.20) уменьшается ЭДС ротора и его индуктивное сопротивление.

Уменьшение ЭДС ротора по очевидной причине приводит к уменьшению абсолютного значения тока ротора.

Уменьшение индуктивного сопротивления обмотки ротора, кроме некоторого уменьшения её комплексного сопротивления Z_2 , приводит к уменьшению угла ψ_2 сдвига фаз между ЭДС и током ротора. Следовательно, при увеличении частоты вращения ротора АД вектор тока роторной обмотки I_2 , уменьшаясь по модулю, одновременно поворачивается относительно вектора ЭДС E_2 в сторону уменьшения угла ψ_2 .

Для иллюстрации сказанного, на рисунке 4.1.7 изображены два положения системы векторов E_2 и I_2 для неподвижного ($E_{2к}$, $I_{2к}$) и вращающегося (E_{2s} , I_{2s}) ротора.

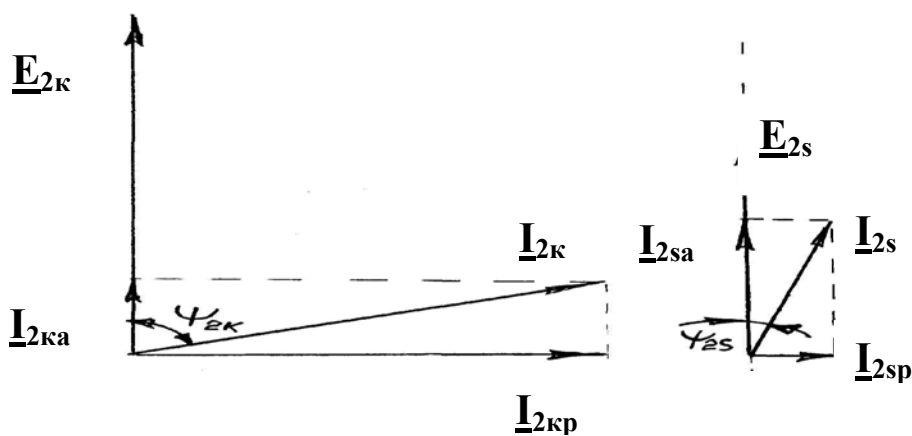


Рис. 4.1.7. Соотношение векторов E_2 и I_2 для неподвижного (а) и вращающегося (б,) ротора асинхронной машины (нижний индекс «s» относится к параметрам вращающегося ротора).

Совместное действие указанных выше факторов обуславливает сложную нелинейную зависимость тока и электромагнитного момента АМ от скольжения (от частоты вращения ротора).

На рисунке 4.1.8, учитывая приведенные выше соображения, воспроизведен график зависимости электромагнитного момента от частоты вращения ротора асинхронного двигателя (АД) общепромышленного изготовления.

На рис.4.1.9 изображен график зависимости электромагнитного момента асинхронного двигателя (АД) общепромышленного изготовления от скольжения.

Поясним особенности указанных на рисунке 4.1.8 и 4.1.9 зависимостей.

При увеличении (под действием избыточного электромагнитного момента) частоты вращения ротора от нуля (точка «1» на графике) до некоторого значения $n_{2кр}$ (точка «2» на графике) происходит увеличение электромагнитного момента от значения пускового $M_{пуск}$ до максимального («критического») $M_{кр}$, так как на данном диапазоне увеличения частоты вращения общее уменьшение тока ротора происходит менее интенсивно, чем увеличение его активной составляющей.

При дальнейшем увеличении частоты вращения ротора абсолютное уменьшение тока ротора является преобладающим и электромагнитный момент, несмотря на уменьшение угла ψ_2 , также начинает уменьшаться.

В реальном АД увеличение частоты вращения ротора АД будет происходить до тех пор, пока на валу АД существует положительная разница (положительный избыточный момент) между электромагнитным моментом и суммарным моментом сопротивления M_c . При равенстве электромагнитного момента и момента сопротивления изменение скорости прекращается. При отсутствии какой-либо механической нагрузки на валу частота вращения АД будет увеличиваться до величины n_{xx} , при которой электромагнитный момент АД станет равным моменту сопротивления холостого хода M_{xx} (режим реального холостого хода).

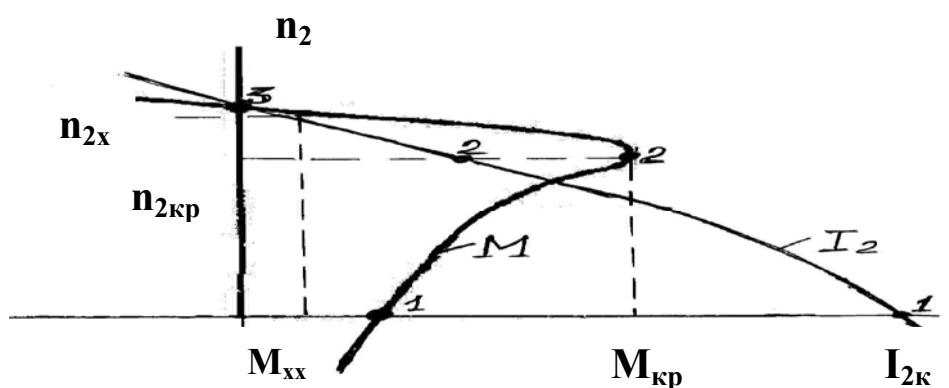


Рис. 4.1.8. График зависимости электромагнитного момента M и тока ротора I_2 от частоты вращения n_2 ротора

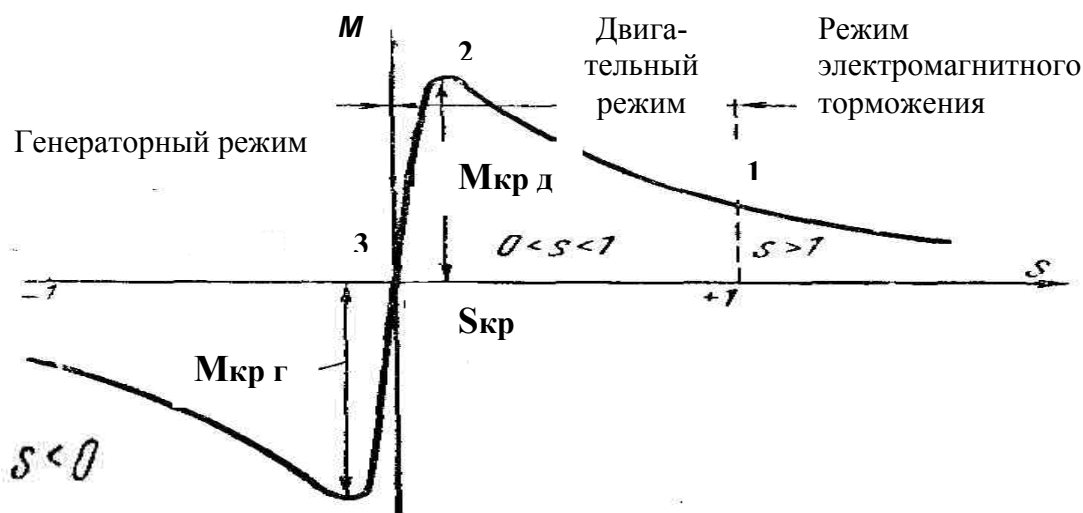


Рис. 4.1.9. График зависимости электромагнитного момента M от скольжения s

4. Режим идеального холостого хода.

Если приложить к валу АД некоторый внешний момент, направленный в сторону вращения магнитного поля (подкручивающий момент), то можно довести частоту вращения ротора до частоты вращения магнитного поля (до синхронной частоты вращения) n_1 . В этом режиме (точка «3» на графике 4.1.8) магнитное поле и ротор вращаются в одну и ту же сторону с одной и той же скоростью, взаимного пересечения силовых линий магнитного поля и витков обмотки ротора не происходит, ЭДС и ток ротора равны нулю и всякое электромагнитное взаимодействие между обмотками статора и ротора прекращается: наступает режим идеального холостого хода.

5. Генераторный режим, параллельно с сетью (режим рекуперативного торможения).

Если подкручивающий момент превысит величину момента реального холостого хода, то ротор АД начнет разгоняться до частот вращения, превышающих синхронную ($n_1 < n_2$). Ротор начнет «обгонять» магнитное поле, направление движения его магнитных силовых линий относительно поверхности ротора изменится на противоположное (на 180°), следовательно на 180° изменится фаза ЭДС и тока ротора. Так как фаза активной составляющей тока ротора также изменится на 180° , то направление действия создаваемого электромагнитного момента также изменится на противоположное: электромагнитный момент из движущего (согласного с направлением вращения ротора) превратится в тормозной (направленный против вращения ротора). В этом режиме механическая энергия, получаемая от внешних источников, связанных с валом АД (например, от грузовой лебедки, работающей на спуск груза) преобразуется в асинхронной машине электромагнитным путем в электрическую энергию, передаваемую в сеть.

Так как в генераторном режиме $n_1 < n_2$, то скольжение становится отрицательным.

6. Режим противовключения.

Режим противовключения получается в том случае, если на валу АД создается внешний механический момент, направленный против направления вращения магнитного поля и превышающий по величине пусковой электромагнитный момент АД. При этом ротор под действием отрицательного избыточного момента начнет разгоняться в обратную, по сравнению с направлением вращения поля, сторону. Скорость взаимного перемещения силовых линий магнитного поля и проводников ротора в этом режиме будет определяться суммой частот вращения магнитного поля и ротора, то есть величина скольжения $s_{пв}$ становится больше единицы, так как:

$$s_{пв} = (n_1 + n_2) / n_1 \quad (4.1.21)$$

Это приводит, в соответствии с (4.1.19), к увеличению величины ЭДС и тока ротора. Очень важно отметить, что в режиме противовключения увеличение тока ротора не приводит к пропорциональному росту электромагнитного момента АД, так как при значениях скольжения больше единицы частота тока ротора превышает частоту сети и сопротивление цепи обмотки ротора и ток, текущий по ней носит в основном индуктивный характер.

В режиме противовключения асинхронная машина), также как в пусковом или двигательном режимах, по-прежнему (так как скольжение не меняет знак) потребляет из сети электрическую энергию. В то же время, в связи с тормозным характером электромагнитного момента, АМ также потребляет и механическую энергию со стороны вала. Такое состояние АМ означает, что и механическая энергия со стороны вала и электрическая энергия со стороны сети должны быть преобразованы в тепловую энергию, которая рассеивается на элементах электрических цепей статора и ротора. Следовательно, режим противовключения (если не предпринимать специальных мер безопасности) создаёт повышенную опасность перегрева и повреждения АМ.

Диапазон скольжений, соответствующих различным режимам АМ.

Пусковой режим: $s_{пуск} = 1$.

Двигательный режим: $0 < s_d < 1$.

Режим идеального холостого хода: $s_0 = 0$.

Генераторный режим (режим рекуперации): $s_r < 0$.

Режим противовключения: $1 < s_{пв}$.

Более подробно материал по данной теме изложен в третьей (с. 9-14) и четвертой (с. 5-21) части учебного пособия [1]. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 4.1.

1. С помощью каких конструктивно-схемных решений можно получить вращающееся (перемещающееся) магнитное поле при питании от многофазной сети?
2. С помощью каких конструктивно-схемных решений можно получить вращающееся (перемещающееся) магнитное поле при питании от однофазной сети?
3. Чем определяется направление вращения (перемещения) магнитного поля при питании машины от трехфазной сети? Каким образом изменить направление вращения (перемещения) магнитного поля?
4. Чем определяется направление вращения (перемещения) магнитного поля при питании машины от однофазной сети? Каким образом изменить направление вращения (перемещения) магнитного поля?
5. Поясните связь угловой скорости вращения магнитного поля (синхронной частоты вращения) с частотой питающей сети и числом пар полюсов электрической машины.
6. Назовите основные конструктивные части типовой АМ.
7. Какими принципиальными конструктивными особенностями отличаются АМ с фазным ротором от АМ с короткозамкнутым ротором?
8. Какими стандартными обозначениями маркируются внешние выводы трехфазных обмоток статора и ротора АМ?
9. Что означает слово «асинхронная» в названии АМ?
10. Почему ток холостого хода АМ всегда в несколько раз выше, чем ток холостого хода трансформатора при практически полной идентичности процессов, протекающих в их электрических и магнитных цепях? Назовите ориентировочно относительные значения тока холостого хода асинхронных двигателей общепромышленного исполнения?
11. Почему у асинхронных двигателей (АД) общепромышленного исполнения при прямом пуске (при отсутствии ограничивающих устройств в цепях статорной и роторной обмоток) пусковой ток ротора может достигать 5 – 7 кратных значений номинального тока, в то время как пусковой электромагнитный момент не превышает значений, равных 1,3 – 1,5 от номинального значения?
12. Какой параметр называется скольжением АМ?
13. Почему при увеличении частоты вращения ротора от нуля до критической происходит увеличение электромагнитного момента от значения пускового до максимального («критического»), в то время как ток ротора на данном диапазоне увеличения частоты вращения непрерывно уменьшается?
14. Как экспериментально получить генераторный режим, параллельный с сетью (режим рекуперативного торможения) АМ?
15. Как экспериментально получить режим противовключения?
16. Как по значению скольжения определить режим работы?

Тема 4.2. Математическое описание установившихся процессов в электрических цепях асинхронной машины.

Общие соображения

При замкнутой цепи обмотки ротора АМ в ней образуется многофазная система токов, которые, аналогично токам в обмотке статора, возбуждают «свое» вращающееся магнитное поле с числом пар полюсов $p_2 = p_1 = p$. Частоту вращения n_{22} этого поля относительно ротора можно определить, пользуясь общим выражением для частоты вращения многополюсного поля (4.1.6):

$$n_{22} = 60 f_2 / p = 60 f_1 s / p \quad (4.2.1)$$

Так как сам ротор вращается в направлении вращения поля статора с частотой вращения

$$n_2 = n_1 (1 - s) = (1 - s) 60 f_1 / p, \quad (4.2.2)$$

то его поле вращается в пространстве относительно неподвижного статора с частотой вращения n_{21}

$$\begin{aligned} n_{21} &= n_{22} + n_2 = 60 f_1 s / p + (1 - s) 60 f_1 / p = \\ &= (s + 1 - s) 60 f_1 / p = 60 f_1 / p = n_1, \quad (4.2.3) \end{aligned}$$

т. е. поле ротора относительно статора вращается с частотой вращения поля статора, или с синхронной частотой вращения n_1 .

Таким образом, вращающиеся поля статора и ротора по отношению друг к другу остаются неподвижными, что является условием передачи энергии от статора к ротору. Складываясь, вращающиеся магнитные поля статора и ротора образуют в рабочем зазоре асинхронной машины рабочее (основное) вращающееся магнитное поле.

Основное вращающееся поле в рабочем зазоре асинхронного двигателя служит таким же связующим звеном между обмотками статора и ротора, как и переменное магнитное поле в магнитопроводе трансформатора служит связующим звеном между первичной и вторичной обмотками, передавая энергию из первичной цепи во вторичную.

Следовательно, к анализу физических процессов, происходящих в электрических и магнитных цепях асинхронной машины, можно применить методы, используемые при анализе физических процессов, происходящих в электрических и магнитных цепях трансформатора, в том числе соответствующие схемы замещения, векторные диаграммы и др.

Однако физические процессы в магнитных и электрических цепях асинхронной машины, несмотря на существенную схожесть с процессами в трансформаторах, имеют некоторые особенности, которые нужно учитывать при расчетах и анализе, в частности при формировании схем замещения.

Сравнительные особенности асинхронной машины и трансформатора

1. Повышенное значение тока холостого хода.

Заметным отличием АМ от обычного силового трансформатора является то, что **ток холостого хода АМ всегда в несколько раз (иногда на порядок) выше, чем ток холостого хода трансформатора.** Это обуславливается тем обстоятельством, что между первичной и вторичной обмоткой обычного типового трансформатора нет никакого воздушного зазора, тогда как между обмотками статора и ротора АМ обязательно присутствует рабочий воздушный зазор, создающий большое сопротивление для магнитного потока. Вследствие этого, для создания номинального магнитного потока в рабочем зазоре АМ необходима большая МДС, а следовательно и больший ток намагничивания, который и определяет, в основном, величину тока холостого хода. Для примера, ток холостого хода у асинхронных двигателей (АД) общепромышленного

исполнения достигает значений от 25% до 50 % номинального тока, тогда как ток холостого хода обычного силового трансформатора находится в диапазоне от 0,5% до 4% номинального тока.

2. Неравенство в АМ с короткозамкнутым ротором коэффициента приведения (трансформации) ЭДС $k_{трЕ}$ и коэффициента приведения (трансформации) тока $k_{трI}$.

В отличие от трансформатора и АМ с фазным ротором, где количество фаз первичной и вторичной обмоток (обмотки статора и обмотки фазного ротора) определено конструкцией обмоток и равно друг другу, в короткозамкнутой обмотке ротора образуется многофазная система токов с числом фаз $m_2 = N = Z$, (где N – число активных стержней короткозамкнутой «беличьей клетки», равное числу пазов Z).

Коэффициент приведения (трансформации) токов $k_{трI}$ в этом случае определяется из основного векторного уравнения МДС трансформатора или АМ:

$$\underline{E}_0 = \underline{E}_1 + \underline{E}_2 \quad , \quad (4.2.4)$$

где: вектор МДС намагничивания \underline{E}_0

$$\underline{E}_0 = (m_1 \sqrt{2} k_{обм1} w_1 I_0) / \pi r \quad (4.2.5)$$

вектор МДС первичной обмотки (обмотки статора) \underline{E}_1

$$\underline{E}_1 = (m_1 \sqrt{2} k_{обм1} w_1 I_1) / \pi r \quad (4.2.6)$$

вектор МДС вторичной обмотки (обмотки ротора) \underline{E}_2

$$\underline{E}_2 = (m_2 \sqrt{2} k_{обм2} w_2 I_2) / \pi r \quad . \quad (4.2.7)$$

Так как в соответствии с Т-образной схемой замещения

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \underline{I}_2' \quad , \quad (4.2.8)$$

то уравнение (4.2.4) с учетом (4.2.5) – (4.2.7) можно записать в следующем виде:

$$m_1 k_{обм1} w_1 \underline{I}_2' = m_2 k_{обм2} w_2 \underline{I}_2 \quad , \quad (4.2.9)$$

откуда коэффициент приведения (трансформации) токов:

$$k_{трI} = \underline{I}_2 / \underline{I}_2' = m_1 k_{обм1} w_1 / m_2 k_{обм2} w_2 \quad (4.2.10)$$

или, с учетом (4.1.15):

$$k_{трI} = \underline{I}_2 / \underline{I}_2' = (m_1 / m_2) k_{трЕ} \quad . \quad (4.2.11)$$

Т-образная схема замещения асинхронной машины при неподвижном роторе полностью идентична Т-образной схеме замещения трансформатора с учетом особенностей АМ, рассмотренных выше.

Т-образная схема замещения асинхронной машины при вращающемся роторе

При растормаживании ротор приходит во вращение, значения ЭДС и индуктивного сопротивления цепи ротора в соответствии с (4.1.25) и (4.1.26) начинают изменяться в зависимости от величины скольжения. Приведенное значение тока вращающегося ротора определяется следующим соотношением:

$$I_2' = sE_{2k}' / \sqrt{[R_2'^2 + (sX_{2k}')^2]} \quad (4.2.12)$$

или, после небольших и очевидных преобразований,

$$I_2' = E_{2k}' / \sqrt{[(R_2'/s)^2 + X_{2k}'^2]} \quad (4.2.13)$$

Схема замещения фазы обмотки вращающегося ротора АМ, соответствующая соотношению 4.2.14, представлена на рисунке 4.2.1а.

Недостатком схемы рис. 4.2.1а является невозможность разделения потока электромагнитной энергии, передаваемой через рабочий зазор АМ электромагнитным путем в цепь ротора, на мощность потерь в цепи ротора и на электромеханическую мощность, развиваемую на валу АМ. Для решения этой задачи необходимо преобразовать соотношение (4.2.13) к следующему виду:

$$I_2' = E_{2k}' / \sqrt{[R_2'^2 + R_2'(1-s)/s]^2 X_{2k}'^2]} \quad (4.2.14)$$

На рисунке 4.2.1б представлена схема замещения фазы АМ с вращающимся ротором, выполненная с учетом соотношения (4.2.14).

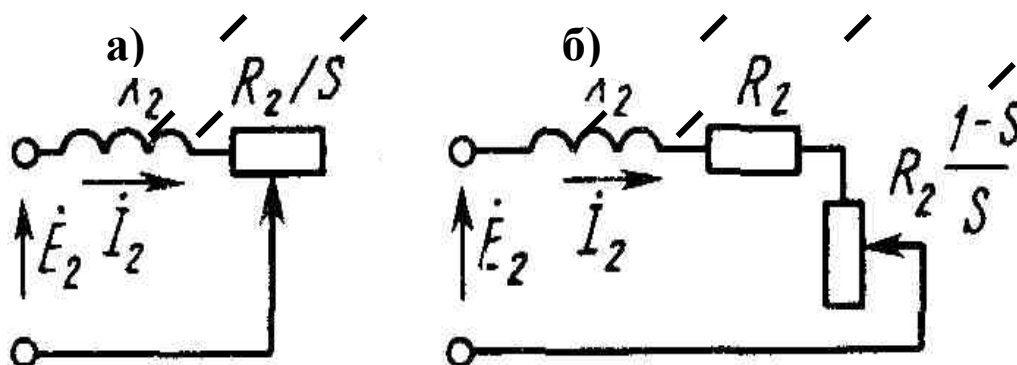


Рис. 4.2.1. Схема замещения фазы обмотки вращающегося ротора АМ без разделения (а) и с разделением (б) потока энергии ротора на электрические потери и электромеханическую составляющую

В этом случае, мощность ΔP_2 потерь активной энергии в каждой фазе цепи ротора (потери в проводниках обмотки ротора) будет определяться как мощность, развиваемая током I_2' на сопротивлении R_2'

$$\Delta P_2 = I_2'^2 R_2' \quad (4.2.15)$$

Мощность, развиваемая током I_2' на сопротивлении $R_2'(1-s)/s$ представляет собой механическую составляющую потока электромагнитной энергии, передаваемой через рабочий зазор АМ в цепь ротора. Эта составляющая, за вычетом механических потерь, выделяется на валу асинхронного двигателя в виде выходной (полезной) мощности

$$I_2'^2 R_2' (1-s)/s = M_{эм} \omega_2 \quad (4.2.16)$$

где: $M_{эм}$ - электромагнитный момент, создаваемый ротором АМ;

ω_2 - угловая скорость ротора АМ.

На рисунке 4.2.2. представлена полная Т-образная схема замещения фазы АМ с вращающимся ротором.

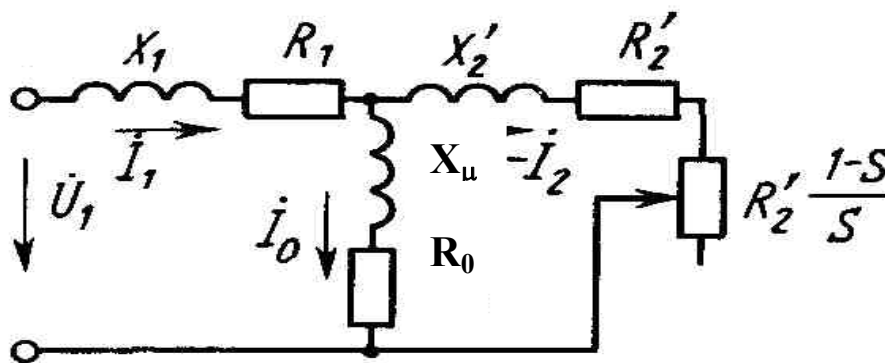


Рис. 4.2.2. Т-образная схема замещения фазы АМ с вращающимся ротором

Система векторных уравнений электрического равновесия цепей статора и ротора АМ в соответствии со схемой замещения рис. 4.2.2 выглядит следующим образом:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 R_1 + \underline{I}_1 jX_1 ; \quad (4.2.17)$$

$$0 = \underline{E}_2' - \underline{I}_2' R_2' - \underline{I}_2' R_2' (1-s)/s - \underline{I}_2' jX_2' ; \quad (4.2.18)$$

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2' ; \quad (4.2.19)$$

$$\underline{E}_1 = \underline{E}_2' = -\underline{I}_0 \underline{Z}_0 . \quad (4.2.20)$$

Г-образная схема замещения АМ

С помощью Т-образной схемы замещения можно найти относительно точные расчетные формулы для определения любых величин,

характеризующих электромагнитные процессы в асинхронной машине (в том числе, например, формулы для расчета токов и ЭДС статора и ротора, тока намагничивания, электромагнитной и механической мощностей и т.д.).

Однако в ряде случаев, например для вывода удобных для практического применения уравнений электромеханической $I_2 = f(s)$ и механической $M = f(s)$ характеристик АМ, построение так называемой круговой диаграммы АМ и определения по ней рабочих характеристик АМ Т-образную схему целесообразно преобразовать в эквивалентную Г-образную схему замещения, которая отличается от Т-образной схемы тем, что в ней контур намагничивания вынесен на внешние выводы и включен на напряжение сети U_1 .

В практических инженерных расчетах часто применяют упрощенную Г-образную схему замещения АМ, показанную на рис. 4.2.3,

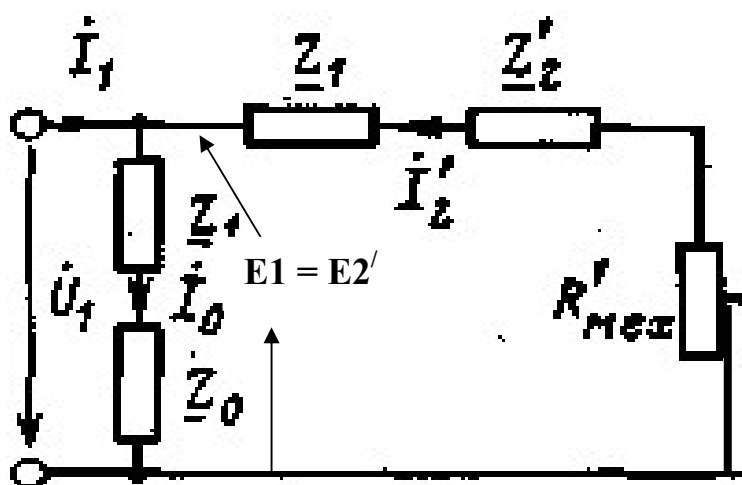


Рис. 4.2.3. Упрощенная Г-образная схема замещения АМ

где: $\underline{Z}_0 = \underline{R}_0 + jX_\mu$ - комплексное сопротивление контура намагничивания;

$\underline{Z}_1 = \underline{R}_1 + jX_{\sigma 1}$ - комплексное сопротивление обмотки статора;

$\underline{Z}_2' = \underline{R}_2' + jX_{\sigma 2}'$ - комплексное сопротивление обмотки ротора, приведенное к статору;

$\underline{R}'_{\text{мех}} = \underline{R}_2'(1-s)/s$ - приведенное к статору активное сопротивление обмотки ротора, отражающее процесс преобразования электромагнитной энергии в механическую (см. соотношение (4.2.16)).

С целью уменьшения погрешностей в ветвь намагничивающего тока Г-образной схемы вводится, кроме сопротивления \underline{Z}_0 еще и сопротивление \underline{Z}_1 .

Параметры асинхронных машин таковы, что переход от Т-образной схемы замещения к представленной на рис. 4.2.3 упрощенной Г-образной схеме замещения, в которой ветвь намагничивающего тока I_0 вынесена на зажимы сети, не приводит к появлению недопустимых погрешностей.

Рабочие характеристики асинхронных двигателей

Режим двигателя является основным режимом, в котором практически используются асинхронные машины. Другие возможные режимы работы применяются крайне редко. Поэтому подавляющая часть выпускаемых промышленностью асинхронных машин предназначается заводами-изготовителями для работы в режиме двигателя и называется асинхронными двигателями. Этим названием подчеркивается, что выпускаемые машины обладают определенными гарантированными техническими показателями только в режиме двигателя, хотя в принципе они могут работать и в других режимах.

Зависимости КПД η , $\cos\varphi_1$, потребляемой мощности P_1 , электромагнитного момента M , скольжения s , угловой скорости Ω (частоты вращения ротора n) от развиваемой на валу двигателя мощности P_2 , называются рабочими характеристиками АД. Типичные рабочие характеристики асинхронного двигателя представлены в относительной форме на рис.4.2.4.

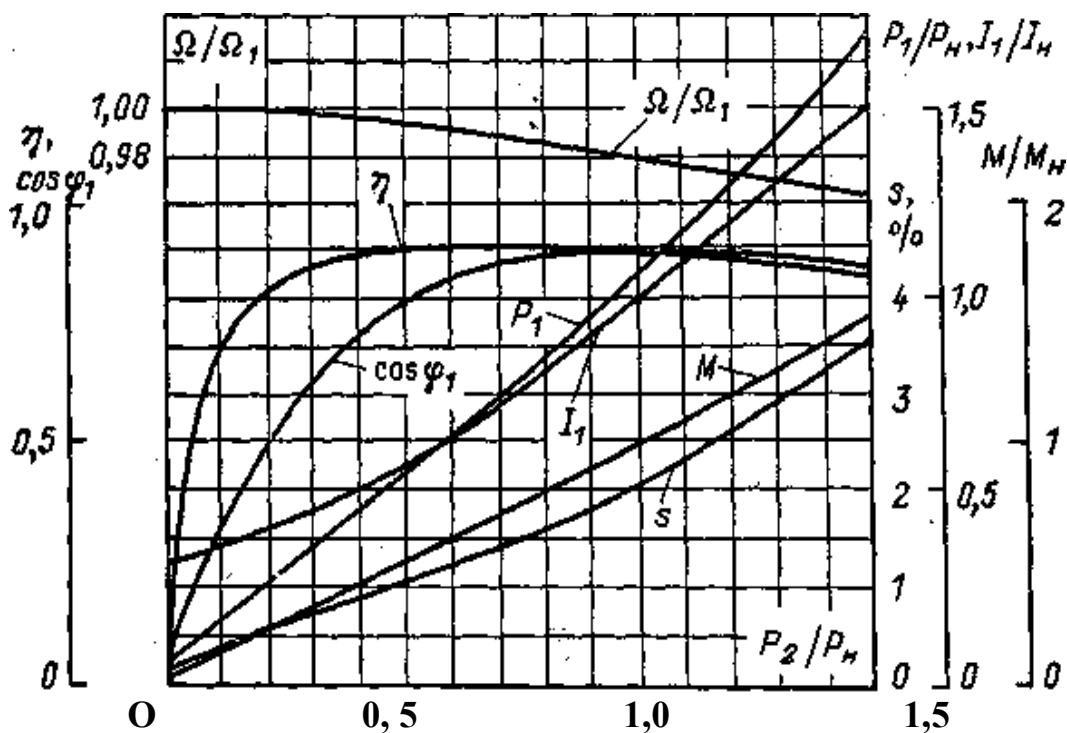


Рис. 4.2.4. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Как видно из рис. 4.2.4, вместе с полезной нагрузкой, характеризуемой механической мощностью P_2 , изменяются ток I_1 и угол φ_1 . Соответственно, при увеличении P_2 коэффициент мощности $\cos\varphi_1$ изменяется от $\cos\varphi_0$ на холостом ходу до максимального $\cos\varphi_{1\max}$. Обычно максимальный коэффициент мощности наблюдается при токе, близком к номинальному. Номинальный коэффициент мощности составляет 0,7—0,9. При уменьшении нагрузки до 0,5 он снижается примерно на 0,1.

Максимальный КПД η_{\max} как и в трансформаторе, получается при

нагрузке, при которой постоянные потери, мало зависящие от нагрузки, равны переменным потерям, изменяющимся вместе с нагрузкой.

Двигатель проектируется таким образом, чтобы максимум КПД получался при некоторой недогрузке (на рис. 4.2.4 при $P_2/P_{2н} = 0,7$). Тогда в диапазоне нагрузок от 0,5 до 1,0 КПД остается почти постоянным и составляет для двигателей общепромышленного исполнения 0,75—0,95.

При изменении нагрузки от холостого хода до номинальной угловая скорость (частота вращения) ротора двигателя изменяется незначительно от синхронной Ω_1 до $\Omega = \Omega_1 (1 - s_n)$, т. е. всего на несколько процентов. Поэтому говорят, что АД обладает «жесткой» рабочей характеристикой $\Omega = f(P_2)$, а следовательно и «жесткой» механической характеристикой $\Omega = f(M)$.

Рабочие характеристики АД, представленные на рис. 4.2.4, могут быть рассчитаны аналитическим методом или получены экспериментально.

Широкое распространение получил рассмотренный ниже экспериментально-графический метод определения рабочих характеристик с помощью круговой диаграммы асинхронной машины. Однако при этом нужно иметь в виду, что с увеличением нагрузки АД увеличивается скольжение и, как следствие, частота тока ротора. Это приводит к эффекту вытеснения тока ротора и, как следствие, к изменению активного R_2 и индуктивного X_2 сопротивлений обмотки ротора. Кроме того, изменение сопротивлений X_1 и X_2 происходит вследствие насыщения путей, по которым замыкаются потоки пазового рассеяния (зубцы и коронки зубцов).

Поэтому параметры асинхронных машин можно считать постоянными лишь при небольших перегрузках асинхронного двигателя и точный расчет его рабочих характеристик по круговой диаграмме возможно выполнить лишь для изменения нагрузки от холостого хода до мощности $P_2 \sim (1,3 - 1,5) P_{н}$, что соответствует примерно диапазону изменения скольжения $s = 0 - 0,05$. Подробнее о порядке построения круговой диаграммы и её использовании для получения рабочих характеристик АД см. [1, ч.4, с. 47 – 52].

Более подробно материал по данной теме изложен в четвертой части учебного пособия [1] на с. 21-52. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1 УМК) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 4.2

1. Перечислите особенности АМ по сравнению с трансформаторами, которые нужно учитывать при формировании схем замещения АМ.
2. С какой скоростью магнитные поля, создаваемые обмотками статора и ротора АМ, вращаются относительно друг друга?
3. Приведите основное векторное уравнение равновесия МДС АМ (трансформатора).
4. Объясните каким реальным процессам в АМ соответствуют параметры Т-образной схемы замещения АМ?
5. Какой дополнительный параметр появляется в схеме замещения АМ при переходе от режима неподвижного к режиму вращающегося ротора?
6. Приведите систему векторных уравнений электрического равновесия цепей статора и ротора АМ в соответствии с Т-образной схемой замещения.
7. Приведите схему замещения и полный алгоритм построения векторной диаграммы

для асинхронной машины, работающей в двигательном режиме при симметричном включении статорной обмотки в сеть.

8. Приведите схему замещения и полный алгоритм построения векторной диаграммы для асинхронной машины, работающей в генераторном режиме параллельно с сетью (режим рекуперативного торможения).

9. Изобразите энергетическую диаграмму АМ, работающей в двигательном режиме.

10. Изобразите энергетическую диаграмму АМ, работающей в генераторном режиме параллельно с сетью.

11. Какова связь КПД АМ со скольжением?

12. Чем вызвана необходимость формирования Г-образной схемы замещения АМ?

13. Изобразите упрощенную Г-образную схему замещения АМ и обоснуйте правомерность её применения.

14. Какие зависимости называются рабочими характеристиками асинхронных двигателей?

15. Приведите примерную форму типичных рабочих характеристики асинхронного двигателя.

16. Какой смысл вкладывается в термин: «жесткая характеристика»?

17. На основе какой схемы замещения АМ и какой физической закономерности строится круговая диаграмма?

18. Какие экспериментальные данные об АМ являются первичной информацией для построения круговой диаграммы? Как проводятся эксперименты для получения указанных данных?

19. Почему пусковой момент АД определяется аналитическими методами, а не по круговой диаграмме?

4.3. Уравнение механической характеристики асинхронной машины.

Вывод и анализ уравнения механической характеристики АМ

Для получения уравнения $M_{ЭМ} = f(s)$ механической характеристики АМ рассмотрим упрощенную Г-образную схему замещения АМ, для которой справедливо следующее уравнение для активной электромагнитной мощности, передаваемой через рабочий зазор АМ в цепь ротора

$$P_{ЭМ} = \omega_1 M_{ЭМ} = m_1 I_2'^2 R_2' / s \quad (4.3.1)$$

где ω_1 – угловая скорость магнитного поля АМ (определяется частотой сети f_1 и числом пар полюсов p)

$$\omega_1 = 2\pi f_1 / p \quad (4.3.2)$$

Из (4.3.1) следует

$$M_{ЭМ} = P_{ЭМ} / \omega_1 = (m_1 I_2'^2 R_2' / s) / \omega_1 \quad (4.3.3)$$

После подстановки в (4.3.3) значения приведенного тока ротора I_2' , соответствующего Г-образной схеме замещения рис. 4.2.3

$$I_2' = U_1 / \sqrt{[(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}')^2]} \quad (4.3.4)$$

получим

$$M_{ЭМ} = (m_1 U_1^2 R_2' / s) / \omega_1 [(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}')^2] \quad (4.3.5)$$

или, с учетом равенства (4.3.2),

$$M_{ЭМ} = (m_1 p U_1^2 R_2' / s) / 2\pi f_1 [(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}')^2] \quad (4.3.6)$$

Уравнения (4.3.5) и (4.3.6), при условии неизменности параметров схемы замещения АМ, и представляют собой уравнения механической характеристики АМ. Исследовав в обычном порядке на максимум уравнение (3.13), получим значение скольжения, соответствующее максимальному (критическому) моменту АМ

$$S_{кр} = +(-) R_2' / \sqrt{(R_1^2 + X_{кр}^2)} \quad (4.3.7)$$

После подстановки (4.3.7) в (4.3.6) получим уравнение для максимального (критического) момента АМ

$$M_{кр} = +(-) m_1 U_1^2 / [2\omega_1 \sqrt{(R_1^2 + X_{кр}^2)} + (-) R_1] \quad (4.3.8)$$

Знак «+» в уравнениях (4.3.7) и (4.3.8) соответствует двигательному режиму АМ, а знак «-» - генераторному режиму.

Уравнение для анализа зависимости пускового момента асинхронного двигателя (АД) от параметров питающего напряжения и сопротивлений обмоток статора и ротора можно получить, например, из (4.3.6), подставив в него вместо текущей координаты s конкретное, для данного режима, значение скольжения $s_{пуск} = 1$

$$M_{пуск} = (m_1 p U_1^2 R_2') / 2\pi f_1 [(R_1 + R_2')^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}')^2] \quad (4.3.9)$$

Анализ уравнений (4.3.6) - (4.3.9) позволяет сделать следующие выводы:

1. Значение электромагнитного момента (в том числе критического и пускового) асинхронной машины прямо пропорционально квадрату питающего напряжения (при фиксированных остальных параметрах).
2. Значение критического момента не зависит от величины активного сопротивления цепи ротора.
3. Значение критического момента в генераторном режиме АМ выше, чем в двигательном режиме.
4. Пусковой момент АД прямо пропорционален величине активного сопротивления цепи ротора (на некотором диапазоне изменения R_2).
5. Значение критического скольжения теоретически не зависит от величины питающего напряжения.
6. Значение критического скольжения прямо пропорционально величине активного сопротивления цепи ротора (при фиксированных остальных параметрах).

Более подробно материал по данной теме изложен в четвертой части

учебного пособия [1] на с. 52-64. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 4.3.

1. Приведите уравнение, соответствующее зависимости тока ротора АМ от скольжения.
2. Приведите уравнение механической характеристики АМ.
3. Приведите формулу для расчета критического скольжения АМ.
4. Приведите формулу для расчета максимального (критического) момента АМ.
5. Почему асинхронные двигатели чувствительнее всех других типов электродвигателей к колебаниям напряжения сети?
6. Как у асинхронного двигателя увеличить пусковой момент при одновременном уменьшении пускового тока?
7. Каким целям служит применение формулы Клосса? Какие исходные данные нужны для её использования? Какие ограничения существуют на применение формулы Клосса? С чем связаны эти ограничения?
8. Каким образом можно изменить координаты рабочей точки механической характеристики АМ, соответствующей стоянке АМ под током (пусковому режиму)?
9. Каким образом можно изменить координаты рабочей точки механической характеристики АМ, соответствующей критическому режиму?
10. Каким образом можно изменить координаты рабочей точки механической характеристики АМ, соответствующей идеальному холостому ходу?

Тема 4.4. Регулирование выходной скорости асинхронных двигателей.

Общие сведения

Изменение выходной скорости электродвигателя может происходить по многим причинам, в том числе вследствие колебания нагрузки, случайного изменения параметров двигателя или питающей сети. Однако **под регулированием выходной скорости электродвигателя (у электродвигателя с вращающимся ротором – угловой скорости или частоты вращения выходного вала) понимается целенаправленное воздействие на двигатель со стороны эксплуатирующего персонала, гарантированно приводящее к заранее известным изменениям угловой скорости (частоты вращения) его вала.**

Для регулирования выходной скорости двигателя всегда требуется изменить либо схему его включения, либо параметры питающего напряжения. Поэтому, **регулирование выходной скорости электродвигателя всегда связано с переводом его с работы по одной механической характеристики на работу по другой механической характеристике.**

Поскольку угловая скорость ω ротора АД определяется выражением $\omega = \omega_1 (1 - s)$, то все возможные способы регулирования АД можно разделить на две принципиально отличающиеся друг от друга группы:

1. **Способы регулирования, основанные на изменении угловой скорости магнитного поля ω_1 ;**
2. **Способы регулирования, основанные на изменении скольжения s .**

Так как угловая скорость магнитного поля определяется выражением $\omega_1 = 2\pi f_1/p$, то изменить её можно двумя способами:

- изменением частоты f_1 напряжения, питающего статорную обмотку;
- изменением числа пар полюсов p фазных обмоток двигателя (как правило, обмотки статора).

Изменение скольжения s (при неизменном моменте сопротивления на валу) может быть достигнуто двумя группами способов.

К первой из них относятся способы изменения скольжения, при которых мощность скольжения $sP_{эм}$ выделяется в виде тепла в электрической цепи обмотки ротора. К данной группе относятся следующие способы изменения скольжения:

- изменение величины питающего напряжения U_1 ;
- введение дополнительного активного сопротивления R_2 в цепь ротора;
- введение дополнительных реактивных сопротивлений в цепь ротора.

Ко второй группе способов изменения скольжения относятся способы, при которых мощность скольжения $sP_{эм}$ в основном полезно используется и лишь частично теряется в электрических цепях ротора в виде потерь. **К данной группе относятся способы изменения скольжения, связанные с введением дополнительной ЭДС в цепь ротора с помощью схем электрических или электромеханических каскадов.**

При предварительной общей сравнительной оценке указанных выше способов регулирования выходной скорости АД нужно заранее обратить внимание на то, что экономичность (с точки зрения изменения КПД двигателя) того или другого способа тем выше, чем более жесткие механические характеристики обеспечиваются при данном способе регулирования. С этой точки зрения способы, основанные на увеличении скольжения АД, всегда отличаются более низкой экономичностью по сравнению со способами, основанными на изменении скорости вращения магнитного поля (при практически неизменном скольжении). Это следует из известного соотношения $\eta_2 \sim 1 - s$, где η_2 – КПД роторной цепи.

Более подробно материал по данной теме изложен в четвертой части учебного пособия [1] на с. 64-77. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 4.4.

1. На какие две принципиально отличающиеся друг от друга группы можно разделить все возможные способы регулирования выходной скорости АД?
2. Какими способами можно изменить величину угловой скорости магнитного поля АД?
3. Какими способами можно изменить величину скольжения АД (при неизменном моменте сопротивления на валу)?

4. Какие способы изменения скольжения позволяют полезно использовать мощность скольжения? В каких типах АД возможно полезное использование мощности скольжения при регулировании скорости?

5. Изобразите вид механических характеристик (МХ), соответствующих различным способам регулирования скорости АД.

6. Как на основе сравнительного анализа графиков механических характеристик АД можно сделать вывод о сравнительной экономичности того или иного способа регулирования выходной скорости АД?

7. Какие достоинства и недостатки Вы можете отметить у известных Вам способов регулирования скорости АД?

8. Почему при частотном регулировании скорости АД необходимо одновременно с частотой изменять и величину питающего напряжения?

9. Изобразите простейшую схему переключения одной из фаз статорной обмотки АД, позволяющая изменять число полюсов двигателя в 2 раза.

10. Почему при регулировании частоты вращения АД уменьшением величины питающего напряжения появляется опасность перегрева двигателя?

Тема 4.5. Способы пуска асинхронных двигателей.

АД с особыми пусковыми свойствами и естественными механическими характеристиками

Общие сведения

Кроме надежности, экономичности, длительности и простоты пуска, все применяемые способы пуска в ход электродвигателей характеризуются:

1) кратностью пускового момента $k_{п} = M_{пуск} / M_{н}$;

2) кратностью пускового тока $k_{i} = I_{пуск} / I_{н}$;

3) добротностью пуска или пусковым отношением $k_{д} = k_{п} / k_{i}$.

Для асинхронных двигателей обычного исполнения эти показатели имеют следующие значения: $k_{п} = 1,0-1,8$; $k_{i} = 5,5-7,0$; $k_{д} = 0,15-0,35$.

Отсюда следует, что **одним из существенных недостатков асинхронных двигателей является большой пусковой ток при незначительном пусковом моменте на валу.** При частых пусках пусковые токи могут вызвать перегрев двигателя, а при одиночных пусках они хотя и не оказывают на двигатель заметного отрицательного воздействия, но при большой мощности пускаемого двигателя могут привести к глубоким провалам напряжения в сети и опрокидыванию других работающих от данной сети асинхронных двигателей.

При пуске АД желательно обеспечить как можно больший пусковой момент при как можно малом пусковом токе. Иногда к этим требованиям добавляют и другие, обусловленные особенностями конкретных приводов, в которых используют асинхронные двигатели, например, необходимость плавного разгона и пр.

Сложность поставленных задач вызывает необходимость применения специальных способов пуска отдельно для двигателей с короткозамкнутым ротором и двигателей с контактными кольцами (фазным ротором).

Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Для двигателей с короткозамкнутым ротором различают прямой пуск и пуск при пониженном напряжении.

Прямой пуск осуществляется непосредственным включением обмотки статора двигателя в сеть трехфазного переменного тока с напряжением, равным номинальному напряжению обмотки статора двигателя.

Ограничения по применению прямого пуска АД обычно связаны с недопустимостью критического провала напряжения питающей сети и касаются допустимого соотношения между мощностью пускаемого АД и допустимой мощностью (резервом мощности) питающей его сети. Прямой пуск недопустим, если мощность АД составляет более 20% от резерва допустимой мощности сети.

Пуск при пониженном напряжении, подводимом к обмотке статора крупных двигателей, производится посредством:

- включения на время пуска активных сопротивлений в цепь статора;
- включения на время пуска индуктивных сопротивлений в цепь статора;
- включения статорной обмотки в сеть через автотрансформатор;
- переключения обмотки статора со «звезды» на «треугольник».

Кроме присущих каждому способу недостатков, **все схемы пуска асинхронных двигателей при пониженном напряжении имеют общий существенный недостаток: пусковой момент двигателя уменьшается до значения, пропорционального квадрату приложенного к статору напряжения.** Поэтому рассмотренные способы пуска можно применять лишь для двигателей с легкими условиями пуска.

Пуск асинхронных двигателей с фазным ротором

Для улучшения пусковых свойств АД с фазным ротором на время пуска с помощью контактных колец и щеток в цепь ротора включают пусковой реостат. К собственному (естественному) активному сопротивлению обмотки ротора R_{2e} при пуске добавляется активное сопротивление $R_{2п}$ пускового реостата. Как следует из анализа физических особенностей работы АД (см. п.4.1), это одновременно позволяет уменьшить начальный пусковой ток и увеличить (за счет увеличения пускового $\cos\psi_2$) начальный пусковой момент.

При таком способе пуска можно получить начальный пусковой момент равный максимальному (критическому) моменту АД, если в соответствии с (4.3.7) рассчитать сопротивление пускового реостата так, чтобы критическое скольжение было равно 1.

Благодаря рассмотренным выше возможностям двигателя с фазным ротором могут применяться при значительно более тяжелых условиях пуска, чем двигатели с короткозамкнутым ротором. Однако стоимость АД с фазным ротором выше чем у короткозамкнутых АД. Кроме того, из-за наличия контактных колец и щеточных устройств, АД с фазным ротором уступают короткозамкнутым АД по показателям надежности в эксплуатации.

Асинхронные короткозамкнутые двигатели с улучшенными пусковыми свойствами

Цепь ротора короткозамкнутого АД недоступна для включения в неё дополнительных устройств, подобно двигателю с фазным ротором. Однако пусковые характеристики двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора можно улучшить, если использовать для увеличения активного сопротивления обмотки ротора поверхностный эффект в стержнях обмотки, проявляющийся в начале пуска, когда частота тока в роторе $f_2 = s f_1$ близка к частоте сети f_1 .

Для увеличения активного сопротивления стержня при пусковых частотах высота стержня должна быть значительно больше его ширины. С этой целью изготавливаются АД, у которых короткозамкнутая обмотка имеет (см. рис. 4.5.1) либо прямоугольные стержни (1), либо стержни трапецеидального (2) или колбообразного (3) профиля, расположенные в глубоких пазах.

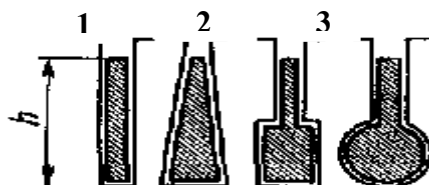


Рис. 4.5.1. Разновидности пазов ротора глубокопазных двигателей

В асинхронных двигателях с глубокими пазами на роторе высота стержней из алюминия составляет 40—60 мм, что позволяет получить при частоте 50 Гц 3—4-кратное увеличение активного сопротивления.

Общая картина поля рассеяния, образованного током стержня ротора, и распределение плотности тока по высоте стержня показана на рис. 4.5.2.

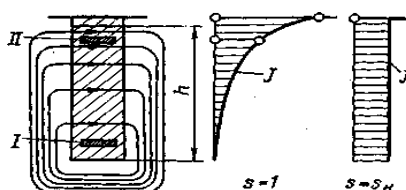


Рис. 4.5.2. Общая картина магнитного потока рассеяния и распределение плотности тока в стержне короткозамкнутой обмотки двигателя с глубокими пазами на роторе

Чем ближе ко дну паза расположен рассматриваемый элемент сечения стержня, тем большее число линий магнитного поля рассеяния с ним сцеплено. Элементы I, расположенные на дне паза, обладают максимальной индуктивностью рассеяния $L_{\sigma 2}$ элементы II, расположенные ближе к поверхности паза, — минимальной индуктивностью. Поэтому плотности тока в элементах зависят от положения элемента по высоте стержня и от скольжения. При больших скольжениях, когда индуктивное сопротивление $X_2 = 2\pi f_1 s L_{\sigma 2}$ играет преобладающую роль, в элементах, расположенных ближе к зазору и

обладающих меньшим индуктивным сопротивлением, плотность тока получается значительно большей (см. распределение плотности тока при $s = 1$). Наоборот, при номинальном скольжении $s_n \ll 1$ преобладающее значение имеет омическое сопротивление стержней, а их индуктивным сопротивлением можно пренебречь. В этом случае плотность тока во всех элементах сечения стержня устанавливается постоянной.

При скольжении s_n ток равномерно распределен по сечению стержня и активное сопротивление ротора $R_{2раб}$ не отличается от сопротивления для постоянного тока. При скольжении $s = 1$ ток протекает только по части сечения и общее активное сопротивление $R_{2пуск}$ ротора существенно увеличивается.

Для получения еще более высоких пусковых свойств изготавливаются АД с двойной беличьей клеткой, одна из которых (пусковая) располагается на поверхности, а другая (рабочая) – в глубине магнитопровода ротора.

Стержни пусковой (внешней) клетки делают обычно из материала с большим удельным сопротивлением (латунь или бронза), чем стержни внутренней, рабочей клетки. Стержни пусковой клетки имеют меньшее сечение, чем стержни рабочей клетки, что также обуславливает её большее активное сопротивление.

На рис.4.5.3 представлены формы механических характеристик упомянутых выше короткозамкнутых асинхронных двигателей с улучшенными пусковыми свойствами, в том числе двигателей с прямоугольными (позиция 3), трапецидальными (позиция 4), колбообразными (позиция 6) пазами и двойной беличьей клеткой (позиция 5).

Для сравнения показаны также естественные механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором (позиция 1) и АД с круглыми стержнями, расположенными в верхней части ротора (позиция 2).

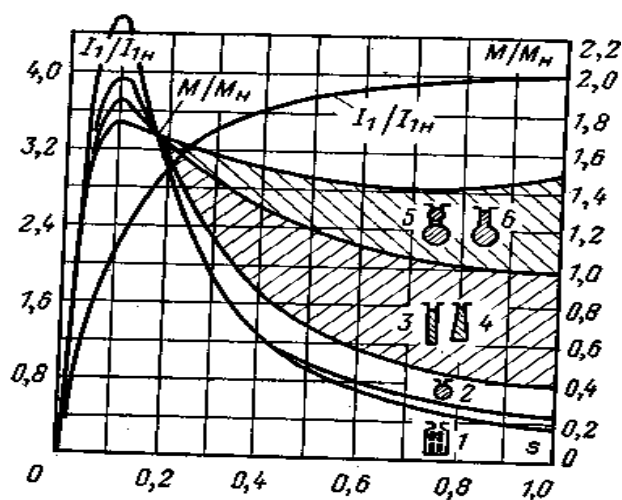


Рис. 4. 5.3. Механические характеристики короткозамкнутых асинхронных двигателей с улучшенными пусковыми свойствами

Штриховкой отмечены области, в пределах которых, в зависимости от конкретных особенностей обмотки ротора, располагаются механические

характеристики короткозамкнутых двигателей с улучшенными пусковыми свойствами.

Из анализа вида приведенных на рис. 4.5.3 механических характеристик АД можно сделать вывод о том, что наибольшей эффективностью с точки зрения улучшения пусковых свойств обладают АД с двойной беличьей клеткой и колбообразными пазами (заштрихованная зона 5—6 на рис. 4.5.3).

Более подробно материал по данной теме изложен в четвертой части учебного пособия [1] на с. 77-91. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 4.5.

1. О чем говорит показатель, называемый добротностью пуска?
2. Каким основным общим недостатком с точки зрения пусковых свойств обладают АД?
3. По каким причинам прямой пуск АД не всегда приемлем?
4. Какие схемы включения АД соответствуют пуску при пониженном напряжении питания?
5. Какой способ пуска АД имеет преимущество и почему: пуск с включением на время пуска активных сопротивлений в цепь статора или пуск с включением на время пуска активных сопротивлений в цепь ротора?
6. По какой причине способ пуска АД включением активных сопротивлений в цепь ротора не всегда реализуем?
7. Каким общим недостатком обладают способы пуска АД понижением на время пуска питающего напряжения?
8. В каком случае невозможно применить способ пуска АД переключением статорной обмотки со звезды на треугольник?
9. Какое физическое явление используется для улучшения пусковых свойств короткозамкнутых АД? Объясните механизм этого явления.
10. Почему при выполнении короткозамкнутой обмотки ротора АД из материала с повышенным удельным сопротивлением (латунь, бронза) пусковые свойства АД улучшаются? Какие отрицательные последствия связаны с применением указанного способа улучшения пусковых свойств АД?

Тема 4.6. Общие сведения о специальных конструкциях и специальных режимах работы асинхронных машин

Материал по данной теме подробно изложен в четвертой части учебного пособия [1] на с. 91-127. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 4.6.

1. Укажите ориентировочные сферы применения однофазных асинхронных двигателей (АД)?
2. Какие преимущества и недостатки однофазных АД при сравнении их с трехфазными?
3. Как объяснить, что однофазный АД, имеющий одну обмотку на статоре, не имеет пускового момента, однако раскрученный посторонней силой продолжает самостоятельно

вращаться в сторону «раскрутки», преодолевая момент сопротивления на валу.

4. Как устроен конденсаторный асинхронный двигатель?

5. Объясните принцип действия однофазных микродвигателей с экранированными полюсами. Как обеспечивается реверс таких микродвигателей?

6. Что собой представляют асинхронные исполнительные двигатели автоматических устройств? Чем они отличаются от однофазных АД общего применения? Какие специфические требования предъявляются к исполнительным двигателям, работающим в автоматических устройствах?

7. Расскажите об устройстве, принципе действия, областях применения, достоинствах и недостатках асинхронных тахогенераторов.

8. Расскажите об устройстве, принципе действия и областях применения вращающихся (поворотных) трансформаторов.

9. Расскажите об устройстве, принципе действия и областях применения сельсинов (на примере контактного сельсина).

10. Расскажите об устройстве, принципе действия, достоинствах и недостатках бесконтактного сельсина.

11. Изобразите схему соединения и принцип действия сельсинной пары в индикаторном режиме работы.

12. Изобразите схему соединения и принцип действия сельсинной пары в трансформаторном режиме работы.

13. Расскажите об особенностях устройства и принципа действия, областях применения, достоинствах и недостатках асинхронного двигателя с массивным ферромагнитным ротором.

14. Расскажите об особенностях устройства и принципа действия, областях применения, достоинствах и недостатках асинхронного двигателя с полым немагнитным ротором.

15. Расскажите об устройстве, принципе действия и областях применения винтовых и линейных электромагнитных индукционных насосов.

16. Расскажите об устройстве, принципе действия и областях применения линейного асинхронного двигателя.

17. Расскажите об устройстве, принципе действия, достоинствах и недостатках индукционного регулятора.

Раздел 5

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Тема 5.1. Устройство и физические основы функционирования синхронной машины в генераторном и двигательном режимах

Общие сведения

На рис. 5.1.1 изображены конструктивная (а) и электрическая (б) схемы синхронной электрической машины, которая является основным типом машин, предназначенных для получения промышленных многофазных систем электродвижущих сил и напряжений.

Синхронная машина содержит, как минимум две обмотки, способные перемещаться в пространстве относительно друг друга. При этом, одна из них образует систему возбуждения, питается постоянным током и служит для создания в рабочем зазоре электрической машины (ЭМ) основного магнитного поля. Вторая обмотка является силовой (якорной) и включается в многофазную электрическую сеть. Обычно обмотка возбуждения конструктивно располагается на вращающейся части (роторе), а якорная обмотка - на

неподвижной части (статоре) ЭМ.

На рисунке обозначены:

1 – магнитопровод статора; 2 – сердечник ротора с явно выраженными полюсами; 3 – паз статора; 4 – проводники обмотки возбуждения ротора; 5, 6 – контактные кольца и соприкасающиеся с ними электрические щетки; А-Х, В-У, С-З (на конструктивной схеме) – сечения активных проводников соответственно, фазы А, В и С обмотки статора, находящиеся в его пазах; N, S – «северный» и «южный» полюсы ротора; n_1 – частота вращения магнитного потока Φ , равная частоте вращения ротора n_2 ; U_B – напряжение возбуждения; I_B – ток возбуждения; U_1 – линейное напряжение трехфазной сети; I_a , E – ток и ЭДС фазы обмотки статора; А-Х, В-У, С-З (на электрической схеме) – соответственно, начала и концы фазных обмоток.

Таким образом, статор синхронной машины выполнен аналогично статору асинхронной машины, однако важным отличием синхронной машины от асинхронной является то, что главный магнитный поток в ней создается постоянным током системы возбуждения I_B , который машина получает от отдельного источника U_B , т. е. в машине имеет место отдельное питание обмоток статора и ротора.

Магнитное поле ротора при его вращении пересекает витки обмотки статора (якоря) индуцируя в ней электродвижущую силу (ЭДС).

Как известно, в электротехнике временной сдвиг между синусоидальными величинами заменяют угловым сдвигом между их векторными изображениями. При этом за период T действия (повторения) электрической синусоидальной величины принимают угол, равный 2π электрических радиан или 360 электрических градусов.

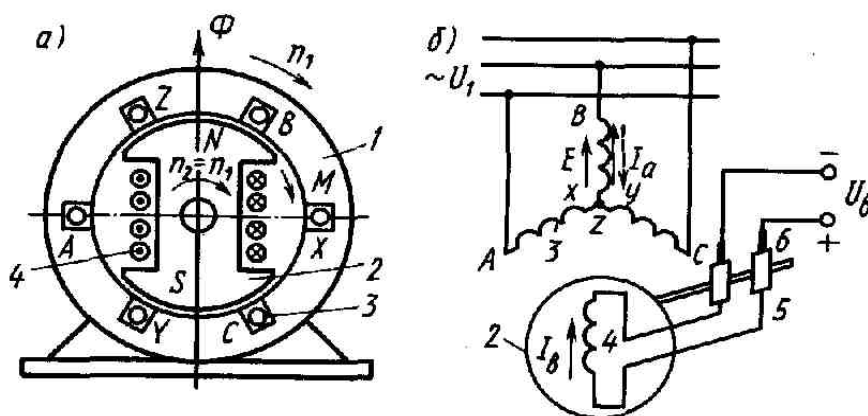


Рис. 5.1.1. Конструктивная (а) и электрическая (б) схемы синхронной электрической машины

Для получения m -фазной симметричной системы ЭДС необходимо, чтобы якорная (статорная) обмотка состояла из системы m одинаковых (симметричных) фазных обмоток, оси которых сдвинуты в пространстве (по окружности статора) на угол $360/m$ электрических градусов. В наиболее распространенном случае, когда число фаз m обмотки якоря равно трем, этот

угол равен **120** электрическим градусам.

Реальный пространственный (геометрический) угол сдвига осей фазных обмоток якоря ЭМ по окружности статора определяется следующим соотношением:

$$\alpha \text{ ф.геом} = 360/m \text{ p (градусов)} \quad (5.1.1)$$

или:

$$\alpha \text{ ф.геом} = 2\pi /m \text{ p (радиан)} \quad (5.1.2)$$

где: **p** – число пар полюсов, на которые выполнена каждая фаза статорной (якорной) обмотки;

m - число фаз обмотки якоря.

Если при этом обеспечить в рабочем зазоре ЭМ синусоидальную форму распределения основного магнитного потока, создаваемого системой возбуждения и пронизывающего витки якорной обмотки, то при вращении ротора в соответствующих фазах обмотки статора ЭМ будут наводиться синусоидальные ЭДС, сдвинутые относительно друг друга во времени на электрический угол равный Γ/m электрических градусов.

В простейшем случае, когда ЭМ имеет одну пару полюсов, пространственный (геометрический) угол поворота оси ротора (индуктора) относительно статора численно равен электрическому углу сдвига фазных ЭДС E_1, E_2 и E_3 , наводимых полем индуктора в якорной обмотке статора (рис. 5.1.2).

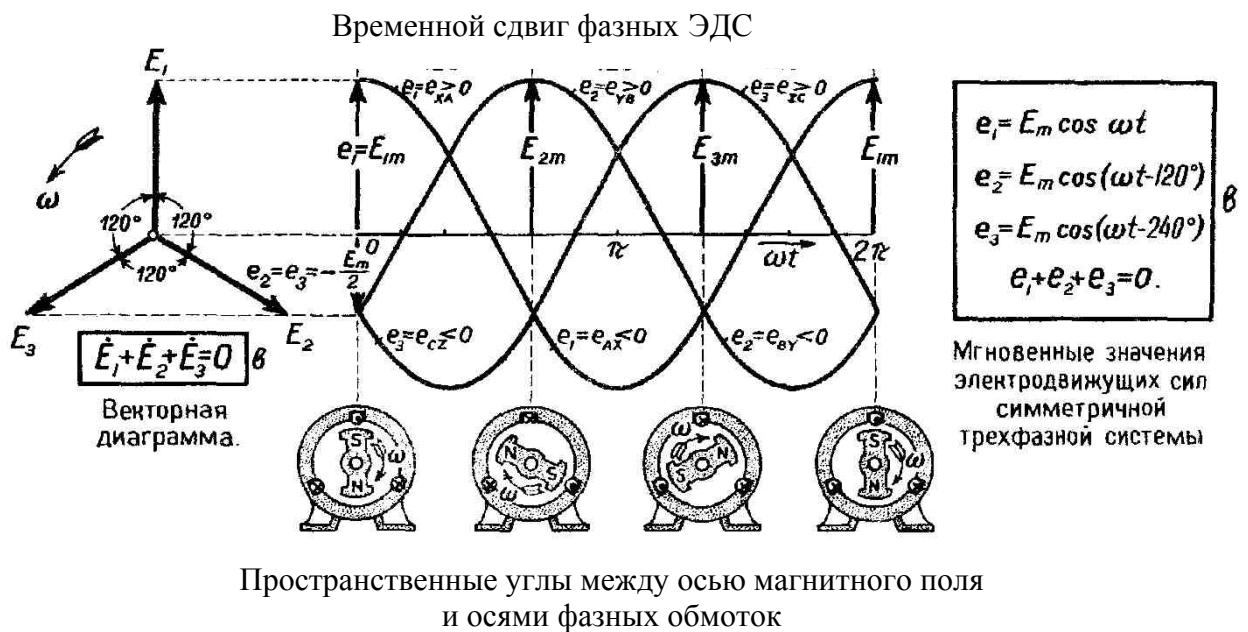


Рис. 5.1.2. Пространственный (геометрический) угол поворота оси ротора (индуктора) относительно осей фазных обмоток статора (якоря) и соответствующий ему электрический (временной) угол сдвига фазных ЭДС e_1, e_2 и e_3 , наводимых полем индуктора в якорной обмотке статора 2-х полюсной синхронной машины

Если число пар полюсов p ЭМ не равно единице, то за время полного оборота ротора вокруг своей оси одноименные полюса ротора p раз пересекут оси каждой фазы обмотки статора. Следовательно, **геометрический угол $\alpha_{\text{геом}}$ поворота ротора в p раз меньше, чем электрический угол $\alpha_{\text{эл}}$ сдвига фазных ЭДС, наводимых полем ротора в якорных обмотках статора, т.е.**

$$\alpha_{\text{рот}} = \alpha_{\text{эдс}} / p \quad (5.1.3)$$

или

$$\alpha_{\text{геом}} = \alpha_{\text{эл}} / p \quad (5.1.4)$$

Физически период T повторения синусоидальной величины характеризуется отрезком времени, в течение которого ось полюсов ротора пройдет расстояние, равное двойному полюсному делению 2τ .

Если измерить это расстояние пространственным углом (в градусах или радианах) то:

$$2\tau = 360 / p \quad (5.1.5)$$

$$2\tau = 2\pi / p$$

В соответствии с приведенным выше определением периода

$$T = 2\tau / \omega = 2\pi / p\omega \quad (5.1.6)$$

где: ω - угловая скорость ротора (рад/с).

Частота f повторения значения периодической функции (в нашем случае ЭДС якоря) является величиной, обратной значению периода, т.е.

$$f = 1/T = p\omega / 2\pi \quad (5.1.7)$$

Из (5.1.7) следует, что частота ЭДС, индуцируемой в каждой фазе якорной обмотки, прямо пропорциональна числу пар полюсов и угловой скорости индуктора.

Если вращение ротора характеризуется не угловой скоростью ω (рад/с), а частотой вращения n (об/мин), то выражение (5.1.7) с учетом соотношения

$$\omega = 2\pi n / 60 \quad (5.1.8)$$

принимает следующий вид:

$$f = 1/T = pn / 60 \quad (5.1.9)$$

При подключении обмотки статора к какой-либо нагрузке в ней протекает многофазный ток, который создает магнитное поле, вращающееся в рабочем зазоре со скоростью $n_1 = (60f_1) / p$.

Из приведенных выше выражений следует, что $n_1 = n$, т. е. магнитное поле

статора и ротор вращаются с одинаковой скоростью, то есть синхронно, на основании чего и возникло название синхронной машины.

Таким образом, **синхронная машина имеет следующие особенности:**

- **основное магнитное поле в рабочем зазоре СМ создается постоянным током, подводимым от внешнего источника к расположенной на роторе обмотке возбуждения, или расположенными на роторе постоянными магнитами;**

- **ротор (индуктор) СМ вращается с синхронной скоростью и индуцирует в обмотке статора ЭДС, частота изменения которой пропорциональна скорости вращения ротора и числу пар полюсов СМ;**

- **ток нагрузки СМ (ток якоря) создает магнитное поле, вращающееся относительно статора с синхронной скоростью и неподвижное относительно ротора;**

- **МДС якоря и индуктора (ротора) создают в рабочем зазоре СМ результирующее магнитное поле, также вращающееся с синхронной скоростью;**

- **в установившемся режиме СМ в обмотке ротора ЭДС не индуцируется.**

Режимы работы синхронной машины

Синхронная машина может работать в качестве автономного генератора, питающего подключенную к ней автономную нагрузку, а так же подключаться параллельно к сети, к которой присоединены общая нагрузка и другие синхронные генераторы. При работе параллельно с сетью СМ может отдавать или потреблять электрическую энергию, т.е. работать генератором или двигателем.

В результате взаимодействия неподвижных относительно друг друга магнитных полей ротора и статора создается поток электромагнитной энергии (электромагнитная мощность), который направлен от статора к ротору при работе СМ в двигательном режиме и от ротора к статору при работе СМ в генераторном режиме.

Электромагнитные силы взаимодействия магнитных полей статора и ротора играют роль своеобразной упругой связи между ротором и полем статора. Их можно сравнить с пружинами (упругими связями), связывающими два вала А и В, причем, в зависимости от режима работы СМ ведущий и ведомый валы меняются ролями.

Вал А изображает в такой модели возбужденный ротор, вал В – поле статора. Так как магнитные полюсы ротора гибко связаны с вращающимися полюсами статора то при параллельной работе синхронной машины с сетью скорость вращения её вала жестко связана со скоростью вращения поля статора: **изменение знака и величины момента на валу машины меняет лишь знак и величину угла между осями ротора и магнитного поля статора (рис. 5.1.3).**

На рис. 5.1.3а упругая связь не работает, поэтому нет передачи энергии между валами (режим идеального холостого хода СМ); на рис. 5.1.3б упругие связи смещены в сторону вращения вала В, поэтому происходит передача энергии от вала В к валу А (генераторный режим СМ), на рис. 5.1.3 в упругие связи смещены в обратную сторону, поэтому происходит обратная передача энергии (двигательный режим).

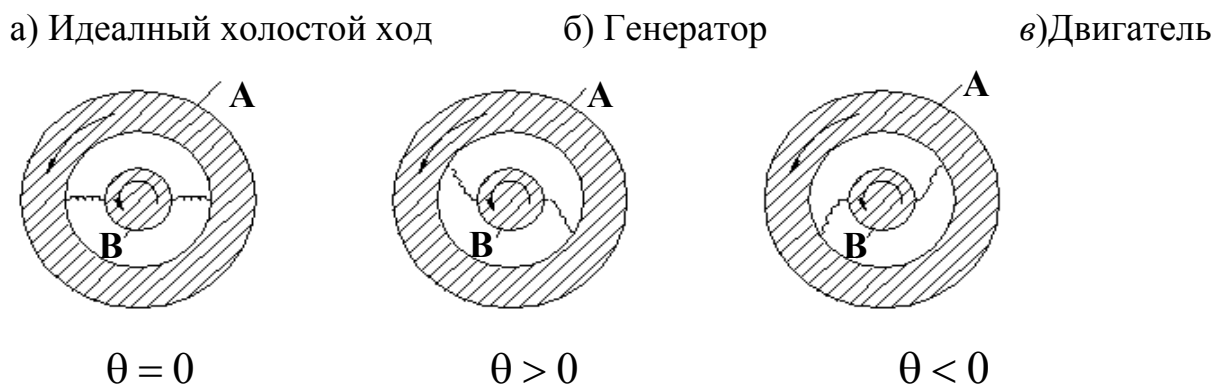


Рис. 5.1.3. Механическая модель взаимодействия ротора СМ с магнитным полем статора

Указанное взаимодействие между магнитными полями ротора и статора и связанные с этим изменения режимов работы СМ можно продемонстрировать следующим образом с помощью упрощенных векторных диаграмм, соответствующих параллельной работе СМ с сетью (рис.5.1.4)

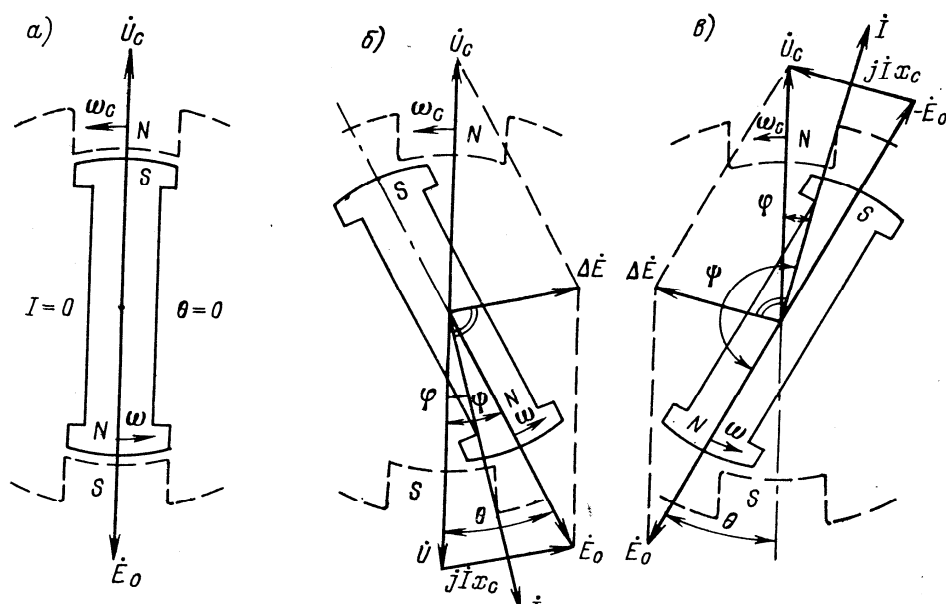


Рис. 5.1.4. Упрощенные векторные диаграммы для режима идеального холостого хода (а), генераторного (б) и двигательного (в) режимов работы СМ

Угловая скорость ω_1 магнитного потока статора и вектора напряжения U_c

зависит от частоты сети f_c . Поэтому условно можно считать, что вектор \underline{U}_c совпадает с осью потока статора и вращается с ним синхронно. Аналогично можно считать, что вектор ЭДС \underline{E}_0 совпадает с осью роторного полюса, так как их угловая скорость со зависит только от частоты вращения первичного двигателя n .

Режиму идеального холостого хода синхронного генератора соответствует векторная диаграмма, изображенная на рис. 5.1.4а.

Если путем увеличения вращающего момента приводного двигателя (дизеля, турбины и т.п.) сдвинуть ротор, а следовательно и вектор \underline{E}_0 , на угол θ в сторону вращения (см. рис. 5.1.4б), то вследствие появившейся результирующей ЭДС $\underline{\Delta E} = \underline{E}_0 - \underline{U}_c$ в обмотке статора возникнет ток \underline{I} , который будет отставать от ЭДС $\underline{\Delta E}$ на угол $\pi/2$, так как сопротивление статорной обмотки можно считать чисто индуктивным. При этом электромагнитная мощность, развиваемая синхронной машиной и определяемая соотношением $P_{эм} = mE_0I \cos\psi$, становится больше нуля (поток энергии направлен от машины к сети), что является признаком перехода СМ в генераторный режим с передачей энергии от приводного двигателя через вал СМ в сеть.

Если, путем создания на валу СМ тормозного момента, сдвинуть ротор, а следовательно и вектор \underline{E}_0 на угол θ в сторону отставания (рис. 5.1.4в), то результирующая ЭДС $\underline{\Delta E} = \underline{E}_0 - \underline{U}_c$ будет создавать ток статора \underline{I} , который по-прежнему отстает от $\underline{\Delta E}$ на угол $\pi/2$, а от ЭДС \underline{E}_0 — на угол $\psi > \pi/2$.

При этом электромагнитная мощность, развиваемая синхронной машиной и определяемая соотношением $P_{эм} = mE_0I \cos\psi$, становится отрицательной (поток энергии направлен от сети к машине), что является признаком перехода СМ в двигательный режим с передачей энергии из сети через вал СМ приводимому механизму.

Изменение одного лишь тока возбуждения СМ вызывает изменение лишь модуля вектора ЭДС \underline{E}_0 , не изменяя его положения относительно вектора \underline{U}_c (см. рис.5.1.5).

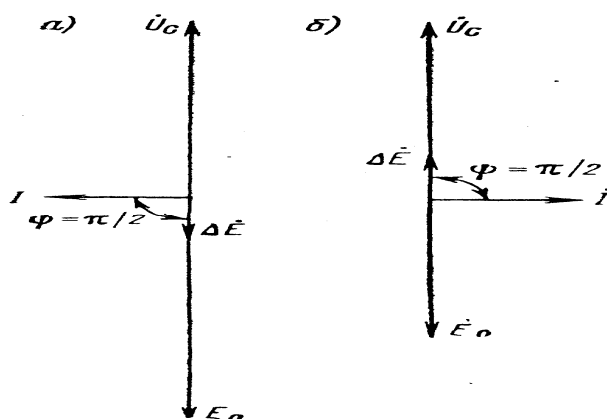


Рис. 5.1.5. Упрощенные векторные диаграммы для компенсаторного режима работы синхронной машины

При увеличении тока возбуждения результирующая ЭДС $\underline{\Delta E} = \underline{E}_0 - \underline{U}_c$ создает чисто реактивный ток: **чисто индуктивный по отношению к генератору** (отстаёт на $\pi/2$ от вектора \underline{E}_0) и **чисто емкостный по отношению к сети** (опережает на $\pi/2$ вектор \underline{U}_c) (рис. 5.1.5а).

Уменьшение тока возбуждения СМ также приводит к появлению лишь реактивного тока якоря: **чисто емкостного по отношению к генератору** (опережает на $\pi/2$ вектор \underline{E}_0) и **чисто индуктивного по отношению к сети** (отстаёт на $\pi/2$ от вектора \underline{U}_c) (рис. 5.1.5б).

И в том, и в другом случае активная электромагнитная мощность $P_{эм} = mE_0I \cos\psi$ равна нулю, а режим работы СМ называется компенсаторным.

Таким образом, для перевода синхронной машины, включенной в сеть, из режима холостого хода в генераторный режим необходимо увеличить вращающий момент первичного (приводного) двигателя, а для перевода в двигательный режим — создать на валу СМ тормозной момент.

Изменение одного лишь тока возбуждения синхронной машины не может вызвать изменения активной мощности СМ, а лишь вызывает изменение реактивного тока и реактивной мощности (компенсаторный режим работы).

Более подробно материал по данной теме изложен в третьей (с. 5-9) и пятой (с. 4-10) части учебного пособия [1]. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 5.1.

1. Что собой представляет устройство для создания промышленных многофазных систем ЭДС и электрических напряжений?
2. Как осуществляется переход от временного сдвига между синусоидальными электрическими величинами к угловому сдвигу между их векторными изображениями?
3. Какая связь существует между пространственным (геометрическим) углом сдвига осей фазных обмоток статора синхронной машины и электрическими углами сдвига фазных ЭДС E_1 , E_2 и E_3 , наводимых полем индуктора в якорной обмотке статора?
4. В каком случае пространственный (геометрический) угол поворота оси ротора (индуктора) синхронной машины относительно статора численно равен электрическому углу сдвига фазных ЭДС E_1 , E_2 и E_3 , наводимых полем индуктора в якорной обмотке статора?
5. Как связаны период повторения фазных синусоидальных ЭДС и расстояние по окружности рабочего зазора синхронной машины между осями соседних полюсов?
6. Какие существуют способы изменения частоты ЭДС, индуцируемой в каждой фазе якорной обмотки синхронной машины?
7. Дайте общее описание устройства и принципа действия синхронной машины в генераторном и двигательном режиме.
8. Назовите принципиальные конструктивные отличия явнополюсных (ЯП) и неявнополюсных (НЯП) синхронных машин.
9. Каким образом устроены системы возбуждения СМ?
10. Как устроены бесщеточные СМ?
11. Как изображаются на схемах и как маркируются обмотки СМ?

5.2. Математическое описание установившихся процессов в электрических цепях синхронной машины

Реакция якоря синхронной машины

В синхронной машине, в отличие от асинхронной машины и трансформатора, естественное взаимодействие (саморегулирование) цепи возбуждения и цепи якоря при изменении тока якоря отсутствует. Следовательно, МДС якорной обмотки вызывает изменение величины магнитного потока машины, и ее ЭДС.

В режиме генератора при активной нагрузке (вектор \underline{E}_0 совпадает по фазе с вектором тока якоря \underline{I}) ток в фазе статора достигает максимума в тот момент, когда с осью данной фазы совпадает середина полюса (см. рис 5.2.1а).

Поле статора будет в этом случае поперечным по отношению к оси полюсов ротора, то есть ось полюсов ротора будет перпендикулярна к оси поля статора – у набегающего конца полюса оно направлено против поля ротора и ослабляет это поле, а у сбегающего конца поля оно усиливает поле ротора.

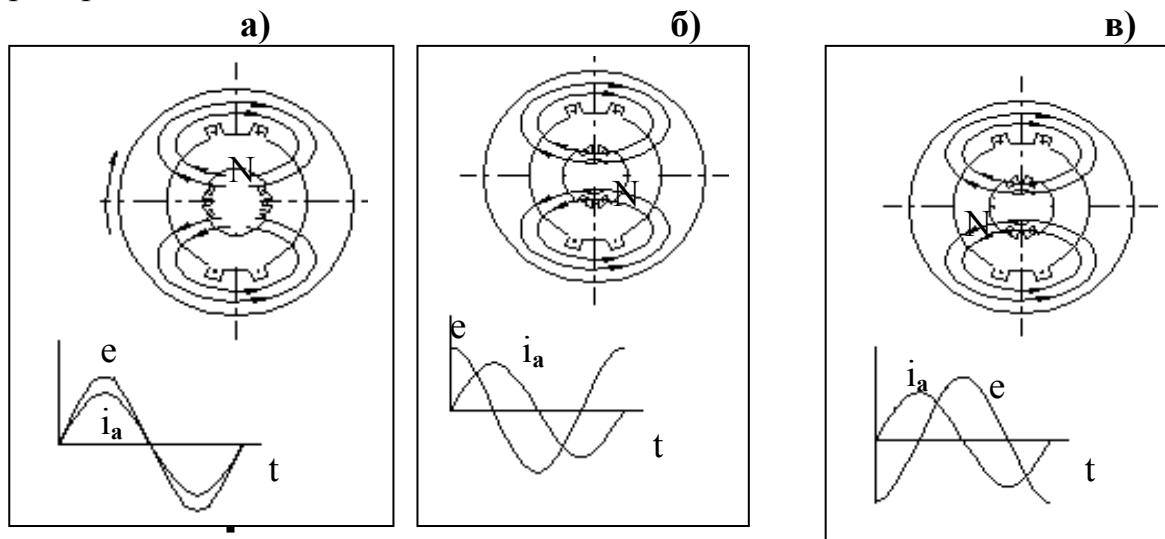


Рис. 5.2.1. Реакция якоря и кривые распределения индукций в неявнополюсной машине при различном характере тока якоря: активном (а), индуктивном (б), емкостном (в)

Результирующий поток при этом несколько уменьшается вследствие влияния насыщения, так как он ослабляется у набегающего конца полюса больше, чем усиливается у сбегающего.

В идеальном случае чисто индуктивной нагрузки генератора (см. рис. 5.2.1б) величина тока в фазе статора будет достигать своего максимального значения только тогда, когда соответствующий полюс ротора уйдет вперед на 90 градусов и поток, создаваемый обмоткой якоря будет направлен вдоль оси полюса ротора навстречу потоку ротора. То есть, при чисто индуктивном характере нагрузки **СМ МДС якоря является продольной размагничивающей.**

В идеальном случае чисто емкостной нагрузки генератора (5.2.1в) ток статора будет достигать максимума тогда, когда ось полюса ротора будет находиться на расстоянии 90° от оси соответствующей фазы статора в сторону отставания и поток, создаваемый обмоткой якоря будет направлен вдоль оси полюса ротора согласно с потоком ротора.. То есть, при чисто емкостном характере нагрузки СМ МДС якоря является продольной подмагничивающей.

По этой причине в синхронных машинах реактивную составляющую тока якоря часто называют продольной, а активную – поперечной.

В явнополюсных синхронных машинах (см. рис 5.2.2а) рабочий зазор по поперечной оси резко увеличивается по сравнению с зазором по продольной оси. Поэтому, МДС якоря одной и той же величины в явнополюсной синхронной машине может создавать сильно отличающиеся друг от друга магнитные потоки реакции якоря в зависимости от характера тока якоря. Это связано с тем, что от характера тока якоря зависит положение оси МДС, создаваемой этим током, а следовательно и величина магнитного сопротивления для потока реакции якоря (для поперечного положения оси МДС якоря магнитное сопротивление максимально, для продольного – минимально).

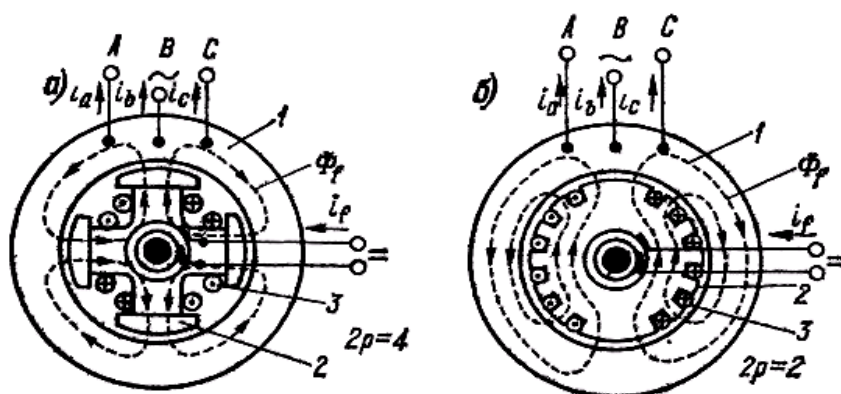


Рис. 5.2.2. Конструктивная схема явнополюсной (а) и неявнополюсной (б) синхронной машины: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – проводники обмотки возбуждения; i_f – ток возбуждения; Φ_f – магнитный поток, созданный обмоткой возбуждения; А-Б-С – внешние выводы обмотки статора (якоря); i_a , i_b , i_c – токи отдельных фаз обмотки статора (якоря)

Для синхронных машин с неявнополюсным ротором (см. рис 5.2.2б) нет необходимости выделять продольные и поперечные составляющие тока и МДС якоря, так как в такой машине рабочий зазор по всей поверхности ротора неизменный и величина магнитного потока реакции якоря не зависит от положения оси МДС якоря относительно оси полюсов ротора.

Чтобы ослабить влияние продольной реакции якоря необходимо увеличивать магнитное сопротивление по продольной оси за счет увеличения воздушного зазора под наконечниками полюсов. Однако, подобное решение требует существенного увеличения номинальной МДС обмотки

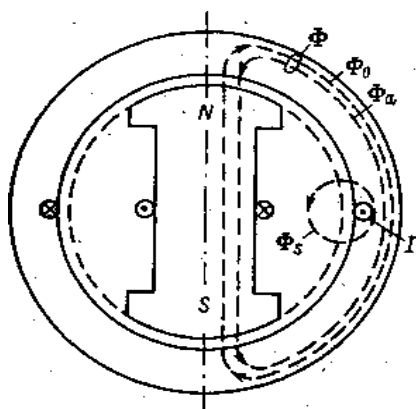
возбуждения, что увеличивает массогабаритные показатели и стоимость машины.

Уравнения электрического равновесия и векторные диаграммы якорной цепи синхронной машины

Уравнения электрического равновесия и векторные диаграммы якорных цепей неявнополюсных и явнополюсных синхронных машин, с учетом рассмотренных выше особенностей, будут существенно отличаться друг от друга.

В режиме холостого хода МДС ротора F_0 создает поток возбуждения Φ_0 (см. рис. 5.2.3), который наводит в обмотке статора генератора ЭДС E_0 . Выходное напряжение обмотки статора (якоря) в режиме холостого хода равно ЭДС, то есть $U = U_{xx} = E_0$.

Ток статора (якоря) I нагруженного **неявнополюсного синхронного генератора** создает поток реакции якоря Φ_a и поток рассеяния Φ_s . Эти потоки наводят в статорной обмотке ЭДС реакции якоря E_a и ЭДС рассеяния E_s , которые, таким образом, пропорциональны току статора (якоря) I .



Коэффициенты пропорциональности между током якоря и указанными ЭДС имеют размерность сопротивлений и носят название индуктивных сопротивлений статора (якоря).

Рис. 5.2.3. Магнитные потоки нагруженной синхронной машины

Так как векторы ЭДС \underline{E}_a и \underline{E}_s отстают от вектора потока и вектора тока на угол $\pi/2$, то в векторной форме можно записать

$$\underline{E}_a = -jI x_a; \quad E_s = -jI x_s \quad . \quad (5.2.1)$$

где: x_a — индуктивное сопротивление реакции якоря; x_s — индуктивное сопротивление рассеяния якоря.

Индуктивные сопротивления x_a и x_s пропорциональны магнитным проводимостям для потоков Φ_a и Φ_s . На пути потока Φ_a имеется только воздушный зазор между статором и полюсами ротора (рис. 5.2.3). Поток же Φ_s почти целиком замыкается по воздуху. Поэтому $x_a > x_s$. ЭДС E_a и E_s можно рассматривать как ЭДС, которые тратятся на обеспечение протекания тока якоря через индуктивных сопротивления x_a и x_s .

Так как статорная (якорная) обмотка обладает еще и активным сопротивлением r_a , то выражение для падения напряжения, которое тратится на обеспечение протекания тока якоря через него, можно записать

$$\underline{U}_r = -\underline{I}r \quad (5.2.2)$$

В соответствии с изложенным выше уравнение электрического равновесия якорной цепи неявнополюсного синхронного генератора выглядит следующим образом:

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + \underline{E}_a + \underline{E}_s - \underline{I}r \quad (5.2.3)$$

или, с учетом (5.2.1) и (5.2.2),

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - j\underline{I}x_a - j\underline{I}x_s - \underline{I}r \quad (5.2.4)$$

При изменении характера тока нагрузки явнополюсного синхронного генератора изменяется положение оси МДС реакции якоря относительно полюсов ротора. Поэтому изменяется величина воздушного зазора и, следовательно, величина магнитного сопротивления на пути магнитного потока реакции якоря, вследствие чего нарушается пропорциональность между током якоря и ЭДС реакции якоря.

Следовательно, для явнополюсной синхронной машины, в отличие от неявнополюсной, не существует единственного фиксированного значения индуктивного сопротивления реакции якоря (такого, как x_a для неявнополюсной СМ).

Для того, чтобы обойти указанную выше трудность, реакцию якоря явнополюсного синхронного генератора рассматривают как действие двух реакций: продольную от реактивной составляющей тока якоря и поперечную от активной составляющей тока якоря. При этом, в соответствии с рассмотренными выше свойствами синхронной машины, реактивная составляющая тока якоря I_d создает МДС F_{ad} и поток Φ_{ad} реакции якоря, направленные по продольной оси полюсов ротора, а активная составляющая тока якоря I_q создает МДС F_{aq} и поток Φ_{aq} реакции якоря, направленные по поперечной оси полюсов ротора (см. рис. 5.2.1).

Продольный Φ_{ad} и поперечный Φ_{aq} потоки реакции якоря наводят в статоре продольную E_{ad} и поперечную E_{aq} ЭДС реакции якоря, которые пропорциональны соответственно токам I_d и I_q .

Зависимость этих ЭДС от токов в векторной форме выразится следующим образом:

$$\underline{E}_{ad} = -j\underline{I}_d x_{ad}; \quad \underline{E}_{aq} = -j\underline{I}_q x_{aq} \quad (5.2.5)$$

где x_{ad} и x_{aq} — соответственно продольное и поперечное индуктивное сопротивление реакции якоря синхронной машины.

Так как магнитная проводимость для потока Φ_{ad} по продольной оси значительно больше, чем для потока Φ_{aq} по поперечной оси, то: x_{ad} всегда больше, чем x_{aq} ($x_{ad} \gg x_{aq}$).

ЭДС рассеяния якоря и падение напряжения на активном сопротивлении якоря создаются полным током якоря, поэтому, также как и в неявнополюсном генераторе: $\underline{E}_s = -j\underline{I}x_s$; $\underline{U}_r = -\underline{I}r$.

В соответствии с изложенным, уравнение электрического равновесия

якорной цепи явнополюсного синхронного генератора выглядит следующим образом:

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + \underline{E}_{ad} + \underline{E}_{aq} + \underline{E}_s - \underline{I}r \quad (5.2.6)$$

или, с учетом (5.2.5):

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - j\underline{I}_d x_{ad} - j\underline{I}_q x_{aq} - j\underline{I}x_s - \underline{I}r \quad (5.2.7)$$

Векторные диаграммы цепи якоря ненасыщенной синхронной машины, соответствующие уравнениям (5.2.4) и (5.2.6) представлены на рис. 5.2.4.

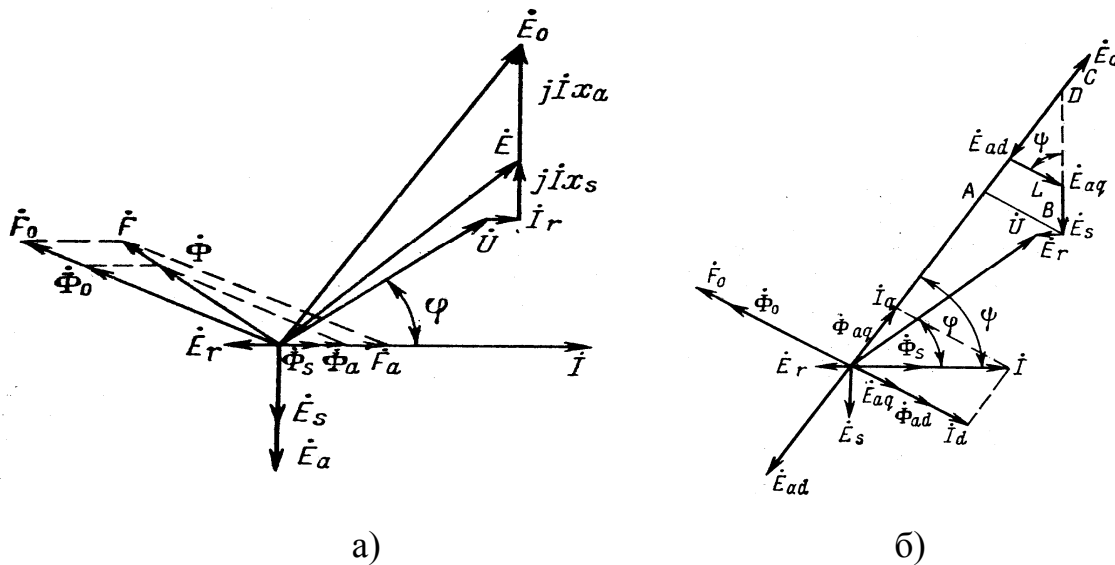


Рис. 5.2.4. Векторные диаграммы неявнополюсной (а) и явнополюсной (б) синхронной машины

Если пренебречь величиной активного сопротивления якорной цепи, что допустимо для синхронных машин средней и большой мощности (у которых $r \ll x_a + x_s$, то можно получить упрощенные уравнения электрического равновесия и векторные диаграммы цепи якоря синхронной машины, представленные на рис. 5.2.5.

На векторной диаграмме ненасыщенного неявнополюсного синхронного генератора (см. рис. 5.2.5а) параметр x_c называется синхронным индуктивным сопротивлением якоря, при этом

$$x_c = x_a + x_s \quad (5.2.8)$$

На векторной диаграмме ненасыщенного явнополюсного синхронного генератора (см. рис. 5.2.5б)

$$x_d = x_{ad} + x_s \quad ; \quad (5.2.9)$$

$$x_q = x_{aq} + x_s \quad ; \quad (5.2.10)$$

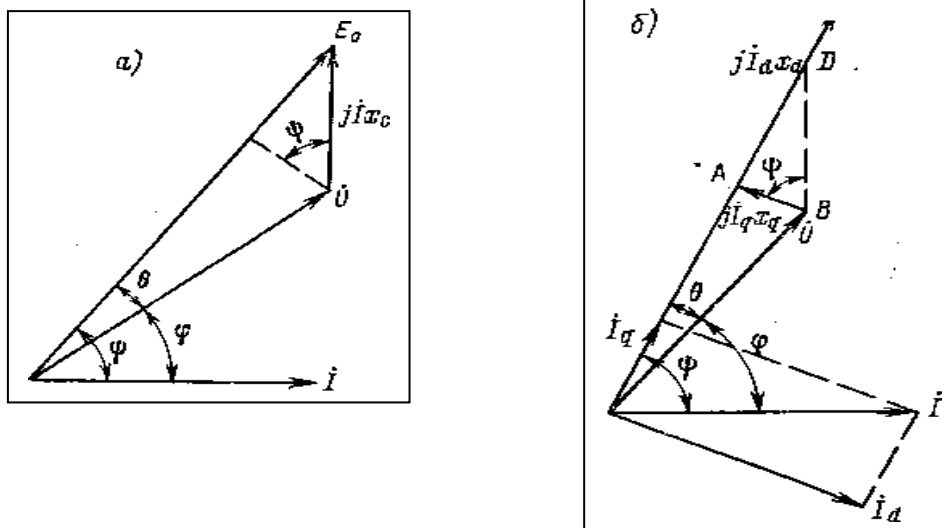


Рис. 5.2.5. Упрощенные векторные диаграммы цепи якоря неявнополюсной (а) и явнополюсной синхронной машины

Уравнения электромагнитной мощности и электромагнитного момента (угловые характеристики) синхронной машины.

КПД крупных синхронных машин мощностью от 100 кВт и выше находится в пределах от 0,91 – 0,98. Поэтому при рассмотрении вопроса об уравнениях электромагнитной мощности и электромагнитного момента синхронного генератора без заметной погрешности можно пренебречь потерями энергии в стали (в магнитопроводе) и меди (проводе) статора и считать, что электромагнитная мощность P_ψ генератора приблизительно равна полезной мощности P_2 отдаваемой генератором в сеть, т.е.

$$P_\psi = P_2 = mUI \cos\varphi \quad (5.2.11)$$

Из упрощенной векторной диаграммы явнополюсного синхронного генератора (см. рис. 5.2.5б) имеем

$$\begin{aligned} P_\psi &= mUI \cos\varphi = mUI \cos(\psi - \theta) = mUI \cos\psi \cos\theta + mUI \sin\psi \sin\theta = \\ &= mUI_q \cos\theta + m U I_d \sin\theta \quad (5.2.12) \end{aligned}$$

Кроме того, из той же векторной диаграммы следует:

$$U \sin\theta = I_q x_q \quad ; \quad (5.2.13)$$

$$E_0 - U \cos\theta = I_d x_d \quad . \quad (5.2.14)$$

Подставив полученные из (5.2.13) и (5.2.14) значения I_q и I_d в выражение (5.2.12), получим **уравнение электромагнитной мощности явнополюсной синхронной машины**

$$P_{\psi} = \frac{mUE_0}{x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left[\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right] \sin 2\theta = P_{\theta} + P_{2\theta} \quad (5.2.15)$$

И уравнение электромагнитного момента **явнополюсной синхронной машины**:

$$M_{\psi} = \frac{P_{\psi}}{\omega_c} = \frac{mUE_0}{\omega_c x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\omega_c} \left[\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right] \sin 2\theta = M_{\theta} + M_{2\theta} \quad (5.2.16)$$

Электромагнитная мощность P_{ψ} и электромагнитный момент M_{ψ} явнополюсной синхронной машины складываются из основной составляющей P_{θ} и M_{θ} и явнополюсной (реактивной) составляющей $P_{2\theta}$ и $M_{2\theta}$.

Для неявнополюсных машин $x_d = x_q = x_c$, поэтому $P_{2\theta} = M_{2\theta} = 0$ и уравнения электромагнитной мощности и электромагнитного момента в соответствии с (5.2.15) и (5.2.16) будут иметь следующий вид:

$$P_{\psi} = P_{\theta} = \frac{mUE_0}{x_c} \sin \theta; \quad M_{\psi} = M_{\theta} = \frac{m}{\omega_c} \frac{UE_0}{x_c} \sin \theta.$$

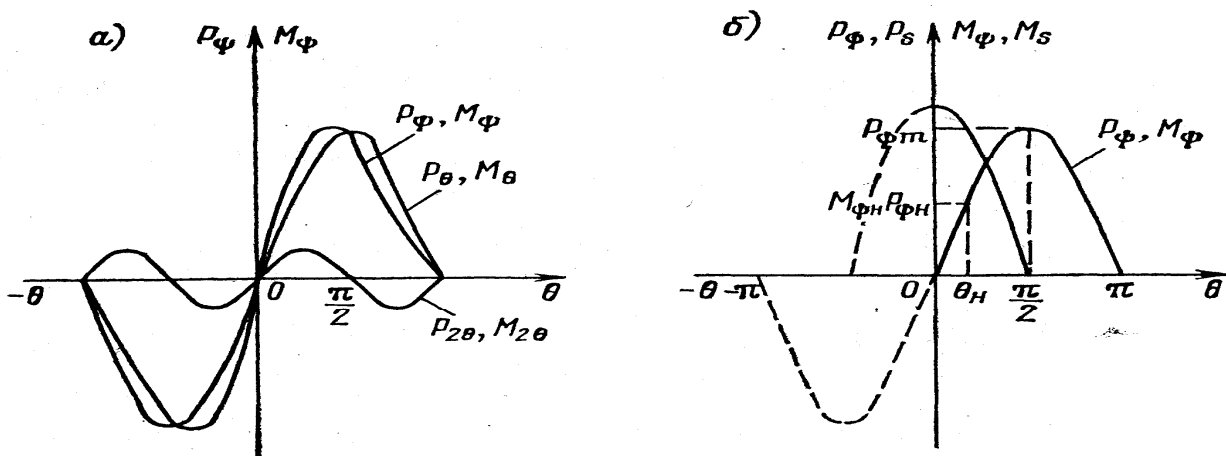


Рис. 5.2.6. Угловые характеристики явнополюсной (а) и неявнополюсной (б) синхронной машины

Зависимости $P_{\psi} = f(\theta)$ и $M_{\psi} = f(\theta)$ при $U = \text{const}$, $i_b = \text{const}$ и $f = \text{const}$ представляют собой угловые характеристики явнополюсной (см. рис. 5.2.6а) и неявнополюсной (рис. 5.2.6б) синхронной машины. При $\theta > 0$ имеем генераторный режим, при $\theta < 0$ — двигательный режим синхронной машины.

Более подробно материал по данной теме изложен в пятой части учебного пособия [1] на с. 10-18. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 5.2.

1. Назовите принципиальные отличия электрических параметров явнополюсных (ЯП) и неявнополюсных (НЯП) синхронных машин (СМ).
2. Чем отличается реакция якоря СМ при различном характере якорного тока?

3. С какой целью в теории СМ производят разложение МДС якорной обмотки на составляющие по продольной и поперечной оси?
4. Почему теория «двух реакций» имеет отношение только лишь к ЯПСМ?
5. Какой физический смысл имеет термин: «поперечная составляющая тока якоря СМ»?
6. Какой физический смысл имеет термин: «продольная составляющая тока якоря СМ»?
7. Объясните физическую сущность и правомерность применения метода скольжения при определении индуктивных сопротивлений ЯП СМ.
8. Объясните физическую сущность и правомерность применения метода холостого хода и короткого замыкания при определении индуктивных сопротивлений ЯП СМ.
9. Изобразите один из вариантов электрической схемы замещения НЯП СМ и соответствующую ей систему уравнений электрического равновесия якорной цепи.
10. Изобразите один из вариантов электрической схемы замещения ЯП СМ и соответствующую ей систему уравнений электрического равновесия якорной цепи.
11. Изобразите векторную диаграмму ненасыщенной и насыщенной НЯП СМ для базового вектора E_0 .
12. Изобразите векторную диаграмму ненасыщенной и насыщенной НЯП СМ для базового вектора U_a .
13. Изобразите векторную диаграмму ЯП СМ для базового вектора E_0 .
14. Изобразите векторную диаграмму ЯП СМ для базового вектора U_a .
15. Напишите уравнение зависимости электромагнитной мощности и электромагнитного момента от угла нагрузки (уравнение угловой характеристики) для НЯ и ЯП СМ?
16. В чем принципиальная разница зависимостей электромагнитной мощности и электромагнитного момента от угла нагрузки (угловой характеристики) для НЯ и ЯП СМ?

5.3. Эксплуатационные режимы и характеристики синхронных машин

5.3.1. Эксплуатационные режимы и характеристики синхронных генераторов

Характеристика холостого хода

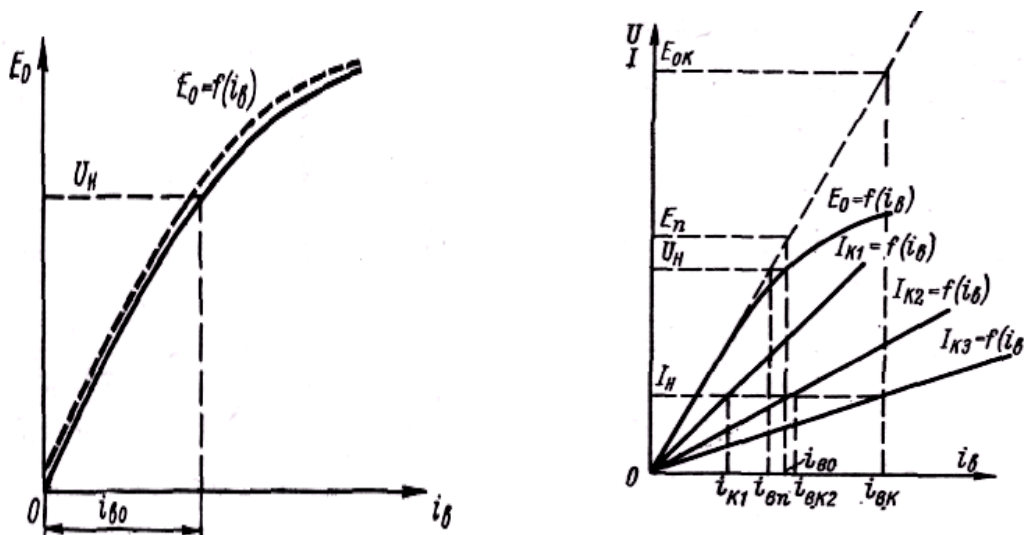


Рис. 5.3.1. Характеристики холостого хода (а) и короткого замыкания (б) синхронного генератора

Характеристика холостого хода (см. рис. 5.3.1а), дающая зависимость $E_0 = f(i_B)$ при $I = 0$ и $f = f_H$, снимается в восходящей нисходящей ветвях. Площадь, ограниченная этими кривыми, определяется величиной гистерезиса магнитной цепи ротора. При пользовании характеристикой холостого хода для

построения векторных диаграмм и других характеристик рекомендуется брать нисходящую ветвь с нулем, помещенным в точке пересечения кривой с осью абсцисс (см рис.5.3.1а, сплошная линия).

Характеристика холостого хода, а также и другие характеристики синхронного генератора могут быть построены в относительных единицах, чем достигаются лучшие условия для сравнительной оценки свойств машин. При этом, за базисный ток возбуждения обычно принимается ток возбуждения i_{B0} , соответствующий номинальному напряжению на характеристике холостого хода.

Характеристики короткого замыкания

Характеристика трехфазного короткого замыкания (см. рис. 5.3.1б) снимается при замыкании зажимов всех фаз обмотки якоря накоротко (симметричное короткое замыкание) и определяет зависимость $I_{к3} = f(i_B)$ при $f = \text{const}$ и $U = 0$.

При коротком замыкании магнитная система машины из-за размагничивающего действия реакции якоря оказывается ненасыщенной, и поэтому график характеристики короткого замыкания носит прямолинейный характер и имеет изгиб только при величинах тока, значительно превышающих номинальный ток I_H .

Получающиеся при двухфазном и однофазном коротком замыкании зависимости $I_{к1}=f(i_B)$ и $I_{к2}=f(i_B)$ носят также прямолинейный характер, но вследствие уменьшения величины реакции якоря проходит выше характеристики $I_{к3}=f(i_B)$ (см. рис. 5.3.1б).

Нагрузочные характеристики

Нагрузочные характеристики дают зависимость $U = f(i_B)$ при $I_a = \text{const}$, $f = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$ и позволяют получить представления о характере и величине реакции якоря синхронного генератора.

Наибольшее практическое значение имеет нагрузочная характеристика при $\cos \varphi \approx 0$ и $\varphi \approx \pi/2 > 0$ (см. рис. 5.3.2).

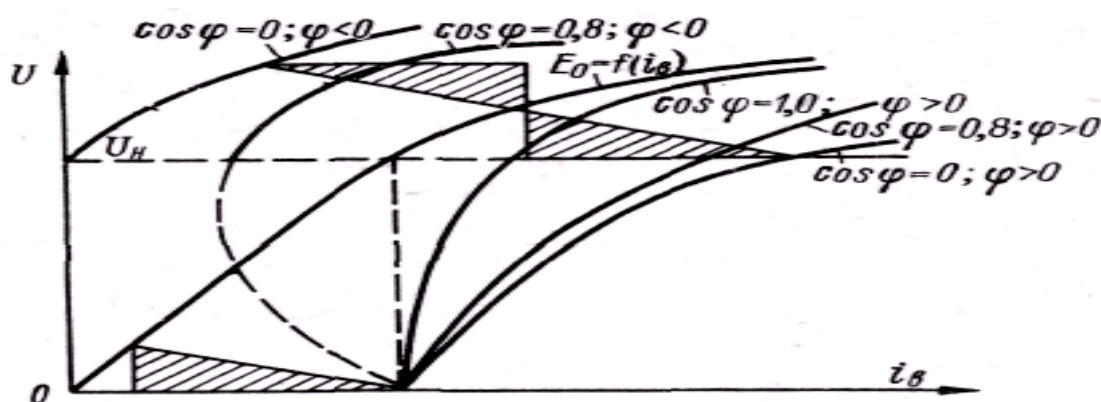


Рис. 5.3.2. Нагрузочные характеристики синхронного генератора

Нагрузочные характеристики при $\cos \varphi = 0,8$ ($\varphi > 0$) и $\cos \varphi = 1$ проходят выше характеристики $\cos \varphi = 0$ и не являются параллельными по отношению к

характеристике холостого хода $E_0 = f(i_B)$. Характеристики при $\cos \varphi = 0,8$ и $\cos \varphi = 0$, но при опережающем токе ($\varphi < 0$) проходят выше характеристики холостого хода.

Внешняя характеристика определяет зависимость $U = f(I)$ при $i_B = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$, $f = f_H$ и показывает, как изменяется напряжение машины U при изменении величины нагрузки и неизменном токе возбуждения.

Вид внешних характеристик при разных характерах нагрузки показан на рис. 5.3.3, причем предполагается, что в каждом случае величина тока возбуждения отрегулирована так, что при $I = I_H$ также $U = U_H$. Отметим, что величина i_B при номинальной нагрузке ($U = U_H$, $I = I_H$, $\cos \varphi = \cos \varphi_H$, $f = f_H$) называется номинальным током возбуждения.

Форма внешних характеристик синхронного генератора объясняется характером действия реакции якоря. При индуктивном (отстающем) токе (кривая 1 на рис. 5.3.3) существует значительная продольная размагничивающая реакция якоря, которая растет с увеличением тока нагрузки I , и поэтому U с увеличением I уменьшается. При чисто активной нагрузке (кривая 2 на рис. 5.3.3) также имеется продольная размагничивающая реакция якоря, но угол ψ между E и I меньше, чем в предыдущем случае, поэтому продольная размагничивающая реакция якоря слабее и уменьшение U с увеличением I происходит медленнее. При емкостном (опережающем) токе (кривая 3 на рис. 5.3.3) возникает продольная намагничивающая реакция якоря, и поэтому с увеличением I напряжение U растет.

Номинальное изменение напряжения синхронного генератора ΔU_H — это изменение напряжения на зажимах генератора (при его работе отдельно от других генераторов) при изменении нагрузки от номинального значения до нуля и при неизменном токе возбуждения, т.е.

$$\Delta U_H \% = (U_{xx} - U_H) / U_H \quad (5.3.1)$$

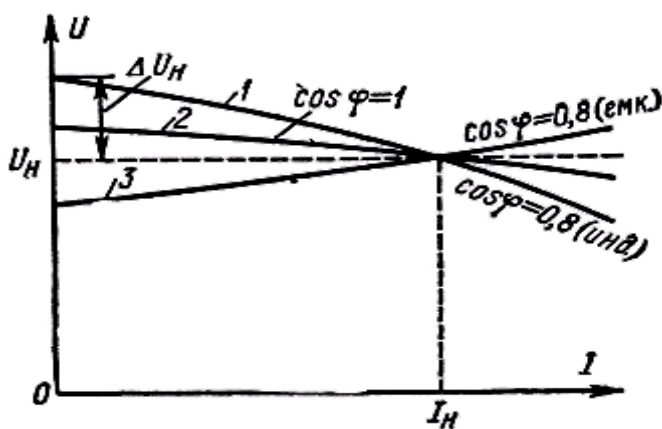
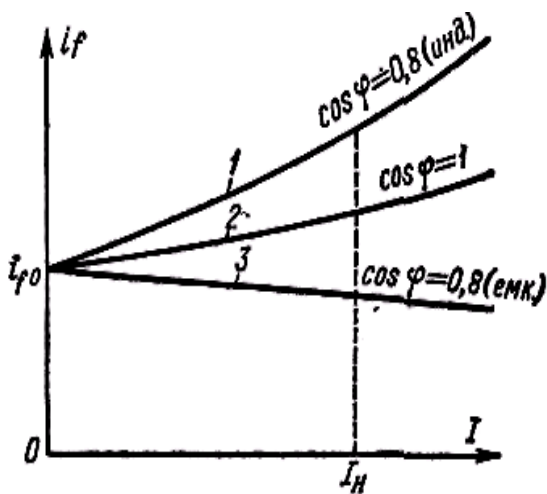


Рис. 5.3.3. Внешние характеристики синхронного генератора

Величина ΔU_H на естественной внешней характеристике синхронного

генератора при индуктивном $\cos \varphi = 0,8$ (см. рис. 5.3.3) обычно находится в пределах 25-35%.



Регулировочная характеристика определяет зависимость $i_b = f(I)$ при $U = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$ и $f = \text{const}$ и показывает, как нужно регулировать ток возбуждения синхронного генератора, чтобы при изменении нагрузки его напряжение оставалось неизменным. Вид регулировочных характеристик показан на рис. 5.5.4.

Рис.5.3.4.Регулировочные характеристики синхронного генератора

Точная синхронизация (включение на параллельную работу) синхронных машин

Совокупность операций, сопровождающих процесс включения СГ на параллельную работу, называется *синхронизацией генераторов*.

Синхронизация генераторов является весьма ответственной операцией и требует от эксплуатационного персонала большого внимания и знания тех процессов, которые сопровождают процесс синхронизации.

Подключение СМ в общую сеть для параллельной работы с другими синхронными машинами необходимо выполнять таким образом, чтобы в момент включения не было уравнительного тока в контурах, образованных обмоткой статора и сетью (другими генераторами). Для этого необходимо, чтобы суммы мгновенных значений ЭДС и напряжений в указанных контурах (рис. 5.3.5) в каждый момент времени были равны нулю.

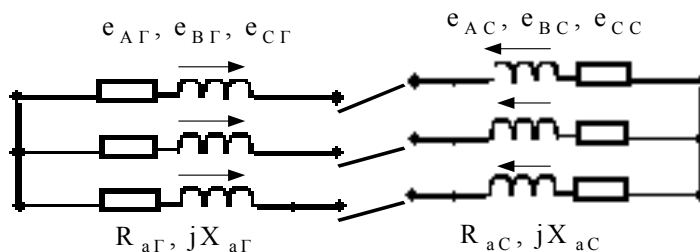


Рис. 5.3.5. Контур, образованные обмоткой статора и сетью (другими генераторами) при их включении на параллельную работу

Практически идеальное включение генератора на параллельную работу можно достичь при соблюдении следующих условий:

- 1) ЭДС включаемого генератора E_G должна быть равна напряжению сети U_C или уже работающего генератора;
- 2) частота ЭДС генератора f_G должна равняться частоте напряжения сети f_C ;
- 3) порядок чередования фаз якорной обмотки генератора и фаз сети должен быть одинаков;
- 4) фазы напряжений U_G и U_C непосредственно в момент включения должны совпадать.

Равенство ЭДС генератора и напряжения сети достигается путем регулирования тока возбуждения генератора и контролируется с помощью вольтметра.

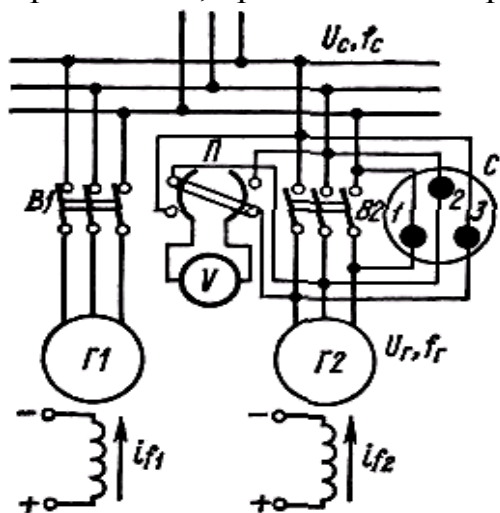
Изменение частоты и фазы ЭДС генератора достигается изменением скорости вращения генератора.

Правильность чередования фаз генератора и сети необходимо проверять только при первом включении генератора после монтажа или сборки схемы.

Совпадение ЭДС генератора и напряжения сети по фазе контролируется с помощью лампового синхроскопа, нулевых вольтметров или специальных синхроскопов, а в автоматических синхронизаторах — с помощью специальных измерительных элементов.

Неправильная синхронизация может вызвать серьезные аварии подключаемых генераторов и нарушение нормальной работы сетей, связанные с высокими значениями бросков тока, соизмеримых с токами короткого замыкания.

Схема, позволяющая выполнить все перечисленные выше условия синхронизации, представлена на рис. 5.3.6.



Слева на схеме изображен генератор G_1 , уже работающий на сеть, а справа — включаемый на параллельную работу с ним генератор G_2 с вольтметром V , вольтметровым переключателем Π и с ламповым синхроскопом C , каждая из ламп $1, 2, 3$ которого включена между контактами одной и той же фазы или полюса выключателя B_2 .

Рис. 5.3.6. Схема включения синхронных генераторов на параллельную работу

При соблюдении приведенных выше условий напряжения на всех лампах одновременно равны нулю и лампы не светятся, что и указывает на возможность включения генератора G_2 с помощью выключателя B_2 на параллельную работу.

Достичь точного равенства частот $f_G = f_C$ в течение даже небольшого промежутка времени практически невозможно, и поэтому напряжения $U_G - U_C$ на лампах $1, 2, 3$ пульсируют с частотой $f_G - f_C$, которая соответствует

частоте пульсаций напряжения (штриховые кривые на рис. 5.3.7б).

Путем регулирования частоты генератора необходимо добиться того, чтобы частота загорания и погасания ламп была минимальна (период 1—3 сек), и произвести затем включение выключателя $B2$ в момент времени, когда лампы не горят.

При малой частоте лампы погасают раньше, чем напряжение достигнет нуля, и загораются также при $U > 0$. Поэтому трудно выбрать правильный момент включения.

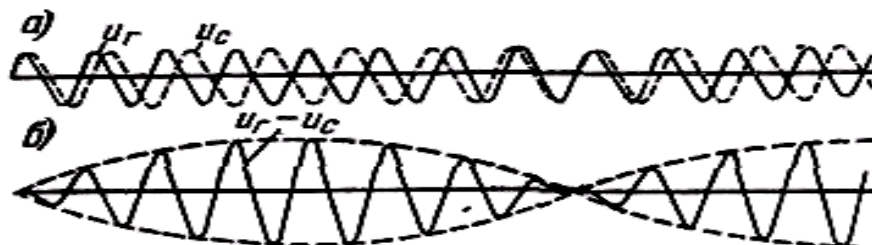


Рис. 5.3.7. Кривые изменения напряжений генератора ($U_{Г}$) и сети ($U_{С}$) и разности этих напряжений при неравенстве частот генератора и сети

Для более точного выбора момента включения генератора параллельно одной из ламп рис. 5.3.6 включают вольтметр, имеющий растянутую шкалу в области нуля (нулевой вольтметр).

Синхронизация с помощью ламп и нулевого вольтметра применяется только для генераторов малой мощности. Для мощных генераторов пользуются электромагнитным синхроскопом, к которому подаются напряжения генератора и сети. Этот прибор работает на принципе вращающегося магнитного поля, и при $f_{Г} \neq f_{С}$ его стрелка вращается с частотой $f_{Г} - f_{С}$ в ту или иную сторону в зависимости от того, какая частота больше.

Для исключения ошибок персонала и облегчения его работы пользуются автоматическими синхронизаторами, которые осуществляют автоматическое регулирование $U_{Г}$ и $f_{Г}$ синхронизируемых генераторов в нужных направлениях и при достижении необходимых условий автоматически включают генераторы на параллельную работу. Однако подобные автоматические синхронизаторы также обладают недостатками, связанными как с высокой стоимостью их установки и эксплуатации, так и с низким быстродействием, что особенно важно с точки зрения своевременной ликвидации аварийных ситуаций в энергосистемах.

Вследствие сказанного, в последние годы широко используется **метод грубой синхронизации, или самосинхронизации.**

Сущность метода самосинхронизации заключается в том, что генератор включается в сеть в невозбужденном состоянии ($U_{Г} = 0$) при скорости вращения, близкой к синхронной (допускается отклонение до 2%). При этом отпадает необходимость в точном выравнивании частот, величины и фазы напряжений, благодаря чему процесс синхронизации предельно упрощается и возможность ошибочных действий исключается. После включения невозбужденного генератора в сеть немедленно включается ток возбуждения и генератор втягивается в синхронизм (т. е. его скорость достигает синхронной и

становится $f_T = f_C$).

По действующим правилам метод самосинхронизации можно применять в случаях, когда толчок тока не будет превышать $3,5 I_N$. В большинстве случаев это условие выполняется.

Эксплуатационные режимы синхронной машины при её работе параллельно с сетью при синхронной скорости вращения достаточно подробно рассмотрены выше в п. 5.1, откуда следует, что для того, чтобы включенная на параллельную работу синхронная машина приняла на себя активную нагрузку и начала работать в режиме генератора, необходимо увеличить внешний механический вращающий момент, приложенный к её валу, увеличив, например, подачу топлива к дизелю или в газовую турбину, поступление воды в гидротурбину или пара в паровую турбину. Изменение тока возбуждения параллельно включенной СМ не вызывает изменения её активной нагрузки.

В ряде случаев номинальная мощность отдельного генератора является соизмеримой с номинальными мощностями других параллельно работающих генераторов. Хотя в этих условиях установленные выше общие положения также сохраняются в силе, необходимо учитывать, что в этом случае изменение режима работы одного генератора может оказывать заметное влияние на режимы работы других генераторов, что требует регулирования параметров всех параллельно работающих генераторов.

Более подробно материал по данной теме изложен в пятой части учебного пособия [1] на с. 18-25. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 5.3.

1. Какие эксплуатационные параметры связывают следующие характеристики СГ: холостого хода, нагрузочная, внешняя, регулировочная, короткого замыкания?
2. Как эксплуатационные свойства СМ зависят от значения её отношения короткого замыкания (ОКЗ)? Опишите способы определения отношения короткого замыкания СМ. Почему СМ с большим ОКЗ при равных номинальных мощностях имеют большие габариты, вес и стоимость ?
3. Объясните сущность всех известных методов включения СМ на параллельную работу.
4. Каковы последствия невыполнения условий точной синхронизации?
5. Объясните почему бросок тока при включении СГ на параллельную работу в одних случаях приводит к механическому удару на олову приводного двигателя, а в других случаях нет.

5.3.4. Эксплуатационные режимы и характеристики синхронных двигателей

Синхронные двигатели (СД) имеют по сравнению с асинхронными большое преимущество, заключающееся в том, что они, за счет регулирования тока возбуждения, **могут работать с $\cos \varphi = 1$** и не потреблять при этом

реактивной мощности из сети. При работе с перевозбуждением СД **могут сами являться источником реактивной мощности** для сети. В результате улучшается общий коэффициент мощности сети.

Максимальный момент синхронного двигателя пропорционален U . Поэтому при провалах напряжения СД сохраняет большую перегрузочную способность, чем АД, у которого электромагнитный момент пропорционален U^2 .

Кроме того, **возможность увеличения тока возбуждения синхронных двигателей** позволяет увеличивать устойчивость их работы при аварийных понижениях напряжения в сети и улучшать в этих случаях устойчивость работы энергосистемы в целом.

Добавочные потери в стали и в демпферной клетке ротора синхронных двигателей меньше, чем у асинхронных, благодаря чему **к. п. д. синхронных двигателей обычно выше.**

С другой стороны, конструкция синхронных двигателей сложнее, чем короткозамкнутых асинхронных двигателей, и, кроме того, синхронные двигатели должны иметь возбудитель или иное устройство для питания обмотки возбуждения постоянным током. Вследствие этого синхронные двигатели в большинстве случаев дороже асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Методы пуска и регулирования выходной скорости синхронных двигателей также сложнее.

Тем не менее, преимущество синхронных двигателей настолько велико, что при $P_H > 200 \div 300 \text{ кВт}$ их целесообразно применять всюду, где не требуется частых пусков, остановок и регулирования скорости вращения (двигатель-генераторы, мощные насосы, вентиляторы, компрессоры, мельницы, дробилки и пр.).

Способы пуска синхронных двигателей

Если якорную обмотку синхронного двигателя подключить к сети переменного тока при неподвижном роторе, по обмотке возбуждения которого проходит постоянный ток, то его ротор, обладающий определённой инерцией, не сможет «успеть» за вращающимся с синхронной скоростью магнитным полем статора. Поле будет вращаться относительно ротора со скольжением, равном единице, **вследствие чего за каждый период изменения тока якоря электромагнитный момент будет дважды менять своё направление, оставаясь в среднем равным нулю.**

В этих условиях двигатель останется неподвижным с включенной на полное напряжение сети обмоткой якоря. Такой режим является аварийным, так как, потребляемый двигателем из сети, соизмерим с током внезапного короткого замыкания.

Из сказанного выше следует вывод, что для пуска синхронного двигателя необходимо разогнать его **невозбужденный ротор** с помощью внешнего момента до частоты вращения, близкой к синхронной, и только затем подать питание в обмотку возбуждения.

Чаще всего применяется **асинхронный пуск синхронных двигателей.** При

этом методе двигатель пускают в ход как асинхронный, для чего его снабжают специальной короткозамкнутой обмоткой, выполненной по типу беличьей клетки. После разгона ротора до частоты вращения, близкой к синхронной, в обмотку возбуждения подают постоянный ток, который создаёт синхронизирующий момент, втягивающий ротор в синхронизм. Во время асинхронного разгона обмотку возбуждения ротора замыкают на разрядное сопротивление или на цепь возбуждателя.

Асинхронный пуск синхронных двигателей обычно производится путем прямого включения якорной обмотки на полное напряжение сети. При тяжелых условиях пуска (опасность слишком больших провалов напряжения сети или перегрева СД) производится реакторный или автотрансформаторный пуск при пониженном напряжении, как и у короткозамкнутых асинхронных двигателей.

Рабочие характеристики синхронных двигателей

Рабочие характеристики синхронного двигателя мощностью $P_H = 560$ кВт при $U = U_H$, $f = f_H$ и $i_f = i_{fH} = \text{const}$ изображены в относительных единицах на рис. 5.4.1.

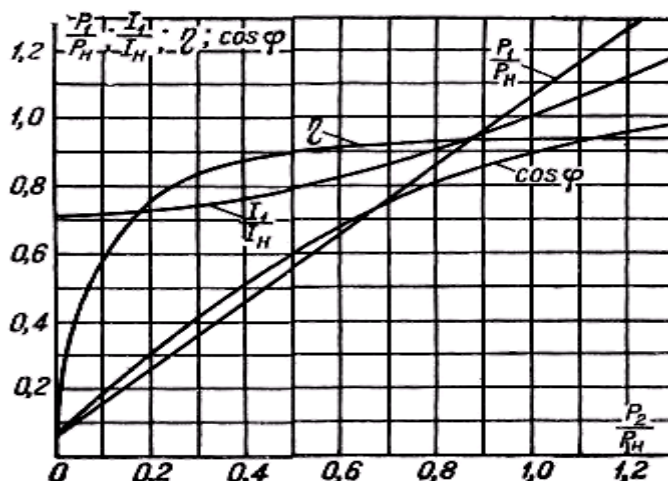


Рис. 5.4.1. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Следует отметить, что синхронный двигатель, рабочие характеристики которого приведены на рис. 5.4.1, работает с перевозбуждением, поэтому при нулевой полезной активной мощности P_2 ток якорная обмотка продолжает отдавать чисто реактивный ток I_1 способствуя улучшению коэффициента мощности сети.

5.4. Специальные режимы и конструкции синхронных машин.

Синхронная машина, не несущая активной нагрузки и загруженная реактивным током, называется **синхронным компенсатором**.

Если, например, такой компенсатор установить в районе большой промышленной нагрузки и перевозбудить его, то он будет снабжать асинхронные двигатели и трансформаторы промышленных предприятий реактивной мощностью, питающая сеть и генераторы электрических станций

будут полностью или частично разгружены от этой мощности.

Синхронные компенсаторы могут также выполнять роль регуляторов напряжения сети. синхронных генераторов. Для этого каждый синхронный компенсатор снабжается автоматическим регулятором возбуждения, который регулирует величину тока возбуждения так, чтобы за счет создания подмагничивающей или размагничивающей реакции якоря поддерживать напряжение сети постоянным.

Синхронные компенсаторы лишены приводных двигателей и с точки зрения режима своей работы в сущности являются синхронными двигателями, работающими на холостом ходу. Поэтому реально синхронные компенсаторы загружены небольшим активным током и потребляют из сети активную мощность для покрытия своих потерь. Компенсаторы строятся на мощность до $S_H = 100\ 000\ \text{кВ}\cdot\text{А}$ и имеют явнополюсную конструкцию, обычно с $2p = 6$ или 8.

Реактивным двигателем называется синхронный двигатель с **невозбужденным явнополюсным ротором**. Вращающий момент в таких двигателях возникает вследствие различия магнитных проводимостей по продольной и поперечной осям машины в соответствии с уравнением угловой характеристики СМ:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{mU^2}{2\varpi_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta, \quad (5.4.1)$$

где x_d и x_q – синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям машины.

Статор синхронной реактивной машины выполняется, так же как и статор обычной машины переменного тока (подробнее см. [1], ч.5, с. 29-30).

Шаговыми двигателями называются синхронные двигатели, преобразующие команды, заданные в виде электрических импульсов, в фиксированный угол поворота вала двигателя или в фиксированное положение подвижной части рабочего органа. Если использовать синхронный шаговый двигатель в качестве исполнительного двигателя в системах управления, то можно обойтись без датчиков обратной связи и упростить систему управления рабочим органом (подробнее см. [1], ч.5, с. 33).

Более подробно материал по данной теме изложен в пятой части учебного пособия [1] на с. 25-33. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 5.4.

1. Укажите (с помощью упрощенных векторных диаграмм) условия при которых СМ, подключенная к сети, работает в режиме двигателя. Каким образом обеспечить переход СМ в двигательный режим?
2. Опишите конструктивные особенности, достоинства и недостатки синхронных двигателей (СД).
3. Опишите способы пуска СД.

4. Опишите способы регулирования скорости СД.
5. Перечислите последовательность Ваших действий, имеющих целью изменение направления вращения уже работающего СД.
6. Укажите (с помощью упрощенных векторных диаграмм) условия, при которых СМ, работающая параллельно с сетью, потребляет из сети индуктивный (емкостной) ток. Можно ли (и каким образом) в таком режиме обеспечить полное отсутствие реактивного тока якоря?
7. Опишите особенности устройства и принципа действия СМ с постоянными магнитами.
8. Опишите особенности устройства и принципа действия синхронного реактивного двигателя.
9. Опишите особенности устройства и принципа действия шаговых двигателей (ШД). Какими паспортными параметрами характеризуются ШД? Какие конструктивные и схемные решения применяют для уменьшения шага ШД?
10. Опишите особенности устройства и принципа действия гистерезисного двигателя.
11. Опишите особенности устройства и принципа действия индукторного генератора и двигателя.

Тема 5.5. Неустановившиеся и переходные процессы синхронных машин

Материал по данной теме подробно изложен в пятой части учебного пособия [1] на с. 33-41. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 5.5.

1. Перечислите виды эксплуатационных (не аварийных) неустановившихся режимов и переходных процессов.
2. Перечислите виды аварийных неустановившихся режимов и переходных процессов.
3. Какими параметрами характеризуется переходный процесс, связанный с внезапным коротким замыканием СГ?
4. Какими параметрами характеризуются неустановившиеся процессы СМ, связанные с колебаниями ротора?
5. Каковы условия устойчивой работы СМ в неустановившихся режимах, связанных с колебаниями ротора?

Раздел 6 МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА (МПТ)

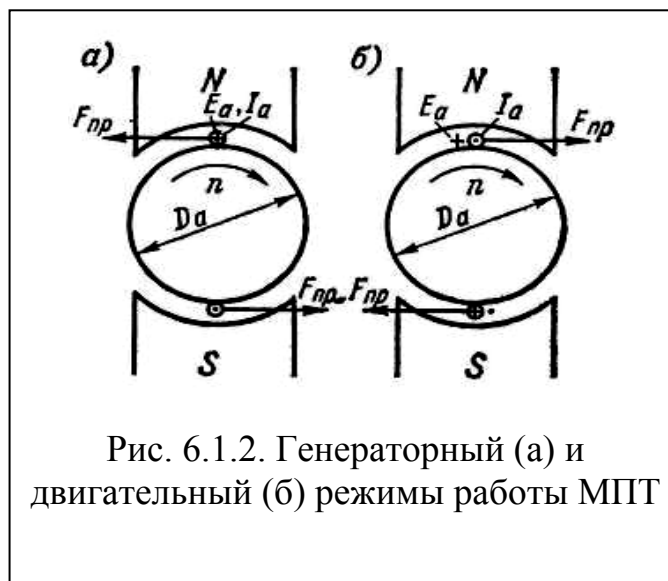
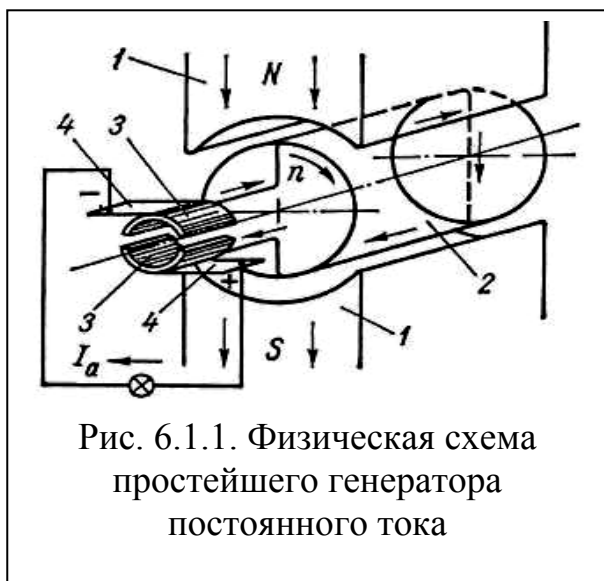
Тема 6.1. Устройство и физические основы функционирования машины постоянного тока в двигательном и тормозных режимах

Общие сведения об устройстве и принципе действия МПТ

Принцип действия МПТ в генераторном и двигательном режиме рассмотрим на примере простейшей машины, схема которой представлена а на рис. 6.1.1 и рис. 6.1.2.

Система возбуждения рассматриваемой простейшей машины имеет два полюса **1**. Обмотка якоря **2** состоит из одного витка (секции). Концы секции

соединены с изолированными от вала пластинами коллектора **3**, число которых в рассматриваемом случае равно двум. К коллектору прижимаются две неподвижные щетки **4**, которые с помощью скользящего контакта соединяют обмотку якоря с внешней цепью.



Основной магнитный поток в машинах постоянного тока создается магнитодвижущей силой обмотки возбуждения, которая расположена на сердечниках главных полюсов и питается постоянным током. Магнитный поток проходит от северного полюса **N** через якорь к южному полюсу **S** и от него через ярмо снова к северному полюсу. Сердечники полюсов и ярмо также изготавливаются из ферромагнитных материалов.

Генераторный режим МПТ

Поскольку магнитный поток полюсов является неизменным, то вследствие вращения якоря в каждом активном проводнике обмотки якоря индуцируется так называемая ЭДС вращения, направление которой может быть определено по правилу правой руки, а величина - соотношением $e_{np} = Blv$, где **B** — величина магнитной индукции между полюсом и якорем в месте расположения проводника; **l** — активная длина проводника, т. е. та длина, на протяжении которой он расположен в магнитном поле; **v** — линейная скорость движения проводника.

В обеих сторонах секции якорной обмотки (рис. 6.1.1) индуцируются одинаковые ЭДС, которые по контуру витка складываются, поэтому полная внутренняя ЭДС якоря рассматриваемой машины

$$e_a = 2Blv \quad (6.1.1)$$

ЭДС e_a , снимаемая на концах секции является переменной, так как проводники секции проходят попеременно под северным и южным полюсами, в результате чего направление ЭДС в проводниках меняется. По форме кривая ЭДС проводника в зависимости от времени **t** повторяет кривую распределения индукции **B** вдоль воздушного зазора (см. рис. 6.1.3 а).

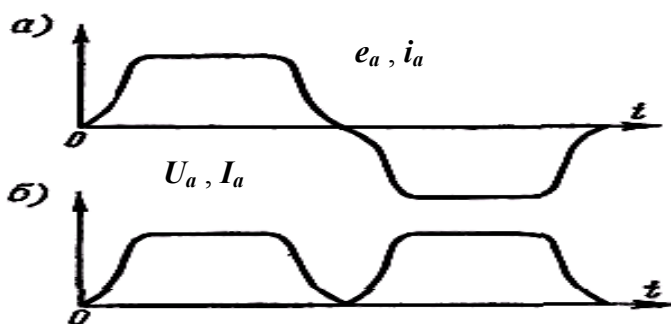
Частота f_a этой ЭДС. в двухполюсной машине равна частоте n вращения якоря n , выраженной в оборотах в секунду, то есть $f_a = n$, а в общем случае, когда машина имеет p пар полюсов с чередующейся полярностью $f_a = pn$.

Если обмотку якоря с помощью щеток замкнуть на внешнюю цепь, то в этой цепи, а также в обмотке якоря, под действием ЭДС якоря возникнет ток. Во внутренней части обмотки якоря (до коллектора) этот ток (i_a) будет переменным, и кривая его по форме аналогична кривой ЭДС (рис. 6.1.3а). Однако во внешней цепи (после щеток) направление этого тока (I_a) будет неизменным, так как при повороте якоря и коллектора (см. рис. 6.1.1) на 90° и изменении направления ЭДС в проводниках одновременно происходит также смена коллекторных пластин под соответствующими щетками. Вследствие этого верхняя щетка всегда отрицательной, так как всегда будет соединена с пластиной коллектора, соединенной с проводником секции, расположенным под северным полюсом, а нижняя щетка будет всегда положительной, так как всегда будет соединена с пластиной коллектора, соединенной с проводником секции, расположенным под южным полюсом.

В результате этого полярность щеток и направление тока во внешней цепи останутся неизменными. Таким образом, **в генераторе коллектор является электромеханическим выпрямителем, который выпрямляет переменный ток в секциях обмотки якоря в постоянный ток во внешней цепи.**

Кроме того, из рис. 6.1.1 и рис. 6.1.2а следует, что **в генераторном режиме ток якоря направлен согласно с ЭДС якоря.**

На рис. 6.1.3б, показана форма кривой тока I_a и напряжения U_a внешней цепи для рассмотренного выше генераторного режима простейшей машины постоянного тока.



Рис, 6.1.3. Форма кривых ЭДС и тока (e_a и i_a) в секции обмотки якоря (а), а также напряжения и тока (U_a и I_a) внешней цепи (нагрузки) простейшего генератора постоянного тока

Напряжение U_a на внешних зажимах обмотки якоря генератора постоянного тока будет меньше E_a на величину падения напряжения во внутреннем сопротивлении обмотки якоря r_a , т.е.

$$U_a = E_a - I_a r_a \quad (6.1.2)$$

Взаимодействие магнитного поля и проводников обмотки якоря с током I_a вызовет появление электромагнитного усилия F_{np} (см. рис. 6.1.2а) и электромагнитного момента $M_{эм}$, направление которого определяется по правилу левой руки, а величина следующим соотношением

$$M_{эм} = F_{np} D_a = Bl D_a I_a \quad (6.1.3)$$

где D_a — диаметр якоря. Как видно из рис. 6.1.2а, в режиме генератора электромагнитный момент действует против направления вращения якоря, то есть является тормозным.

Двигательный режим МПТ

Если к внешним зажимам обмотки якоря рассматриваемой простейшей машины постоянного тока подвести постоянное напряжение U_a , то по проводникам обмотки неподвижного якоря потечет пусковой ток $I_{a\text{пуск}}$, направление которого будет определяться полярностью приложенного напряжения, а величина – следующим соотношением

$$I_{a\text{пуск}} = U_a / r_a . \quad (6.1.4)$$

Если машина возбуждена, то на проводники обмотки якоря начнёт действовать электромагнитный пусковой момент $M_{\text{пуск}}$, направление которого можно определить по правилу левой руки, а величину – по соотношению (6.1.3)

Если $M_{\text{пуск}}$ окажется больше, чем момент сопротивления вала, то под действием избыточного момента якорь машины придет во вращение в сторону действия электромагнитного (пускового) момента.

Для того, чтобы электромагнитный момент машины сохранял прежнее направление при переходе проводников секции обмотки якоря из под полюсов одной полярности под полюса другой полярности, необходимо, чтобы при таком переходе направление тока в этих проводниках также менялось на противоположное. Эти функции выполняет щеточно-коллекторный узел.

Таким образом, в режиме двигателя щеточно-коллекторный узел превращает потребляемый из внешней цепи постоянный ток в переменный ток в обмотке якоря и работает, таким образом, в качестве электромеханического инвертора тока.

Так как проводники обмотки якоря двигателя также начинают вращаться в магнитном поле, то в них также индуцируется ЭДС E_a , направление которой определяется по правилу правой руки, а величина - соотношением (6.1.1). Из рис. 6.1.2б следует, что в двигательном режиме машины постоянного тока ЭДС якоря E_a направлена против тока якорной цепи I_a и приложенного к зажимам якоря напряжения U_a . Поэтому якорную ЭДС двигателя часто называют противоЭДС якоря.

Следовательно, напряжение, приложенное к обмотке вращающегося якоря двигателя постоянного тока уравнивается ЭДС E_a и падением напряжения в обмотке якоря

$$U_a = E_a + I_a r_a \quad (6.1.5)$$

А ток обмотки вращающегося якоря двигателя постоянного тока определяется следующим соотношением

$$I_a = (U_a - E_a) / r_a \quad (6.1.6)$$

Из сравнения соотношений (6.1.4) и (6.1.6) следует, что при пуске двигателя постоянного тока для ограничения пускового тока обмотки якоря требуется ввести в цепь якоря дополнительное (пусковое) сопротивление $R_{пуск}$ из расчета ограничения пускового тока величиной, не превышающей 2-2,5 номинального значения тока якоря. Указанное ограничение продиктовано защитой щеточно-коллекторного узла, в котором при больших токах возникает недопустимое искрение (электрическая дуга).

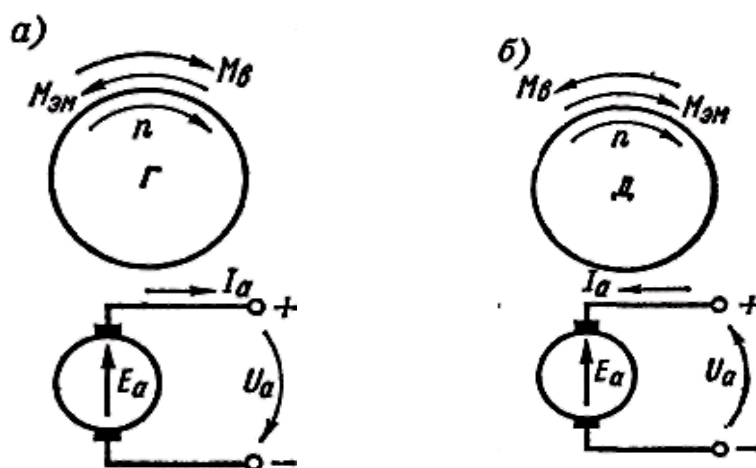


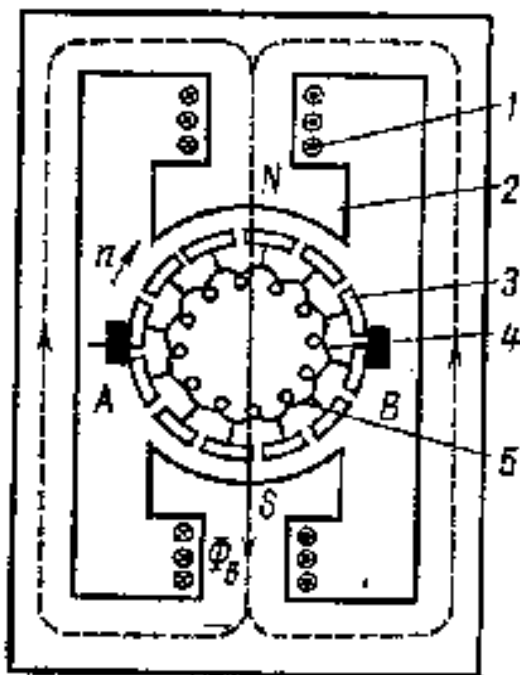
Рис. 6.1.4. Направления действия механических и электрических величин в генераторном (а) и двигательном (б) режимах машины постоянного тока

После разгона двигателя в связи с ростом величины противоЭДС якоря надобность в пусковом сопротивлении исчезает и его без опасения можно закортить.

Общие сведения о якорных обмотках машин постоянного тока

В реальных машинах постоянного тока в целях уменьшения пульсаций ЭДС, тока и электромагнитного момента якорные обмотки делают состоящими из большого числа секций 5, соединенных последовательно друг с другом и подключенных, в месте соединения секций, к соответствующим коллекторным пластинам 3, по которым скользят щетки 4. Таким образом, последовательно

соединенные секции якорной обмотки образуют замкнутую цепь. (см. рис. 6.1.5)



Щетки, установленные на коллекторе, делят внутреннюю цепь якорной обмотки на несколько параллельных ветвей, в каждую из которых входят последовательно соединенные секции с одним и тем же направлением ЭДС (находящиеся под полюсами одной и той же полярности). В случае рис. 6.1.5 образуется одна пара параллельных ветвей.

Рис. 6.1.5. Физическая схема реальной машины постоянного тока. 1 – обмотка возбуждения; 2 – главные полюса; 3 – коллекторные пластины; 4 – щетки; 5 – секции обмотки якоря

В зависимости от схемы соединения секций между собой якорные обмотки могут быть:

- петлевыми;
- волновыми;
- комбинированными.

Каждая секция любой реальной обмотки якоря состоит из одного или нескольких витков, активные стороны которых располагаются друг от друга на расстоянии y_1 , примерно равном одному полюсному делению $\tau = \pi D_a / 2p$ по поверхности якоря.

Это необходимо для того, чтобы при движении якоря стороны секции всегда находились под разноименными главными полюсами. При этом каждая секция присоединяется своими концами к соответствующим коллекторным пластинам.

На рис 6.1.6 изображены схемы петлевой (а) и волновой (б) якорных обмоток, состоящих из одновитковых секций.

Расстояние y_1 называется шагом секции или первым частичным шагом обмотки и чаще всего измеряется количеством элементарных пазов сердечника якоря, т.е.

$$y_1 = Z_э / 2p \quad (6.1.7)$$

где $Z_э$ – число элементарных пазов сердечника якоря.

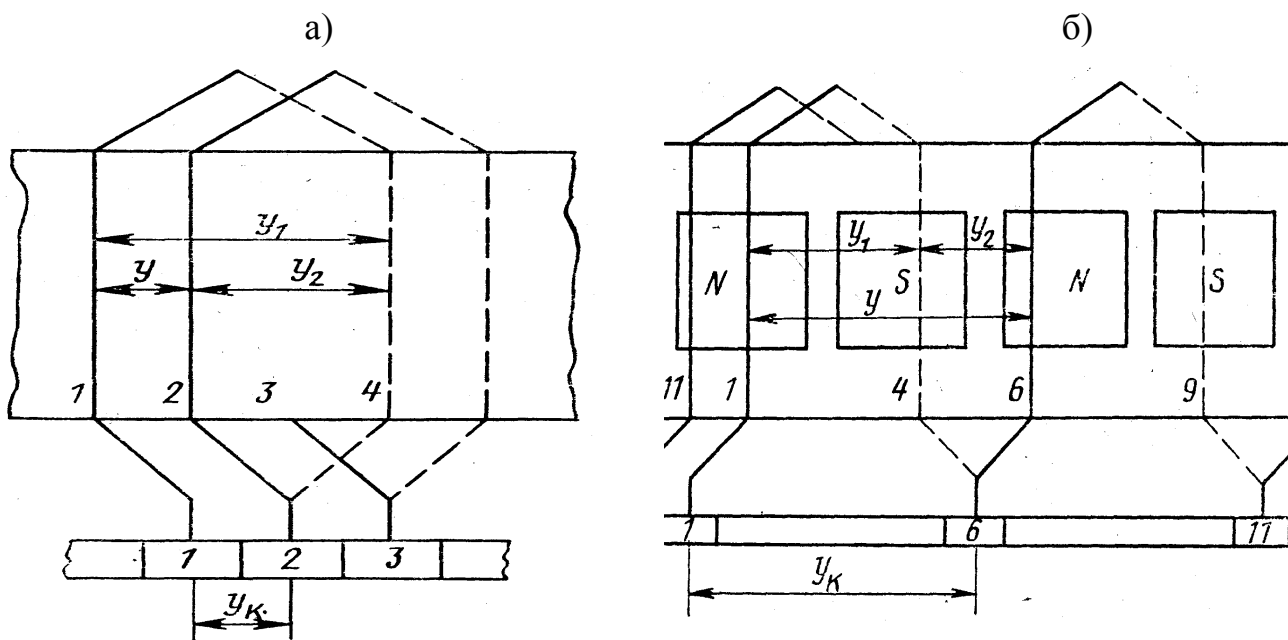


Рис. 6.1.6. Схемы соединения секций простой петлевой (а) и волновой (б) обмотки якоря машины постоянного тока. y_1 – шаг секции; y_2 – шаг соединения y – результирующий шаг y_k – шаг по коллектору

Простая петлевая обмотка получается при последовательном соединении всех секций в порядке их расположения на якоре. Конец первой секции соединяется с началом второй, конец второй — с началом третьей и т. д. Места соединения секций припаиваются к коллекторным пластинам. Соединенные одновитковые секции образуют петли, откуда и происходит название обмотки.

Простая волновая обмотка получается при последовательном соединении секций, находящихся под разными парами полюсов. Конец первой секции соединяется с началом той секции, которая находится примерно в одинаковых магнитных условиях, но под следующей парой полюсов и т. д. Места соединения секций припаиваются к ближайшим коллекторным пластинам. Одновитковые секции и их соединения образуют подобие волнистой линии, откуда и происходит название обмотки.

Таким образом, чтобы замкнуть простую волновую обмотку, т.е. чтобы соединить все входящие в неё секции, нужно несколько раз обойти окружность якоря. Петлевая обмотка замыкается после одного обхода якоря.

Щетки делят внутреннюю цепь простой петлевой обмотки на столько пар параллельных ветвей a , сколько пар полюсов p имеет машина, т.е. в петлевой обмотке $2a = 2p$.

Вследствие большого количества параллельных ветвей, образуемых секциями петлевой обмотки, в ней, для выравнивания реального потенциала эквипотенциальных точек секций, находящихся в одинаковых магнитных условиях по одноименными полюсами, соединяют со стороны коллектора уравнивательными соединениями.

Число параллельных ветвей, которые образуются во внутренней цепи простой волновой обмотки всегда равно 2, т.е. в волновой обмотке $2a = 2$,

независимо от числа полюсов машины.

Так как в простой волновой обмотке нет эквипотенциальных точек, то для неё уравнивательные соединения не нужны.

Если необходимо получить наибольшую выходную ЭДС машины, то целесообразно выбрать простую волновую обмотку, так как в ней параллельные ветви обмотки содержат наибольшее число последовательно соединенных секций.

Если необходимо получить возможно больший выходной ток, то следует выбирать простую или сложную петлевую обмотку, так как они, образуя большое число внутренних параллельных ветвей, могут обеспечить большее значение выходного тока при ограниченном значении максимально допустимого тока отдельной параллельной ветви.

Более подробно материал по данной теме изложен в шестой части учебного пособия [1] на с. 4-11. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 6.1.

1. Объясните назначение и устройство следующих частей МПТ: станина, главный полюс, добавочный полюс, якорь, коллектор, щетка, траверса.
2. Перечислите названия обмоток, применяемых в МПТ, объясните назначение каждой обмотки и приведите буквенно-графические обозначения обмоток на электрических схемах.
3. Изобразите электрические схемы замещения якорной цепи и соответствующие ей уравнения электрического равновесия для генераторного и двигательного режимов МПТ.
4. Из каких соображений рассчитывается величина пускового реостата? Приведите соответствующую расчетную формулу. Почему у ДПТ пусковой реостат нужен только на время пуска ?
5. Опишите роль щеточно-коллекторного узла МПТ при работе в генераторном и двигательном режимах.
6. Каким образом выполняются бесколлекторные генераторы и двигатели постоянного тока?
7. Как во внутренней части якорной цепи МПТ создаются параллельные ветви?
8. Объясните смысл понятия "геометрическая нейтраль" МПТ. Перечислите соображения, по которым щетки устанавливаются на коллектор по линии геометрической нейтрали. Как практически установить щетки на геометрическую нейтраль?
9. Каковы последствия сдвига щеток МПТ с геометрической нейтрали у генератором и двигателей?

Тема 6.2. Реакция якоря машины постоянного тока. Особенности работы щеточно-коллекторного узла (коммутация)

Поля якоря и системы возбуждения, действующие совместно, образуют результирующее магнитное поле, конфигурация которого определяется суммарным действием полей индуктора и якоря.

Следовательно, под влиянием поля якоря результирующее поле машины будет меняться. Это явление и называется **реакцией якоря**.

Поперечная реакция якоря.

При положении щеток на геометрической нейтрали ось поля якоря направлена поперёк оси главных полюсов и реакция якоря называется поперечной.

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.

Под воздействием поперечной реакции якоря нейтральная линия на поверхности якоря, на которой индукция $B = 0$, поворачивается из положения геометрической нейтрали на некоторый угол β в положение, которое называется линией **физической нейтрали**. В генераторе физическая нейтраль повернута в сторону вращения якоря, а в двигателе — в обратную сторону.

Кроме того, из-за насыщения магнитопровода машины, увеличение поля под одним краем полюса происходит в меньшей степени, чем ослабление под другим краем. В результате этого у насыщенных машин поперечная реакция якоря ослабляет общий магнитный поток.

Продольная реакция якоря.

Если щетки сдвинуть с геометрической нейтрали на предельный угол 90° эл., то ось поля якоря будет направлена вдоль оси главных полюсов и называется в этом случае полем **чисто продольной реакции якоря**. Поле продольной реакции якоря в зависимости от направления тока в якоре оказывает на основное магнитное поле намагничивающее или размагничивающее действие.

Общий случай реакции якоря.

Обычно щетки устанавливаются на геометрической нейтрали. Однако в результате неточной установки щеток, а также сознательных действий персонала щетки могут быть сдвинуты с геометрической нейтрали на некоторый угол α (рис. 6.2.1а), причем $0 < \alpha < 90^\circ$ эл. В таком общем случае поверхность якоря на протяжении двойного полюсного деления можно разбить на две пары симметричных секторов: 1) ab и gz ; 2) ag и bz . Токи первой пары секторов (рис. 6.2.1 б) создают поле поперечной реакции якоря, а токи второй пары (рис. 6.2.1 в) — поле продольной реакции якоря.

Указанные на рис. 6.2.1а полярности полюсов и направления токов якоря соответствуют вращению якоря в режиме генератора (G) по часовой стрелке, а в режиме двигателя (D) — против часовой стрелки.

Как следует из рис. 6.2.1, при повороте щеток генератора в направлении вращения и щеток двигателя против направления вращения возникает размагничивающая продольная реакция якоря, вызывающая уменьшение основного потока. При сдвиге щеток в обратном направлении возникает намагничивающая продольная реакция якоря, вызывающая увеличение основного потока.

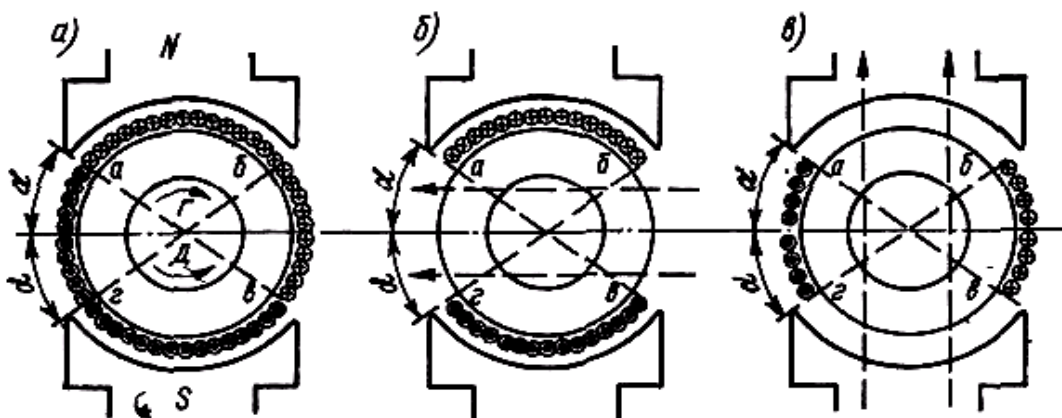


Рис. 6.2.1. Общий случай реакции якоря при частичном сдвиге щеток с геометрической нейтрали

Более подробно материал по данной теме изложен в шестой части учебного пособия [1] на с. 11-17. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 6.2.

1. Как поперечная реакция якоря МПТ зависит от степени насыщения магнитопровода?
2. От чего зависит характер действия и величина продольной реакции якоря МПТ?
3. Как влияют поперечная и продольная реакция якоря МПТ на эксплуатационные свойства МПТ в генераторном и двигательном режимах?
4. Какие способы применяют для компенсации влияния реакции якоря на эксплуатационные свойства МПТ?
5. Какие процессы в классической МПТ называются коммутацией?
6. Что такое «замедленная» коммутация МПТ? Каковы её причины?
7. Что такое «прямолинейная» коммутация МПТ? Как её обеспечить?
8. Что такое «ускоренная» коммутация МПТ? Как её обеспечить?
9. Перечислите возможные причины искрения в МПТ. Какие степени искрения допускаются при работе МПТ? Как уменьшить искрение на коллекторе МПТ?
10. Для чего нужны добавочные полюса МПТ? Как определить полярность добавочных полюсов и количество витков их обмотки? В каком случае добавочные полюса могут резко ухудшить качество коммутации? Почему магнитная система добавочных полюсов должна оставаться ненасыщенной в номинальном режиме работы? Как этого добиваются?
11. Почему обмотку якоря, обмотку добавочных полюсов и компенсационную обмотку МПТ необходимо соединять последовательно?

Тема 6.3. Эксплуатационные режимы работы и характеристики генераторов постоянного тока

Общие сведения об областях применения и схемах включения машин постоянного тока

Несмотря на то, что в промышленности применяется главным образом переменный ток, машины постоянного тока широко используются в различных промышленных, транспортных и других установках (в электролизной

промышленности, в электроприводах с широким регулированием скорости вращения, в системах электрической тяги и т. д.).

По способу возбуждения двигатели и генераторы постоянного тока подразделяются на машины **независимого, параллельного, последовательного и смешанного** возбуждения.

Машины постоянного тока независимого возбуждения делятся на машины с **электромагнитным возбуждением, в которых в качестве источника магнитодвижущей силы (МДС) применяется обмотка возбуждения ОВ, питаемая постоянным током от постороннего источника** (аккумуляторная батарея, вспомогательный генератор или возбудитель постоянного тока, выпрямитель переменного тока), и на **магнитоэлектрические, у которых источниками магнитного потока являются постоянные магниты**. МПТ последнего типа изготавливаются только на малые мощности. Схемы двигателей и генераторов с соответствующим видом электромагнитного возбуждения одинаковы (см. рис. 6.3.1).

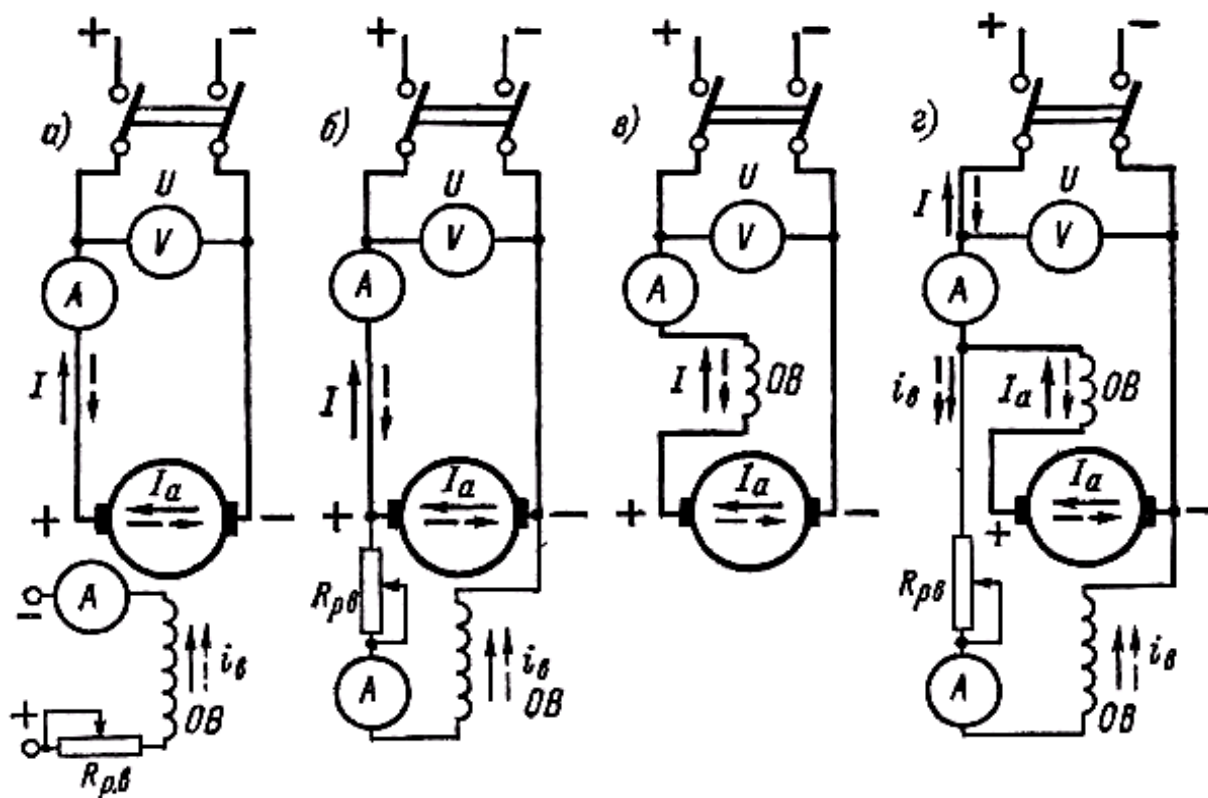


Рис. 6.3.1. Схемы включения обмоток машин постоянного тока с независимым (а), параллельным (б), последовательным (в) и смешанным возбуждением (г): сплошными стрелками показаны направления токов для генераторного режима, штриховыми – направления токов для двигательного режима

МПТ смешанного возбуждения имеют две обмотки возбуждения, расположенные на общих сердечниках главных полюсов: параллельную и последовательную. Если эти обмотки создают МДС **одинакового**

направления, то их включение называется согласным, в противном случае соединение обмоток возбуждения называется встречным. У двигателей постоянного тока обычно применяется согласное включение обмоток возбуждения, причем основная часть н. с. возбуждения (65—80%) создается параллельной (или независимой) обмоткой возбуждения.

Обмотки параллельного и независимого возбуждения имеют большое число витков малого сечения, а последовательного возбуждения — относительно малое количество витков большого сечения.

Математические соотношения для определения основных параметров и характеристик реальных машин постоянного тока.

Рассматриваемые ниже уравнения базируются на фундаментальных законах электротехники (см. уравнения 6.1.1 – 6.1.6) с учетом рассмотренных выше основных свойств реальных электрических машин постоянного тока.

Уравнение ЭДС якоря.

Примем следующие обозначения: N - число активных проводников обмотки якоря, p – число пар полюсов, a – число параллельных ветвей обмотки якоря, Φ_δ - средняя величина магнитного потока в рабочем зазоре машины; n – частота вращения якоря (об/с).

Тогда ЭДС обмотки якоря E_a будет определяться как

$$E_a = \frac{pN}{a} \Phi_\delta n \quad (6.3.1)$$

или

$$E_a = c \Phi_\delta n \quad (6.3.2)$$

где c - постоянная для каждой машины величина.

Если вместо частоты вращения n ввести в формулу (6.3.2) угловую скорость вращения $\Omega = 2\pi n$ (рад/с), то получим

$$E_a = c \Phi_\delta \Omega, \quad (6.3.3)$$

где

$$c = \frac{pN}{2\pi a} \quad (6.3.4)$$

Как следует из выражений (6.3.1) - (6.3.3), величина и полярность ЭДС якоря при эксплуатации машины определяется величиной и направлением основного магнитного потока и угловой скорости якоря.

Уравнения равновесия цепи якоря.

Уравнение напряжения для цепи якоря двигателя можно записать следующим образом:

$$U = E_a + R_a I_a \quad (6.3.5)$$

Для генератора постоянного тока (если подставить в правой части вместо знака «+» знак «-») уравнение (6.3.5) будет представлять собой **уравнение внешней характеристики**.

Здесь R_a — полное сопротивление цепи якоря. В режиме двигателя $U > E_a$, в режиме генератора: $U < E_a$. Из уравнения (6.3.5) следует, что ток якоря двигателя постоянного тока

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a} \quad (6.3.6)$$

Из уравнения (6.3.6) следует вывод о том, что **при эксплуатации двигателя его якорный ток определяется величиной ЭДС якоря и сопротивлением якорной цепи**.

Решая уравнение (6.3.5) совместно с (6.3.3) относительно n , можно определить **уравнение скоростной характеристики $n = f(I_a)$ двигателя**

$$\Omega = \frac{U - R_a I_a}{c \Phi_\delta} \quad (6.3.7)$$

Электромагнитный момент двигателя M можно определить по формуле

$$M = c \Phi_\delta I_a \quad (6.3.8)$$

Из уравнения (6.3.8) следует вывод о том, что **при эксплуатации двигателя его реверс (изменение направления вращения его вала) можно производить изменяя направление либо тока якоря, либо магнитного потока (тока возбуждения)**. Одновременное изменение и тока якоря, и магнитного потока (тока возбуждения) не приводит к реверсу двигателя..

Определив из (6.3.8) значение I_a и подставив его в (6.3.7), получим уравнение механической характеристики **$n = f(M)$ двигателя постоянного тока**

$$n = \frac{U}{c \Phi_\delta} - \frac{R_a M}{c c \Phi_\delta^2} \quad (6.3.9)$$

Для установившихся режимов работы **механическая характеристика определяет зависимость угловой скорости (частоты вращения) двигателя от момента сопротивления на его валу при неизменности всех прочих параметрах, входящих в уравнение (6.3.9)**.

Из уравнения (6.3.9) следует вывод о том, что **при эксплуатации двигателя регулирование угловой скорости (частоты вращения) его вала можно производить изменяя величину: напряжения, подаваемого на якорную обмотку; сопротивления якорной цепи; тока возбуждения (магнитного потока)**.

Эксплуатационные характеристики генераторов постоянного тока

Генератор с независимым возбуждением.

Ток возбуждения i_b генератора с независимым возбуждением (см. рис. 6.3.1а) не зависит от тока якоря I_a , который равен току нагрузки I . Обычно ток возбуждения невелик и составляет 1...3 % от номинального тока якоря.

Характеристика холостого хода генератора с независимым возбуждением для одного направления тока возбуждения представлена на рис. 6.3.2.

Расхождение входящей и нисходящей ветвей характеристики объясняется наличием гистерезиса и потока остаточной намагниченности в магнитопроводе машины. Величина $E_{ост}$ называется ЭДС остаточной намагниченности и составляет 2...4 % от $U_{ном}$.

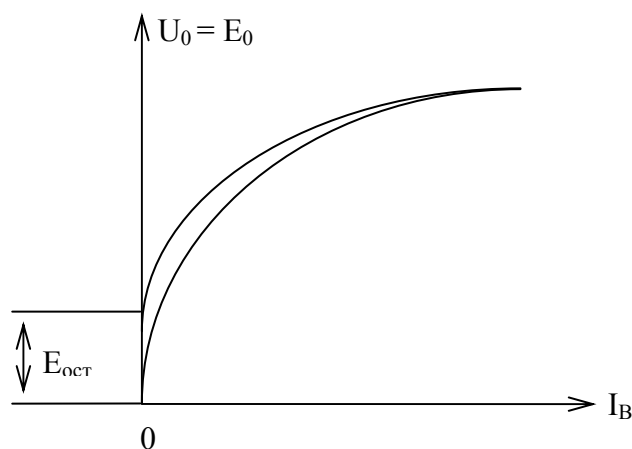


Рис. 6.3.2. Характеристика холостого хода генератора с независимым возбуждением

Внешняя характеристика ГПТ независимого возбуждения представлена на рис. 6.3.3а.

Напряжение генератора под нагрузкой определяется следующим соотношением:

$$U = E - I_a \Sigma r, \quad (6.3.10)$$

где: Σr – сумма сопротивлений всех обмоток, включенных последовательно в цепь якоря (якоря, дополнительных полюсов и компенсационной обмотки).

С увеличением нагрузки напряжение U уменьшается по двум причинам:

- из-за падения напряжения во внутреннем сопротивлении Σr машины;
- из-за уменьшения ЭДС E в результате размагничивающего действия реакции якоря.

Регулировочная характеристика ГПТ независимого возбуждения представлена на рис. 6.3.3б. Эта кривая сначала почти прямолинейна, но затем загибается вверх от оси абсцисс, вследствие влияния насыщения магнитопровода машины.

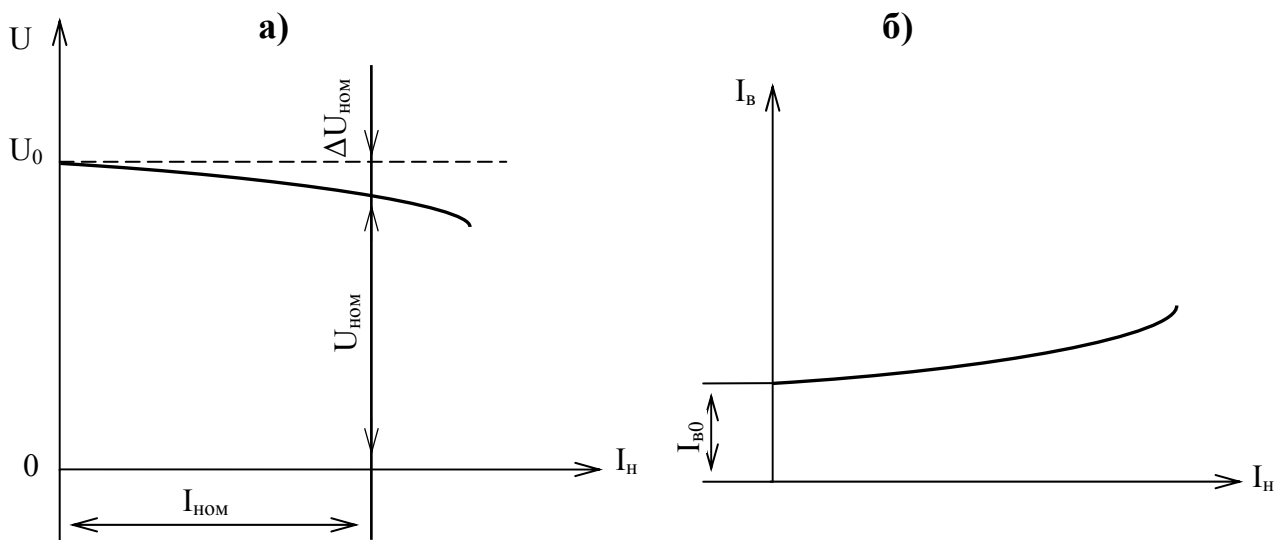


Рис. 6.3.3. Внешняя (а) и регулировочная (б) характеристики генератора с независимым возбуждением

В генераторе параллельного возбуждения (рис. 6.3.1б) используется принцип самовозбуждения, при котором обмотка возбуждения получает питание непосредственно от якорной обмотки самого генератора. При этом, **самовозбуждение генератора возможно только при наличии магнитного потока и ЭДС остаточной намагниченности.**

При вращении якоря в его обмотке потоком остаточной намагниченности индуцируется ЭДС $E_{ост}$ и по обмотке возбуждения начинает протекать ток. Если обмотка возбуждения включена так, что ее МДС $F_в$ направлена согласно с потоком остаточной намагниченности, то общий магнитный поток возрастает, увеличивая ЭДС E , поток Φ и ток возбуждения $I_в$. Машина самовозбуждается и начинает устойчиво работать с $I_в=const$, $E=const$, зависящими от величины сопротивления $R_в$ цепи возбуждения.

Для режима холостого хода генератора

$$e = i_в R_в + L \frac{di_в}{dt}, \quad (6.3.11)$$

где L – суммарная индуктивность обмоток возбуждения и якоря.

Кривая OA на рис. 6.3.4 представляет собой характеристику холостого хода генератора $E = f(i_в)$, а прямая OC – вольт-амперную характеристику цепи возбуждения с сопротивлением $R_в$ ($tg\gamma = R_в$).

Пока имеется положительная разность $(E - i_в R_в)$, член $L di_в/dt > 0$, т.е. происходит нарастание тока $i_в$. Установившийся режим будет иметь место при $L di_в/dt = 0$, т.е. в точке C . При изменении величины сопротивления $R_в$ прямая OC изменяет свой угол γ , что приводит к изменению установившегося тока возбуждения $I_{вmax}$, и соответствующего ему напряжения $U_0 = E_{max}$. Параметры цепи возбуждения должны подбираться так, чтобы в точке C обеспечивалась

устойчивость режима самовозбуждения.

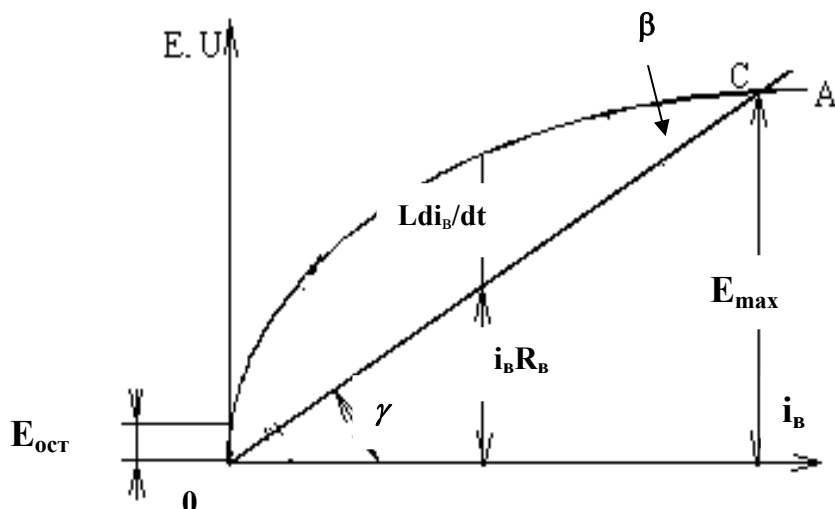


Рис. 6.3.4. Характер изменения ЭДС и тока возбуждения генератора в процессе самовозбуждения

Степень устойчивости рассматриваемого режима будет определяться значением первой производной

$$d(E - i_B R_B) / di_B = \operatorname{tg} \beta \quad (6.3.12)$$

где

β – угол пересечения характеристики OA с прямой OC.

При увеличении R_B до критического значения $R_{B, \text{кр.}}$, соответствующего $\gamma_{\text{кр}}$, угол $\beta \approx 0$ и режим самовозбуждения становится неустойчивым, при этом ЭДС генератора уменьшается до $E_{\text{ост}}$. Таким образом, для **нормальной работы генератора с параллельным возбуждением необходимо, чтобы $R_B < R_{B, \text{кр.}}$** .

Внешняя характеристика генератора с самовозбуждением располагается ниже внешней характеристики генератора с независимым возбуждением (рис. 6.3.5).

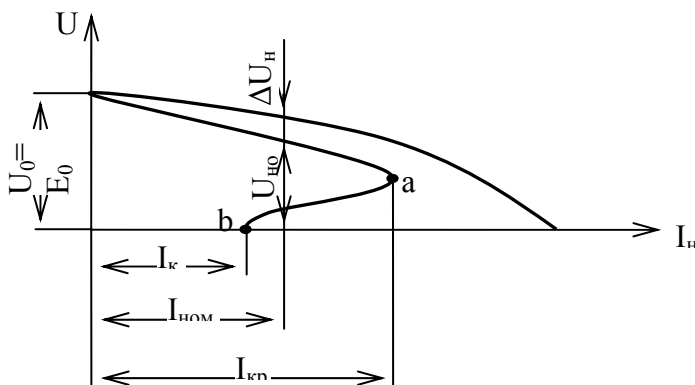


Рис. 6.3.5. Внешние характеристики генераторов с независимым (верхняя кривая) и параллельным (нижняя кривая) возбуждением

Объясняется это тем, что в генераторе с самовозбуждением выходное напряжение с ростом нагрузки уменьшается не только от падения напряжения на внутреннем сопротивлении якорной цепи и размагничивающего действия реакции якоря, но и вследствие уменьшения тока возбуждения $I_e = \frac{U}{R_e}$, который определяется величиной выходного напряжения U .

Ток короткого замыкания генератора параллельного возбуждения (точка **b**) создается только ЭДС от остаточного магнетизма и составляет $(0,4 \dots 0,8) I_{ном}$.

Работа на участке ab внешней характеристики неустойчива.

Регулировочная характеристика генератора с параллельным возбуждением имеет такой же вид, как и для генератора с независимым возбуждением.

В генераторе с последовательным возбуждением (рис. 6.3.1в) ток возбуждения $I_b = I_a = I$.

Ввиду того, что в генераторе с последовательным возбуждением напряжение сильно изменяется при изменении нагрузки, **такие генераторы практически не применяются.**

В генераторе со смешанным возбуждением (см. рис. 6.3.1г) имеются две обмотки возбуждения: параллельная (или независимая) и последовательная.

На рис. 6.3.6 произведено сопоставление внешних характеристик генераторов с различными типами возбуждения.

Из рассмотрения рис. 6.3.6 следует, что с помощью генератора смешанного возбуждения с согласным включением последовательной обмотки возбуждения можно получить внешнюю характеристику, при работе на которой выходное напряжение генератора мало изменяется с изменением нагрузки.

У генератора смешанного возбуждения с встречным включением последовательной обмотки возбуждения действие последней эквивалентно увеличению размагничивающего действия реакции якоря. Вследствие этого с увеличением нагрузки напряжение генератора сильно падает.

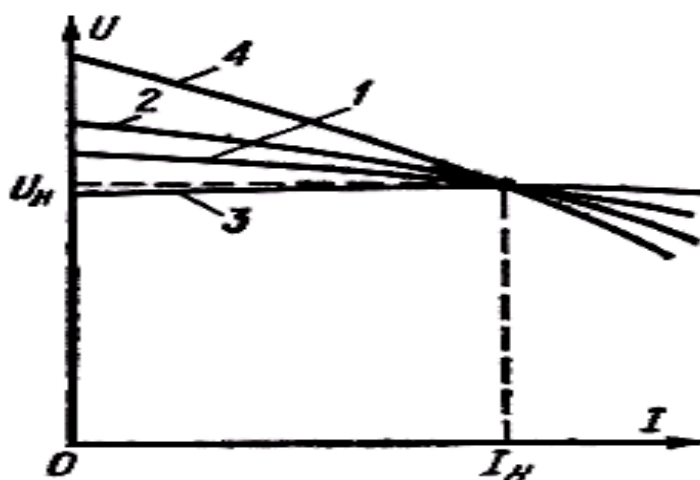


Рис. 6.3.6. Относительное положение внешних характеристик генераторов с независимым (1), параллельным (2), смешанным согласным (3), смешанным встречным (4) возбуждением

Более подробно материал по данной теме изложен в шестой части учебного пособия [1] на с. 17-25. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 6.3.

1. Укажите преимущественные области применения машин постоянного тока (МПТ).
2. Как классифицируются МПТ по способу возбуждения? Изобразите схемы МПТ, соответствующие различным типам электромагнитного возбуждения.
3. Где конструктивно располагаются обмотки возбуждения МПТ?
4. На основании какого признака включение последовательной обмотки возбуждения МПТ называют согласным или встречным?
5. Чем конструктивно отличаются друг от друга обмотки параллельного (независимого) и последовательного возбуждения МПТ?
6. Как изменить величину и полярность ЭДС якоря МПТ?
7. Какие условия необходимо выполнить для самовозбуждения ГПТ? Как эти условия обеспечить практически?
8. Покажите на графике примерную форму внешней характеристики ГПТ с различными типами возбуждения.
9. Покажите на графике примерную форму регулировочной характеристики ГПТ с различными типами возбуждения.
10. Каковы особенности включения на параллельную работу генераторов со смешанным возбуждением?

Тема 6.4. Эксплуатационные режимы работы и характеристики двигателей постоянного тока (ДПТ)

Так же как и генераторы, двигатели классифицируются по типу возбуждения: с параллельным (шунтовые), последовательным (сериесные) и смешанным (компаундные) возбуждением (см. рис. 6.3.1 б, в, г).

В двигателе с параллельным возбуждением (см. 6.3.1б) обмотка возбуждения подключена параллельно с обмоткой якоря к сети.

Если пренебречь размагничивающим действием реакции якоря, то можно считать, что магнитный поток двигателя не зависит от тока нагрузки. В этом случае механическая характеристика двигателя $\omega=f(M)$ будет линейной (см. выражение 6.3.9).

Суммарная величина сопротивления якоря R_a определяет наклон (жесткость) скоростной $\omega=f(I_a)$ и механической $\omega=f(M)$ характеристик к оси абсцисс. При отсутствии в цепи якоря добавочного сопротивления указанные характеристики будут максимально жесткими. В этом случае они называются естественными характеристиками. При включении в цепь якоря добавочного сопротивления $r_{ад}$ угол наклона этих характеристик возрастает, вследствие чего можно получить семейство реостатных характеристик 2,3,4, соответствующих различным значениям $r_{ад}$ (рис.6.4.1).

Чем больше $r_{ад}$, тем больший угол наклона имеет реостатная характеристика, т. е. тем она мягче. Современные двигатели с параллельным возбуждением снабжаются небольшой последовательной обмоткой возбуждения (стабилизирующей), которая придает механической

характеристике необходимый угол наклона. НС этой обмотки при токе $I_{\text{ном}}$ составляет до 10 % от НС параллельной обмотки.

Регулировочный реостат в цепи возбуждения позволяет изменять ток возбуждения двигателя $I_{\text{в}}$ и тем самым его магнитный поток. Согласно выражению (6.3.9) при этом будет изменяться и скорость вращения двигателя.

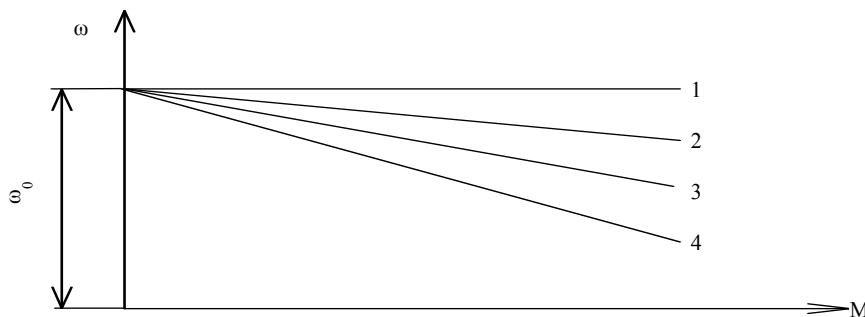


Рис. 6.4.1. Механические (реостатные) характеристики двигателя с параллельным возбуждением

В цепь обмотки возбуждения никаких отдельных выключателей и предохранителей не устанавливают, т.к. при разрыве этой цепи и небольшой нагрузке на валу скорость двигателя резко возрастает (он идет в «разнос»). При этом сильно увеличивается ток якоря и возникает круговой огонь на коллекторе машины.

В двигателе с последовательным возбуждением (рис. 6.3.1в) ток возбуждения равен току якоря: $I_{\text{в}}=I_{\text{а}}$, поэтому магнитный поток Φ является функцией тока нагрузки $I_{\text{а}}$. Характер этой функции изменяется в зависимости от величины нагрузки. При $I_{\text{а}} < (0,8 \dots 0,9) I_{\text{ном}}$, когда магнитная система ненасыщенна, $\Phi = k_{\text{ф}} I_{\text{а}}$, причем коэффициент пропорциональности $K_{\text{ф}}$ в значительном диапазоне нагрузок остается практически постоянным. При дальнейшем возрастании нагрузки поток Φ растет медленнее, чем $I_{\text{а}}$, и при больших нагрузках ($I_{\text{а}} > I_{\text{ном}}$) можно считать, что $\Phi = \text{const}$. В соответствии с этим изменяются и зависимости $n=f(I_{\text{а}})$, $M=f(I_{\text{а}})$ (рис. 6.4.2)

$$n = \frac{U - I_{\text{а}}(\Sigma r + r_n)}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e k_{\text{ф}} I_{\text{а}}} - \frac{I_{\text{а}}(\Sigma r + r_n)}{C_e k_{\text{ф}} I_{\text{а}}} = C_1 \frac{U}{I_{\text{а}}} - C_2 \quad (6.4.1)$$

$$M = C_m \Phi I_{\text{а}} = C_e k_{\text{ф}} I_{\text{а}}^2 = C_3 I_{\text{а}}^2. \quad (6.4.2)$$

Кроме естественной характеристики 1, можно путем включения добавочных сопротивлений $r_{\text{ад}}$ в цепь якоря получить семейство реостатных характеристик 2.

При малых нагрузках частота вращения n резко возрастает и может превысить максимально допустимое значение (двигатель идет в «разнос»). Поэтому такие двигатели нельзя применять для привода механизмов, допускающих работу в режиме холостого хода или при небольшой

нагрузке. Применение ременной передачи или фрикционной муфты при использовании таких двигателей также недопустимо.

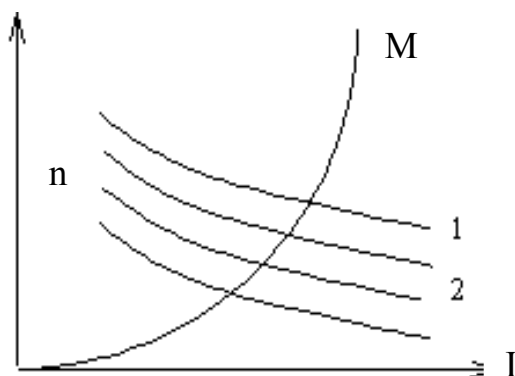


Рис.6.4.2. Зависимости момента и скорости вращения от тока якоря двигателя с последовательным возбуждением

При жесткой характеристике скорость вращения n почти не зависит от момента M , поэтому мощность

$$P_2 = Mn \sim cM \quad , \quad (6.4.3)$$

где c – постоянная.

При мягкой характеристике двигателя n обратно пропорционально M , вследствие чего:

$$P_2 = Mn \sim \text{Const} \quad . \quad (6.4.4)$$

Поэтому при изменении в широких пределах нагрузочного момента мощность и ток, потребляемые двигателем с последовательным возбуждением изменяются в меньших пределах, чем у двигателя с параллельным возбуждением.

В двигателе со смешанным возбуждением (рис. 6.3.1г) магнитный поток Φ создается в результате совместного действия двух обмоток возбуждения - параллельной и последовательной. Поэтому его механическая характеристика располагается между характеристиками двигателей с параллельным и последовательным возбуждением (рис. 6.4.3).

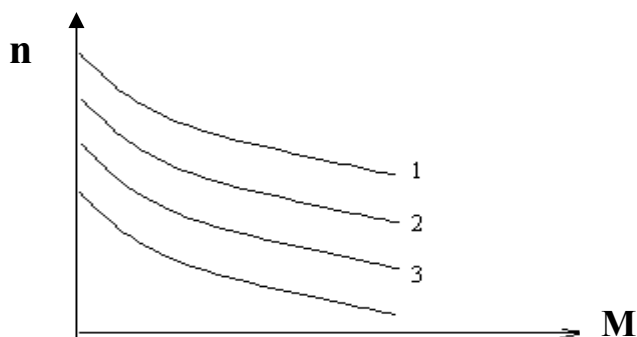


Рис.6.4.3. Механические характеристики двигателя со смешанным возбуждением

Достоинством двигателя со смешанным возбуждением является то, что он,

обладая мягкой механической характеристикой, может работать при холостом ходе, так как его скорость холостого хода n_0 имеет конечное значение.

Способы пуска и регулирования выходной скорости двигателей постоянного тока.

Пуск двигателей постоянного тока.

Возможны три способа пуска двигателя постоянного тока;

- 1) прямой пуск, когда цепь якоря приключается непосредственно к сети на ее полное напряжение;
- 2) пуск с помощью дополнительных пусковых сопротивлений, включаемых последовательно в цепь якоря;
- 3) пуск путем снижения напряжения, подаваемого на цепь якоря.

Целями специальных мер, принимаемых для осуществления пуска двигателя являются:

- ограничение чрезмерных бросков пускового тока, опасного для двигателя;
- обеспечение надлежащей величины пускового момента.

При $n = 0$ $E_a = 0$, поэтому

$$I_{a \text{ пуск}} = U / R_a . \quad (6.4.5)$$

Так как естественное сопротивление якорной цепи машин постоянного тока средней и большой мощности составляет всего доли Ома, то при прямом подключении двигателей на полное номинальное напряжение сети бросок ток якоря достигает недопустимых величин. Вследствие этого прямой пуск применяется только для двигателей мощностью до нескольких сотен Ватт, у которых R_a относительно велико.

Самым распространенным является пуск с помощью дополнительных пусковых сопротивлений $R_{п}$, включаемых последовательно в цепь якоря. При этом в начальный момент пуска, при $n = 0$ имеем

$$I_{a \text{ пуск}} = U / (R_a + R_{п}) , \quad (6.4.6)$$

где $R_{п}$ — величина пускового сопротивления. Величина $R_{п}$ подбирается так, чтобы в начальный момент пуска

$$I_{a \text{ пуск}} = (2,0 \div 2,5) I_H . \quad (6.4.7)$$

Регулирование скорости вращения.

Возможны три способа регулирования скорости вращения, вытекающие из анализа соотношения (6.3.9):

1. Путем изменения потока Φ_δ , т. е. тока возбуждения i_B .

С уменьшением Φ_δ скорость возрастает. Двигатели рассчитываются для работы при номинальном режиме с наибольшим значением Φ_δ , т. е. с наименьшей величиной n . Поэтому практически можно только уменьшать Φ_δ .

Следовательно, рассматриваемый способ позволяет регулировать скорость вверх от номинальной. При таком регулировании к. п. д. двигателя остается высоким, так как мала мощность реостатов для регулирования тока возбуждения.

Верхний предел регулирования скорости вращения ограничивается механической прочностью машины и условиями ее коммутации.

2. Путем включения последовательно в цепь якоря реостата или регулируемого сопротивления R_{pa} . Этот способ (см. рис. 6.4.1 – 6.4.3) дает возможность регулировать скорость вниз от номинальной и связан со значительными потерями в добавочном сопротивлении $r_{ад}$ и понижением к. п. д. Данный способ применяется в основном для двигателей небольшой мощности, а для более мощных двигателей используется редко.

3. Путем регулирования напряжения цепи якоря. Так как работа двигателя при $U > U_N$ недопустима, то данный способ дает возможность регулировать скорость также вниз от номинальной. КПД двигателя при этом остается высоким, так как никаких добавочных источников потерь в схему двигателя не вносится.

Однако в этом случае необходим отдельный силовой источник тока с регулируемым напряжением, что удорожает и усложняет электропривод.

Более подробно материал по данной теме изложен в шестой части учебного пособия [1] на с. 25-30. Для общего представления о содержании темы и объеме необходимых знаний по ней необходимо руководствоваться рабочей программой (п.2.1) и приведенными ниже вопросами для самопроверки.

Вопросы для самопроверки по теме 6.4.

1. Приведите уравнения электромеханической (ЭМХ) и механической (МХ) характеристик ДПТ.
2. Приведите примерную форму моментной характеристики ДПТ при различных типах возбуждения.
3. Приведите примерную форму механической характеристики ДПТ при различных типах возбуждения.
4. К чему может привести размыкание цепи возбуждения во время работы двигателя параллельного возбуждения : а) в режиме холостого хода; б) в номинальном режиме?
5. Объясните механизм саморегулирования ДПТ.
6. Обоснуйте все возможные способы регулирования выходной скорости двигателей постоянного тока. Сравните достоинства и недостатки различных способов регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока.
7. Изобразите семейство МХ ДПТ НВ для всех возможных способов регулирования выходной скорости.

Заключение

Знания и умения по дисциплине "Электрические машины" представляют для будущего инженера не только самостоятельную практическую ценность, но и являются основой для успешного освоения других профессиональных навыков и умений, необходимых при проектировании, изготовлении, испытании и эксплуатации электрических машин, электроэнергетических установок и систем, электроприводов и пр.

К сожалению, глубокое, всестороннее и прочное освоение за короткое время огромного по объему и сложности материала дисциплины

«Электрические машины» практически невозможно. Поэтому, главной целью изучения предлагаемого учебного материала является формирование у будущего специалиста основ фундаментальных знаний по дисциплине, которые позволят ему в будущем самостоятельно развивать и углублять свои знания, умения и навыки в сфере электрических машин с учетом прогрессивных тенденций развития электромашиностроения и возникающих реальных практических задач.

3.3. УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

[1] Штыков, В.Ф. Электрические машины [Электронный ресурс]: учебн. пособие в 6 частях/ В. Ф. Штыков.- СПб. : Изд-во СЗТУ, 2009.- 475 с. (170 Мб).

Электронная версия учебного пособия сформирована в виде 6 файлов: Shtykov_EM –1 ([1ч.1]: «Общие физические основы функционирования и устройства электрических машин»); Shtykov_EM-2 ([1ч.2]: «Трансформаторы»); Shtykov_EM-3 ([1ч.3]: «Общие вопросы теории и устройства синхронных и асинхронных машин»); Shtykov_EM-4 ([1ч.4]: «Асинхронные машины»); Shtykov_EM-5 ([1ч.5]: «Синхронные машины»); Shtykov_EM-6 ([1ч.6]: «Машины постоянного тока»), **находящихся в каталоге Shtykov_EM.**

3.4. ГЛОССАРИЙ

(краткий словарь основных терминов и положений)

Автотрансформаторы – трансформатор с одной обмоткой высшего напряжения у которого стороной низшего напряжения служит часть этой обмотки, выведенная с помощью специальных отводов на внешние зажимы автотрансформатора.

Активные (главные) элементы конструкции электрических машин – элементы ЭМ, которые непосредственно участвуют в электромеханическом или электромагнитном преобразовании энергии.

Асинхронная машина – ЭМ переменного тока, движущаяся часть которой (ротор) отстает или опережает магнитный поток в рабочем зазоре.

Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором - асинхронная машина, обмотка ротора которой, выполняемая методом заливки пазов, состоит из замкнутых между собой на торцах металлических стержней и не имеет связи с выводными клеммами ЭМ.

Асинхронная машина с фазным ротором – асинхронная машина, обмотка ротора которой полностью идентична обмотке статора и связана с выводными клеммами ЭМ через контактные кольца и электрощетки.

Базовая электрическая машина – конкретная ЭМ, основные составные части которой применяются для конструирования других ЭМ данного ряда.

Бесконтактные (бесколлекторные) машины постоянного тока - ЭМПТ, у которой роль щеточно-коллекторного узла выполняет бесконтактный

(полупроводниковый) преобразователь (выпрямитель, коммутатор, инвертор).

Бесщеточная синхронная машина – СМ, у которой питание обмотки индуктора организовано с помощью системы возбуждения, вращающейся вместе с ротором и не имеющей гальванической связи с внешними цепями.

Векторные диаграммы машин переменного тока – диаграммы, представляющие собой систему векторных изображений синусоидальных параметров электрических и магнитных цепей ЭМ для различных режимов работы.

Внешняя характеристика – зависимость выходного напряжения источника электроэнергии от тока нагрузки.

Вращающееся (перемещающееся) магнитное поле электрической машины – магнитное поле в рабочем зазоре ЭМ, организованное таким образом (например, с помощью трехфазной обмотки статора), что максимум его индукции перемещается в пространстве в соответствии с периодом изменения тока якорной цепи.

Генерирующие зоны магнитопроводов электрических машин – участки магнитопроводов, на которых располагаются элементы, создающие магнитодвижущие силы (обмотки с током, участки постоянной намагниченности и т.п.).

Геометрическая нейтраль машины постоянного тока - линия на поверхности якоря или коллектора, проходящая через точки расположения нейтральных секций якорной обмотки.

Главные полюса машины постоянного тока - электромагнитная система ЭМ, служащая для создания основного магнитного потока в рабочем зазоре ЭМ.

Г-образная схема замещения асинхронной машины – схема замещения АМ, в которой цепи статора и ротора вынесены на единые зажимы питающей сети.

Грамотная эксплуатация электрических машин - совокупность мер по подготовке электрических машин, использованию их по назначению, техническому обслуживанию, хранению и транспортировке, обеспечивающих поддержание электрических машин в исправном состоянии в течение всего времени эксплуатации, а также их бесперебойную и экономичную работу.

Группа соединения трансформатора – паспортное обозначение, указывающее схему соединения фазных обмоток трехфазного трансформатора, а также угол сдвига фаз между векторами линейных напряжений его первичной и вторичной обмоток.

Динамическая петля гистерезиса – петля гистерезиса, соответствующая перемещению рабочей точки кривой намагничивания магнитопровода при питании обмоток синусоидальным напряжением.

Добавочные полюса машины постоянного тока - электромагнитная система, служащая для улучшения коммутации в машине постоянного тока.

Добротность пуска электродвигателей – отношение относительного значения (кратности) пускового момента к относительному значению (кратности) пускового тока. Один из важнейших показателей для оценки пусковых свойств электрических машин, эффективности способов пуска и пусковых устройств.

Максимально допустимая температура частей электрической машины – предельная температура активных элементов ЭМ, при превышении которой происходят быстрые и необратимые процессы ухудшения электрических и физических свойств электротехнических материалов, в первую очередь электрической изоляции.

Жесткость характеристики – параметр, характеризующий на статических характеристиках ЭМ степень зависимости выходной величины от изменения входной (например, выходного напряжения генератора от тока нагрузки или частоты вращения двигателя от момента сопротивления). При этом, чем меньше выходной параметр зависит от входного, тем жестче характеристика.

Изменение напряжения трансформатора – процентное изменение выходного напряжения при изменении тока нагрузки от нуля до номинального значения.

Измерительные трансформаторы – трансформаторы тока и напряжения, применяемые для расширения диапазона измерения электроизмерительных приборов.

Индукторные машины – вращающиеся электрические машины, принцип действия которых основан на создании в якорной обмотке трансформаторной ЭДС за счет пульсации рабочего магнитного потока.

Индукционный регулятор – асинхронная машина с заторможенным фазным ротором, включенная по специальной схеме и предназначенная для регулирования величины напряжения переменного тока.

Исполнительные двигатели систем электроавтоматики – электродвигатели, предназначенные для перемещения рабочих (исполнительных) органов в системах автоматического регулирования технологических процессов.

Источник энергии – устройство, создающее в данном режиме работы на границе сопряжения с внешними объектами положительный поток энергии.

Исходные данные для проектирования – данные, необходимые для формирования задания на проектирование, включающее все условия.

Катушечная группа обмотки якоря – часть обмотки якоря машин переменного тока, образованная катушками (секциями) на расстоянии полюсного деления.

Класс нагревостойкости электроизоляционных материалов - специальное обозначение электроизоляционных материалов с точки зрения предельно допустимой рабочей температуры.

Колебания синхронных машин – явление колебания оси вращающегося ротора относительно оси вращающейся МДС якоря при работе СМ под нагрузкой.

Коммутация в машине постоянного тока - совокупность явлений, происходящих под щетками в месте их контакта с поверхностью коллектора при переходе секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую.

Компенсационная обмотка машины постоянного тока - обмотка МПТ, служащая для полной компенсации поперечной реакции якоря.

Конструктивное исполнение электрической машин – вид конструкции ЭМ, отражающий требования к установке, условиям работы, методам охлаждения, защите от воздействий окружающей среды.

Конструктивные (вспомогательные) элементы конструкции электрических машин - элементы конструкции электрических машин, непосредственно не участвующие в электромеханическом или электромагнитном преобразовании энергии (например, подшипниковые щиты, кожухи, вентиляционная система и т.п.).

Коэффициент полезного действия – отношение суммарной величины потока активной энергии (активной мощности) на выходах объекта, к суммарной величине потока активной энергии (активной мощности) на его входах.

Коэффициент трансформации трансформатора – отношение величины ЭДС обмотки высшего напряжения к величине соответствующей (например, фазной или линейной) ЭДС обмотки низшего напряжения.

Кратковременный режим работы электрической машины (ЭМ) - эксплуатационный режим который характеризуется периодическим включением и выключением ЭМ, причем за время работы ЭМ не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время стоянки - успевает остыть до температуры окружающей среды.

Критический момент асинхронной машины – максимальный электромагнитный момент АМ, развиваемый в установившемся режиме работы при неизменных заданных условиях.

Круговая диаграмма асинхронной машины – специальная диаграмма АМ, полученная на основании Г-образной схемы замещения АМ и предназначенная для графического определения рабочих характеристик АМ и графического анализа эксплуатационных режимов её работы.

Линейная асинхронная машина – АМ с линейным перемещением магнитного поля рабочем зазоре и предназначенная для прямого линейного перемещения внешнего рабочего органа.

Магнитная индукция – параметр, характеризующий магнитное поле и равный величине магнитного потока, приходящегося на единицу пронизываемой им площади.

Магнитная цепь электрической машины – совокупность участков, по которым проходит магнитный поток.

Магнитодвижущая сила (МДС) – параметр, характеризующий источник (причину) возникновения магнитного поля и в простейшем случае электромагнитной системы равный произведению тока обмотки на количество её витков.

Масляный трансформатор – трансформатор, теплоносителем системы охлаждения которого является трансформаторное масло.

Методы включения синхронных машин на параллельную работу – способы, обеспечивающие безаварийное включение СМ на параллельную работу.

Механическая характеристика электродвигателя – зависимость уровня выходной скорости двигателя от величины момента сопротивления на его валу при отсутствии других внешних воздействий.

Модификация электрических машин - ЭМ, созданные на основе базовой ЭМ, имеющие различия в конструкции, изменяющие рабочие свойства,

область применения или определяющие назначение ЭМ.

Моментная характеристика машины постоянного тока - зависимость электромагнитного момента двигателя от тока главной цепи (цепи якоря) при отсутствии других внешних воздействий.

Нагрузка электрической машины:

1. Если термин «нагрузка» рассматривать с точки зрения взаимодействия ЭМ как технического объекта с другими техническими объектами, то нагрузкой генератора являются все потребители электроэнергии, получающие электрическую энергию от выводных клемм данного генератора, а нагрузкой двигателя являются все потребители механической энергии, получающие механическую энергию от вала электродвигателя.

2. Если термин «нагрузка» рассматривать с точки зрения параметров электрической машины, то нагрузкой генератора является величина электрической мощности, развиваемой генератором на выводных клеммах (иногда в качестве величины нагрузки используют величину тока главной цепи данного генератора), а нагрузкой двигателя является механический момент, создаваемый на валу электродвигателя приводимым им механизмом.

Нагрузочная характеристика – зависимость выходного напряжения от тока возбуждения при фиксированном значении тока якорной цепи (например, при номинальном токе якоря).

Напряжение короткого замыкания трансформатора – напряжение которое нужно приложить к первичной обмотке трансформатора, чтобы при замкнутой вторичной обмотке получить в первичной и вторичной цепях трансформатора номинальные токи.

Напряженность магнитного поля - не зависящая от свойств окружающей среды характеристика магнитного поля, создаваемого электрическим током на участке магнитопровода определенной длины. Определяется как отношение магнитодвижущей силы, действующей в пределах данного участка магнитопровода к длине участка.

Неявнополюсная синхронная машина – синхронная машина, индуктор которой конструктивно не имеет явно выраженных сердечников главных полюсов. Характеризуется постоянством рабочего зазора по всей его длине.

Номинальные данные электрической машины – совокупность параметров, характеризующих условия работы электрической машины в режиме, предусмотренном заводом изготовителем.

Номинальный режим нагрузки электрической машины – характеристика нагрузочного режима электрической машины, для работы с которым она предназначена заводом изготовителем.

Отношение короткого замыкания (ОКЗ) синхронной машины – отношение установившегося тока якоря при симметричном коротком замыкании на зажимах якорной обмотки к номинальному току якоря СМ.

Параллельная работа источников электроэнергии – одновременная работа нескольких источников электроэнергии (трансформаторов, генераторов и др.) на общую нагрузку.

Параллельные ветви якорной обмотки машины постоянного тока -

параллельные участки внутренней цепи якорной обмотки, состоящие из четного числа групп последовательно соединенных секций обмотки якоря с одинаковым направлением индуцированной в них ЭДС.

Перегрузочная способность синхронной машины – отношение максимального значения электромагнитного момента (или максимального значения электромагнитной мощности) к номинальному значению момента (или мощности) СМ.

Повторно-кратковременный режим работы электрической машины (ЭМ) - эксплуатационный режим который характеризуется периодическим включением и выключением ЭМ, причем за время работы ЭМ не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время стоянки - не успевает остыть до температуры окружающей среды.

Поперечная реакция якоря машины постоянного тока - составляющая магнитодвижущей силы якорной обмотки, ось которой направлена поперек оси главных полюсов, воздействующая на магнитный поток в рабочем зазоре (существует как при нахождении щеток на геометрической нейтрали, так и при их сдвиге).

Поперечная ЭДС якоря синхронной машины – ЭДС, индуцированная в обмотке якоря активной составляющей тока якоря (поперечной составляющей реакции якоря).

Потери в стали – потери энергии на нагрев магнитопровода вследствие гистерезиса и вихревых токов.

Потребитель энергии – устройство, создающее в данном режиме работы на границе сопряжения с внешними объектами отрицательный поток энергии.

Правило левой руки – правило, вытекающее из законов взаимодействия тока и магнитного поля и применяемое для определения направления электромагнитной силы, действующей на проводник с током, находящийся в магнитном поле.

Правило правой руки – правило, вытекающее из закона электромагнитной индукции и применяемое для определения направления ЭДС, индуцируемой в проводнике, движущемся в магнитном поле.

Продолжительный режим работы электрической машины (ЭМ) - эксплуатационный режим, который характеризуется включением ЭМ на время, в течение которого она успевает нагреться до установившейся температуры.

Продольная реакция якоря машины постоянного тока - составляющая магнитодвижущей силы якорной обмотки, ось которой направлена по оси главных полюсов, воздействующая на магнитный поток в рабочем зазоре (возникает при сдвиге щеток с геометрической нейтрали).

Продольная ЭДС якоря синхронной машины – ЭДС, индуцированная в обмотке якоря под действием реактивной составляющей тока якоря (продольной составляющей реакции якоря).

Прямой пуск электродвигателей – пуск электродвигателей путем их подключения на номинальное напряжение сети без дополнительных токоограничивающих пусковых устройств.

Пусковой реостат двигателя постоянного тока – специальное

токоограничивающее устройство, обеспечивающее включение в цепь якоря двигателя (на время его включения и разгона) дополнительного сопротивления.

Пусковые свойства электродвигателей – показатели, характеризующие эффективность электродвигателей с точки зрения величины пускового тока, пускового момента, времени разгона, потерь энергии при пуске, стоимости пусковых устройств и т.д.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя - зависимости, связывающие эксплуатационные параметры двигателя (ток статора, потребляемую мощность, момент, КПД, скольжение, частоту вращения и др.) с полезной мощностью на валу.

Распределенные обмотки электрических машин – обмотки электрических машин, состоящие из соединенных между собой отдельных секций (катушек), оси которых сдвинуты относительно друг друга по длине рабочего зазора.

Реактивные двигатели – синхронные двигатели с явнополюсным ротором, не имеющие на роторе активных зон, генерирующих магнитное поле.

Реакция якоря – воздействие на магнитный поток в рабочем зазоре электрической машины магнитодвижущей силы якорной обмотки.

Реальные проявления магнитного поля – внешние (измеряемые) проявления магнитного поля либо в форме ЭДС, индуцированной в проводнике, движущемся в магнитном поле, либо в форме электромагнитной силы, действующей на проводник с током, находящийся в магнитном поле.

Регулирование выходной скорости электродвигателей - целенаправленное изменение эксплуатационных параметров двигателя (параметров питания, электрических сопротивлений и т.п) со стороны эксплуатирующего персонала, гарантированно приводящее к заранее известным изменениям угловой скорости (частоты вращения) его вала.

Регулировочная характеристика – характеристика, показывающая как необходимо менять ток возбуждения генератора, чтобы при изменении нагрузки выходное напряжение генератора оставалось неизменным.

Самовозбуждение машины постоянного тока - явление лавинообразного самопроизвольного роста напряжения на выходных зажимах генератора при подключении к этим зажимам его собственной обмотки возбуждения. Происходит вследствие наличия предварительной остаточной намагниченности магнитопровода при выполнении всех условий самовозбуждения.

Саморегулирование двигателя постоянного тока - способность двигателя автоматически изменять величину потребляемой из сети электрической мощности при изменении механической нагрузки на валу.

Саморегулирование трансформатора – способность трансформатора автоматически регулировать уровень мощности, потребляемой им на первичной стороне, в соответствии с уровнем мощности отдаваемой им на вторичной стороне.

Самоход исполнительного электродвигателя – вращение двигателя при отсутствии сигнала управления.

Серия электрических машин - ряд электрических машин, объединенных

общностью принципа электромагнитного преобразования энергии, общностью конструкции, имеющих общее наименование, с закономерно возрастающим определяющим параметром.

Силовые линии магнитного поля – линии, определяющие конфигурацию магнитного поля, а также характер, значение и направление воздействия магнитного поля на магнитные материалы, электрические заряды и проводники с током. Силовые магнитные линии всегда замкнуты сами на себя и создают на границах генерирующих зон (в виде постоянных магнитов или электромагнитных систем) южный (куда условно входят силовые линии) и северный (откуда условно выходят силовые линии) полюса.

Синхронная частота вращения – частота вращения первой (основной) гармоники магнитного поля, создаваемого в рабочем зазоре электрической машины (синхронной или асинхронной) токами обмотки якоря.

Синхроноскоп – измерительное устройство (индикатор), позволяющее оценить (точно или приблизительно) величину и знак углового (фазового) рассогласования между трехфазной системой ЭДС синхронного генератора (СГ) и соответствующей системой напряжений сети (или другого синхронного генератора) при их включении на параллельную работу. Синхроноскоп позволяет правильно выбрать момент времени для ручного включения СГ на параллельную работу с сетью или с другим СГ.

Скольжение асинхронной машины (АМ) – один из важнейших параметров, характеризующих режимы работы АМ. Указывает величину и направление угловой скорости ротора относительно магнитного поля в рабочем зазоре АМ. Численно определяется как отношение разности между значениями угловой скорости магнитного поля и угловой скорости ротора к значению угловой скорости магнитного поля.

Сосредоточенные обмотки электрических машин – обмотки, у которых оси отдельных секций (витков) совпадают в пространстве. Примером могут служить обмотки возбуждения машин постоянного тока и явнополюсных синхронных машин, расположенные на сердечниках отдельных полюсов.

Способы пуска электродвигателей (ЭД) – способы включения ЭД в сеть, обеспечивающие разгон ЭД без превышения максимально допустимых значений эксплуатационных параметров (тока, температуры, искрения на коллекторе, ускорения и т.п.).

Статическая петля гистерезиса – экспериментально полученная форма кривой намагничивания электромагнитной системы с ферромагнитным замкнутым сердечником, которая может быть получена при монотонном изменении магнитодвижущей силы по следующей траектории: нулевое значение – увеличение в положительной полярности до максимального значения (глубокое насыщение)– уменьшение до нулевого значения – изменение полярности – увеличение в отрицательной полярности до максимального значения (глубокое насыщение) – уменьшение до нуля – изменение полярности - увеличение в положительной полярности до максимального значения (глубокое насыщение).

Степени защиты от воздействия внешней среды – показатели,

характеризующие конструкцию электрических машин с точки зрения обеспечения защиты от воздействия внешней среды (например, от попадания внутрь машины воды и посторонних предметов, климатических воздействий и т.п.)

Степени искрения машины постоянного тока - показатели, оценивающие величину и характер искрения в щеточно-коллекторном узле МПТ. На основании анализа фактической степени искрения делается вывод о возможности эксплуатации МПТ в данных условиях.

Сухой трансформатор – трансформатор, основным теплоносителем в системе охлаждения которого является воздух.

Схема замещения трансформатора – эквивалентная электрическая схема, моделирующая физические процессы в электрических и магнитных цепях трансформатора. Чаще всего используется для моделирования установившихся режимов работы трансформатора.

Тахогенераторы – электрические машины, используемые в качестве датчиков частоты вращения (угловой скорости) рабочих органов технических устройств и систем.

Теория «двух реакций» - принцип, применяемый при анализе режимов работы явнополюсных синхронных машин (ЯПСМ), который основан на независимом рассмотрении реакции якоря ЯПСМ, создаваемой активной и реактивной составляющими тока якоря.

Трансформатор – электромагнитное устройство, имеющее несколько индуктивно связанных между собой и неподвижных относительно друг друга обмоток, предназначенное для преобразования, посредством электромагнитной индукции, одной или нескольких систем переменного тока с одними параметрами в одну или несколько систем переменного тока с другими параметрами.

Трансформаторная ЭДС – ЭДС, индуцируемая в проводнике (в обмотке), находящемся в магнитном поле, при изменении величины индукции указанного магнитного поля.

Требования ИСО и МЭК – требования Международной организации по стандартизации (ИСО) и Международной электротехнической комиссии (МЭК), участником которых является Россия. При проектировании электрических машин при решении вопросов, связанных с выбором видов исполнения, каталожных обозначений, величин выходных параметров, размеров наружных частей (установочных и присоединительных размеров) электрических машин рекомендации ИСО и МЭК должны учитываться наряду с требованиями стандартов России.

Угловая характеристика синхронной машины – зависимость величины электромагнитной мощности или электромагнитного момента СМ от величины «угла нагрузки» (угла между осью магнитного потока в рабочем зазоре СМ и продольной осью индуктора).

Угол нагрузки синхронной машины – угол между осью магнитного потока в рабочем зазоре СМ и продольной осью индуктора (угол выбега). Характеризует сдвиг между синхронно вращающимися осями индуктора (ротора) СМ и

магнитного поля в её рабочем зазоре, появляющийся при увеличении нагрузки (потока активной энергии, активной мощности) СМ.

Условия точной синхронизации синхронных машин – условия, которые необходимо строго выполнять при каждом включении синхронных машин на параллельную работу с сетью или с другими синхронными машинами. При выполнении всех условий точной синхронизации мгновенное значение суммы всех ЭДС, действующих в электрических контурах, образованных статорной обмоткой включаемой СМ и сетью, становится в любой момент времени равным нулю, вследствие чего броски так называемого «уравнительного» тока отсутствуют.

Устойчивость параллельной работы синхронных машин – способность синхронных машин, включенных на параллельную работу, сохранять режим синхронного вращения при изменении нагрузки. Антиподами устойчивой работы являются аварийные режимы, связанные с недопустимыми колебаниями ротора СМ или выпадение её из синхронизма.

Ферромагнитные материалы – различные марки электротехнической стали, сплавы и композиции на основе железа, никеля, кобальта, магнитная проницаемость которых в несколько тысяч (иногда в десятки тысяч) раз больше, чем магнитная проницаемость вакуума (воздуха).

Формула Клосса – уравнение, позволяющее построить механическую характеристику асинхронной машины по каталожным данным.

Характеристика короткого замыкания – зависимость тока якоря электрической машины от тока возбуждения при симметрично закороченных выводах обмотки якоря.

Характеристика холостого хода – зависимость выходного напряжения генератора от тока возбуждения при отсутствии тока нагрузки.

Шаговые двигатели - синхронные исполнительные двигатели, управляемые сериями импульсов, подаваемых на обмотку статора в определенной последовательности, реагирующих на указанные импульсы путем перемещения ротора и связанного с ним рабочего органа на определенное количество «шагов».

Шихтованные элементы электрических машин – элементы электрических машин (главным образом магнитопроводов), собранные в виде пакетов из тонких пластин ферромагнитного материала, электрически изолированных друг от друга.

Щеточно-коллекторный узел (ЩКУ) машины постоянного тока - конструктивный узел МПТ, включающее в себя щеточное устройство и коллектор. Обеспечивает скользящий контакт между внутренней цепью вращающейся обмотки якоря и неподвижными внешними зажимами якорной обмотки. Кроме того, ЩКУ в генераторном режиме МПТ играет роль электромеханического преобразователя переменного тока в постоянный (выпрямителя), а в двигательном режиме МПТ – роль электромеханического преобразователя постоянного тока в переменный (инвертора).

ЭДС вращения (движения) - ЭДС, индуцируемая в проводнике (в обмотке), находящемся в магнитном поле, при его движении поперек силовых линий

указанного магнитного поля.

ЭДС самоиндукции - ЭДС, индуцируемая в проводнике (в обмотке) сцепленным с проводником (обмоткой) изменяющимся магнитным полем, созданным собственным изменяющимся током данного проводника (обмотки).

Электромагнитная индукция – физическое (реальное) проявление магнитного поля как среды, при движении в которой тело, обладающее свободными носителями заряда, способно создавать на своих границах электродвижущую силу или поддерживать, в случае образования замкнутых контуров, электрический ток в цепи.

Электромагнитные индукционные насосы – разновидности асинхронных машин, в которых в качестве ротора используется токопроводящая среда (например, расплавленный металл).

Электромашинный компенсатор – синхронная машина, работающая параллельно с сетью при нулевом значении активной электрической нагрузки. Применяется для разгрузки от реактивного тока источников электроэнергии и линий электропередач, к которым подключены обособленные энергетические системы.

Электромашинный усилитель (ЭМУ) – электрический генератор постоянного тока обычной (ЭМУ с продольным полем) или специальной (ЭМУ с поперечным полем) конструкции, используемый в режиме усиления входного сигнала (сигнала управления) по мощности.

Электромашинный преобразователь – одноякорная или многоякорная вращающаяся электрическая машина специальной конструкции, предназначенная для преобразования, посредством электромагнитной индукции, одной или нескольких систем переменного или постоянного тока с одними параметрами в одну или несколько систем переменного или постоянного тока с другими параметрами.

Электромеханическая характеристика электродвигателя – зависимость угловой скорости (частоты вращения) ротора от тока ротора.

Энергетическая диаграмма электрической машины – диаграмма, показывающая картину распределения потока потребляемой электрической машиной электрической энергии с учетом всех его составляющих.

Явнополюсная синхронная машина - синхронная машина, индуктор которой конструктивно включает в себя явновыраженные сердечники главных полюсов. Характеризуется резким увеличением толщины рабочего зазора при переходе от продольной к поперечной оси главных полюсов.

Якорная обмотка электрической машины – обмотка ЭМ, цепь которой является цепью главного тока ЭМ. В синхронных и асинхронных ЭМ якорная обмотка обычно располагается на статоре, в машинах постоянного тока – на роторе, из-за чего ротор МПТ часто называют якорем.

3.5. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Для обеспечения дисциплины используется компьютерная, учебно-

методическая и лабораторная база кафедры электротехники и электромеханики СЗТУ, а также технические средства филиалов и представительств СЗТУ.

3.6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

3.6.1. Введение и общие рекомендации

Целью выполнения лабораторных работ является привитие студентам:

- умения планировать, организовывать и проводить экспериментальные стендовые исследования реальных электрических машин;
- умения переходить от физических процессов в реальных электрических машинах к их математическим описаниям и моделям;
- умения анализировать полученные в эксперименте данные и давать им соответствующую интерпретацию и оценку.

Цикл лабораторных работ включает в себя работы, общее содержание которых соответствует 4 основным разделам дисциплины: «Трансформаторы», «Асинхронные машины», «Синхронные машины», «Машины постоянного тока».

Состав, конкретное содержание и порядок выполнения лабораторных исследований может корректироваться в соответствии с изменением состава реального лабораторного оборудования, которыми располагает кафедра Электротехники и электромеханики СЗТУ, а также по мере внедрения в учебный процесс программных продуктов, позволяющих моделировать реальные лабораторные исследования с помощью компьютера.

Прежде, чем приступить к лабораторным занятиям, необходимо изучить все вопросы, касающиеся техники безопасности при работе в лаборатории, и получить по данному разделу допуск к работе у преподавателя, ведущего занятия.

Кроме того, надо подготовиться к выполнению лабораторной работы, проработав перед этим рекомендованную по данной теме литературу и ознакомившись с «Методическими указаниями» к данной конкретной работе.

Следует ознакомиться с составом лабораторного оборудования и убедиться в исправности испытуемых агрегатов, соединительных проводов, контрольно-измерительных приборов, аппаратуры управления и защиты.

Все лабораторные работы выполняются, как правило, в очной форме. Каждому студенту необходимо подготовить рабочую тетрадь (рабочий лист), содержащую заготовки всех необходимых таблиц, графиков и пояснений, которая заполняется в процессе выполнения лабораторной работы и на основании которой составляется итоговый отчет.

отчет должен содержать:

- титульный лист (см. образец ниже);
- схему и описание лабораторной установки;
- перечень применяемых в работе электрических машин, контрольно-измерительных приборов, аппаратуры управления и защиты;
- заполненные таблицы с данными лабораторных исследований;

- графики и расчетные соотношения, используемые при их построении;
- анализ полученных результатов и выводы;
- перечень контрольно-измерительных приборов и автоматических устройств;
- краткие ответы на контрольные вопросы;
- краткий список использованной литературы.

Графики и характеристики должны быть исполнены на миллиметровой бумаге и снабжены соответствующими обозначениями осей и приведенных на них зависимостей.

Отчет должен быть составлен таким образом, чтобы по его данным можно было воспроизвести ход лабораторной работы.

Важным условием при оформлении отчета являются анализ и оценка полученных результатов. Следует сравнить соответствие полученных результатов теоретическим положениям и определить причины возможных расхождений.

В зависимости от цели и программы работы отчет может содержать те или иные дополнительные пункты, которые указываются в описании соответствующих лабораторных работ.

Отчет по результатам выполнения работы после соответствующего оформления должен быть защищен перед ведущим преподавателем.

При выставлении итоговой оценки по лабораторной работе учитывается не только результаты ответов на контрольные вопросы, но также тщательность и аккуратность оформления отчета.

3.6.2. Указания по технике безопасности

Во избежание несчастных случаев при работе в лаборатории электротехники и электрических машин необходимо выполнять следующие требования:

- изучить содержание настоящей инструкции и после разрешения преподавателя расписаться в журнале проверки знаний по технике безопасности;
- не прикасаться к частям электроустановок, находящихся под напряжением;
- собирать схемы только при выключенном питании;
- включать электроустановки на рабочих местах только после проверки всей схемы руководителем занятий и при отсутствии людей в электроопасных местах;
- не выполнять какие-либо переключения и изменения в схеме, находящейся под напряжением;
- устанавливать и заменять плавкие вставки предохранителей на рабочих щитках только с разрешения руководителя занятий;
- **не размыкать вторичные обмотки включенных трансформаторов тока!**
- **не размыкать обмотки возбуждения двигателей постоянного тока**

(ДПТ)!

- не допускать холостого хода ДПТ с последовательным возбуждением!

- следить за тем, чтобы частота вращения испытуемых электрических машин не превышала номинальную: ее повышение в допустимых пределах производится только с разрешения руководителя;

- немедленно ставить в известность руководителя занятий о неполадках в работе электрических машин, пускорегулирующей аппаратуры, неисправном состоянии измерительных приборов и соединительных проводов, а также о всех случаях искрения и возгорания.

3.6.3. Организационно-методические указания

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы:

Ознакомиться с устройством и принципом действия трансформатора. Исследовать экспериментальным путем режимы его работы.

План работы:

- Изучить электрическую схему лабораторной установки согласно рис.1.1.

- Изучить порядок проведения работы и получить от преподавателя допуск к работе.

- Выполнить экспериментальное исследование однофазного трансформатора в соответствии с приведенной ниже программой.

- Оформить отчет.

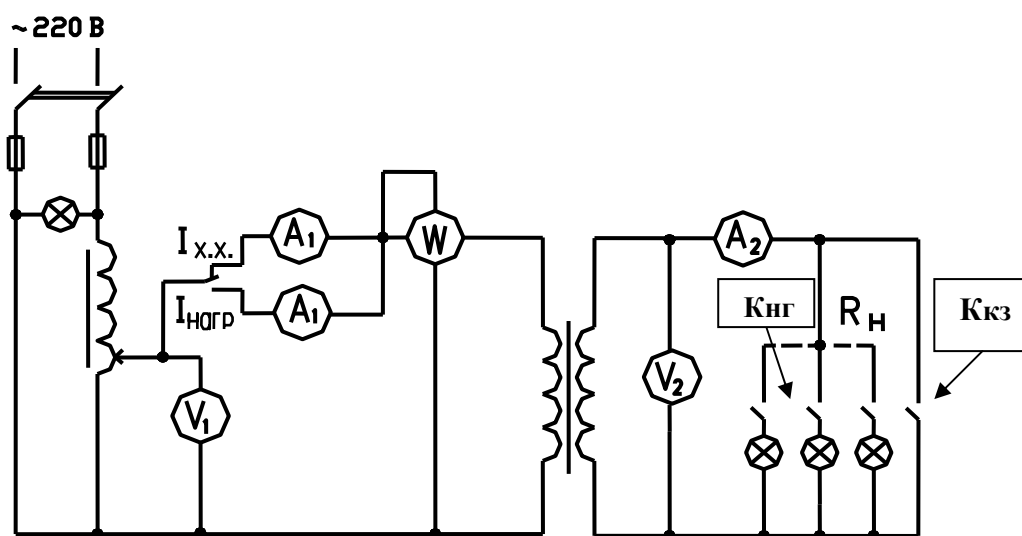


Рис.1.1

Программа экспериментального исследования

1. Проведение опыта холостого тока

1.1. Выбрать и подключить приборы согласно схеме рис.1.1.

1.2. При разомкнутой цепи вторичной обмотки исследуемого трансформатора (контакты $K_{нг}$ и $K_{кз}$ разомкнуты) установить поочередно с помощью автотрансформатора напряжение U_{10} на входе его первичной обмотки 180, 190, 200 и 220 Вольт. По показаниям измерительных приборов определить соответствующие значения тока холостого хода I_{10} и напряжения на выходе вторичной обмотки U_{20} . Результаты измерений внести в табл. 1.1.

1.3. Привести лабораторную установку в исходное состояние.

1.4. Для каждого значения входного напряжения рассчитать величину коэффициента трансформации $k_{тр}$ и параметры контура намагничивания Z_0 , r_0 , x_0 : $k_{тр} = U_{вн}/U_{нн}$; $Z_0 = U_1/I_0$; $r_0 = P_{10}/I_0^2$; $x_0 = \sqrt{(Z_0^2 - r_0^2)}$

1.5. Построить график характеристики $U_{20} = f(I_{10})$.

Таблица 1.1

№ п/п	Данные измерений				Результаты вычислений			
	U_{10}	U_{20}	I_{10}	P_{10}	$k_{тр}$	Z_0	r_0	x_0
	В	В	А	А		Ом	Ом	Ом

2. Исследование трансформатора в режиме нагрузки

2.1. Выбрать амперметр для проведения исследования согласно рис. 1.1.

2.2. Установить на зажимах первичной обмотки исследуемого трансформатора номинальное напряжение $U = 220В$ и поддерживать его постоянным в процессе всего исследования.

2.3. Включая ступенями с помощью контактов $K_{нг}$ ламповый реостат на выходе вторичной обмотки исследуемого трансформатора и постепенно увеличивая ток нагрузки I_2 снять показания приборов для каждого значения этого тока. Показания приборов записать в таблицу 2.

2.4. Привести лабораторную установку в исходное состояние.

2.5. Рассчитать для исследуемого трансформатора значения коэффициента входной мощности $\cos\varphi_1$, активной мощности нагрузки P_2 и коэффициент полезного действия η . Результаты вычислений записать в табл. 1.2.

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1} \quad ; \quad P_2 = U_2 \cdot I_2 \quad ; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}$$

2.6. Построить графики:

а) внешней характеристики трансформатора $U_2 = f(I_2)$;

б) зависимостей $\cos\varphi_1 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$, $P_1 = f(P_2)$.

Таблица 1.2

№ п/п	Данные измерений					Результаты вычислений		
	U ₁	I ₁	P ₁	U ₂	I ₂	cosφ	P ₂	η
	В	А	Вт	В	А		Вт	

3. Проведение опыта короткого замыкания

3.1. Выбрать приборы для опыта согласно рис.1.1.

3.2. При разомкнутых контактах **K_{нр}** и **K_{кз}** установить регулятором лабораторного автотрансформатора (ЛАТРа) нулевое значение напряжения на входе трансформатора (на зажимах первичной обмотки).

3.3. С помощью контакта **K_{кз}** замкнуть накоротко вторичную обмотку исследуемого трансформатора.

3.4. Поочередно с помощью ЛАТРа устанавливая напряжение **U_{1кз}** на зажимах первичной обмотки равное: 4, 5, 6, 7 В определить для каждого значения этого напряжения по показаниям приборов величину первичного тока **I₁**, вторичного тока **I₂** и потребляемой мощности **P_{кз}**. Показания приборов внести в таблицу 1.3.

3.5. Определить напряжение короткого замыкания для номинальных значений токов первичной и вторичной обмоток.

3.6. Привести лабораторную установку в исходное состояние.

3.7. Рассчитать значения модуля комплексного сопротивления короткого замыкания **Z_к** исследуемого трансформатора, а также его активную **r_к** и индуктивную **X_к** составляющие. Результаты вычислений внести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

№ п/п	Данные измерений				Результаты вычислений			
	U _{кз.}	I _{кз1}	P _{кз.}	I _{кз2}	Cosφ ₁	Z _к	r _к	X _к
	В	А	Вт	А		Ом	Ом	Ом

$$Z_K = \frac{U_{K.3.}}{I_{K.3.}} \quad (\text{полное сопротивление}), \quad (I_{K.3.} = I_{кз1}),$$

$$r_K = \frac{P_{K.3.}}{I_{K.3.}} \quad (\text{активная составляющая}),$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2} \quad (\text{индуктивная сопротивление}).$$

3.8. Построить графики зависимостей: $U_1 = f(I_1)$, $P_{к.з.} = f(I_2)$.

Контрольные вопросы к лабораторной работе № 1

1. Какими параметрами характеризуется Т-образная схема замещения трансформатора?
2. Какие опыты необходимо выполнить для определения параметров Т-образной схемы замещения трансформатора? Опишите порядок действий при выполнении экспериментальных исследований
3. Какие электрические принципиальные схемы соответствуют указанным выше опытам?
4. Какие данные необходимо получить непосредственно из опыта? В каких единицах они измеряются?
5. Приведите расчетные соотношения, применяемые для получения параметров Т-образной схемы замещения трансформатора на основании экспериментальных данных.
6. Каким образом на основании параметров схемы замещения трансформатора можно получить значения реальных сопротивлений его первичной и вторичной обмоток?
7. Объясните последовательность действий при экспериментальном определении характеристики холостого хода трансформатора. В каких пределах при этом необходимо изменять входное напряжение?
8. Объясните последовательность действий, выполняемых при экспериментальном определении внешних характеристик трансформатора.
9. Покажите, каким образом на основании полученной схемы замещения трансформатора можно построить векторные диаграммы трансформатора для заданных значений параметров нагрузки (активной, индуктивной и емкостной).
10. При выполнении каких условий может быть обеспечена безаварийная и эффективная параллельная работа трансформаторов?
11. Как экспериментально проверить выполнение всех условий, обеспечивающих безаварийную и эффективную параллельную работу трансформаторов?
12. Какое расхождение в значениях коэффициентах трансформации допускается ГОСТом при параллельном включении трансформаторов?
13. Какое расхождение в значениях напряжений короткого замыкания допускается ГОСТом при параллельном включении трансформаторов?
14. Каким образом можно определить совпадение групп соединений параллельно включаемых трансформаторов?
15. Каковы последствия невыполнения каждого из условий включения трансформаторов на параллельную работу?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель работы:

Ознакомиться с устройством и принципом действия асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АД), получить его рабочие характеристики, исследовать электромеханические свойства АД.

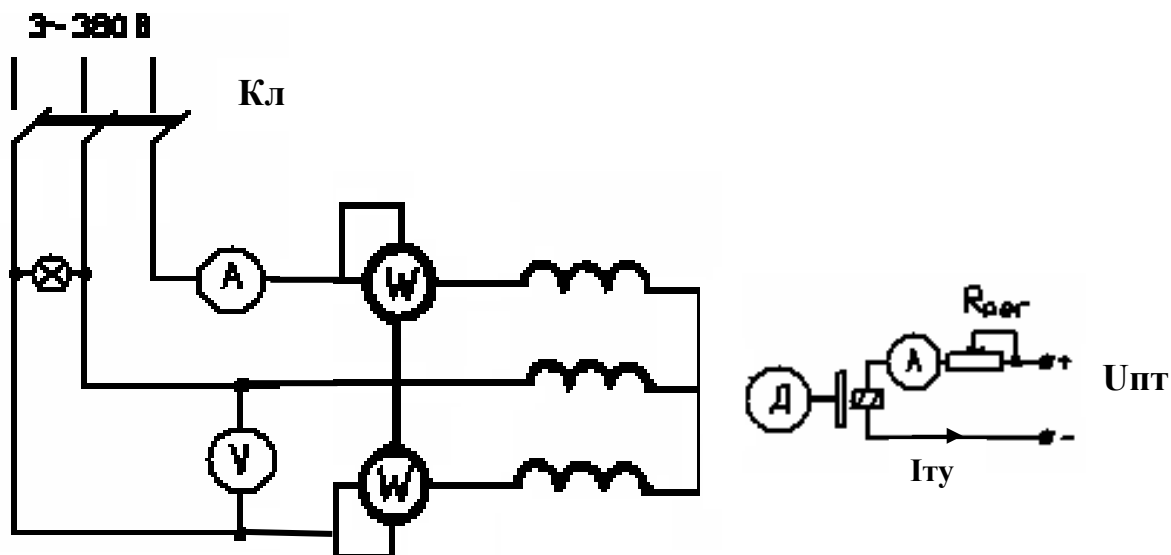


Рис.2.1

Программа экспериментального исследования:

1. Под руководством преподавателя осуществить с помощью выключателя Кл (см. рис.2.1) пуск асинхронного двигателя без нагрузки на валу ($I_{ту} = 0$). Снять показания приборов для установившегося режима холостого хода.

2. Увеличивая нагрузочный момент на валу двигателя (за счет увеличения тока $I_{ту}$ тормозного устройства от нуля до номинального значения) снять показания приборов для нескольких значений нагрузки. Полученные данные занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Данные измерений					Результаты вычислений				
U_L	I_L	P_1	F	n	M	P_2	s	η	$\cos\varphi$
В	А	Вт	Н	об/мин	Нм	Вт	%	%	

$$M = F \cdot r, \quad P_2 = \frac{2\pi \cdot n}{60} \cdot M, \quad s\% = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad \cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L}.$$

где: I_L, U_L - линейный ток и линейное напряжение статора;

P_1 - активная мощность, потребляемая двигателем (Вт);

F - усилие, создаваемое на тормозном диске (Н);

r - расчетный радиус тормозного диска (м);

M - тормозной момент на валу двигателя (Н·м);

P_2 - полезная активная мощность двигателя (Вт);

- s - скольжение;
 η - КПД двигателя.

3. Привести лабораторную установку в исходное состояние.

4. По данным опыта построить графики рабочих характеристик: $n = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$, $\cos\varphi = f(P_2)$ и механической характеристики $n = f(M)$.

Контрольные вопросы к лабораторной работе № 2.

1. Изложите последовательность действий, направленных на определение начал и концов отдельных фаз статорной обмотки АД.
2. Изобразите электрические принципиальные схемы, соответствующие различным стадиям экспериментального определения начал и концов отдельных фаз статорной обмотки АД.
3. Изобразите электрическую принципиальную схему обмоток АД, соответствующую номинальным условиям его включения.
4. Как осуществить реверс АД? Почему бросок тока при реверсе АД зависит от частоты и направления вращения его ротора в момент реверса?
5. Какие причины требуют использовать специальные методы пуска АД?
6. Сравните достоинства и недостатки различных методов пуска АД.
7. Изобразите электрическую принципиальную схему установки, которая позволяет экспериментально определить механическую характеристику АД.
8. Изобразите электрические принципиальные схемы включения АД, соответствующие различным методам регулирования его выходной скорости.
9. Какие методы регулирования выходной скорости АД невозможно применить для короткозамкнутых АД? Почему?
10. Какие методы регулирования выходной скорости АД невозможно применить для АД с фазным ротором? Почему?
11. Расположите последовательно методы регулирования выходной скорости АД с точки зрения величины первоначальных затрат.
12. Расположите последовательно методы регулирования выходной скорости АД с точки зрения потерь энергии при эксплуатации.
13. Расположите последовательно методы регулирования выходной скорости АД с точки зрения плавности и диапазона регулирования.
14. Сравните достоинства и недостатки различных методов регулирования выходной скорости АД.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Цель работы: Ознакомиться с устройством и принципом действия синхронного генератора (СГ). Экспериментально получить основные характеристики СГ.

План работы:

- Ознакомиться с установкой и ее электрической схемой (рис.3.1).
- Изучить порядок проведения работы и получить от преподавателя допуск к работе.
- Выполнить экспериментальное исследование СГ в соответствии с

приведенной ниже программой.

- Оформить отчет.

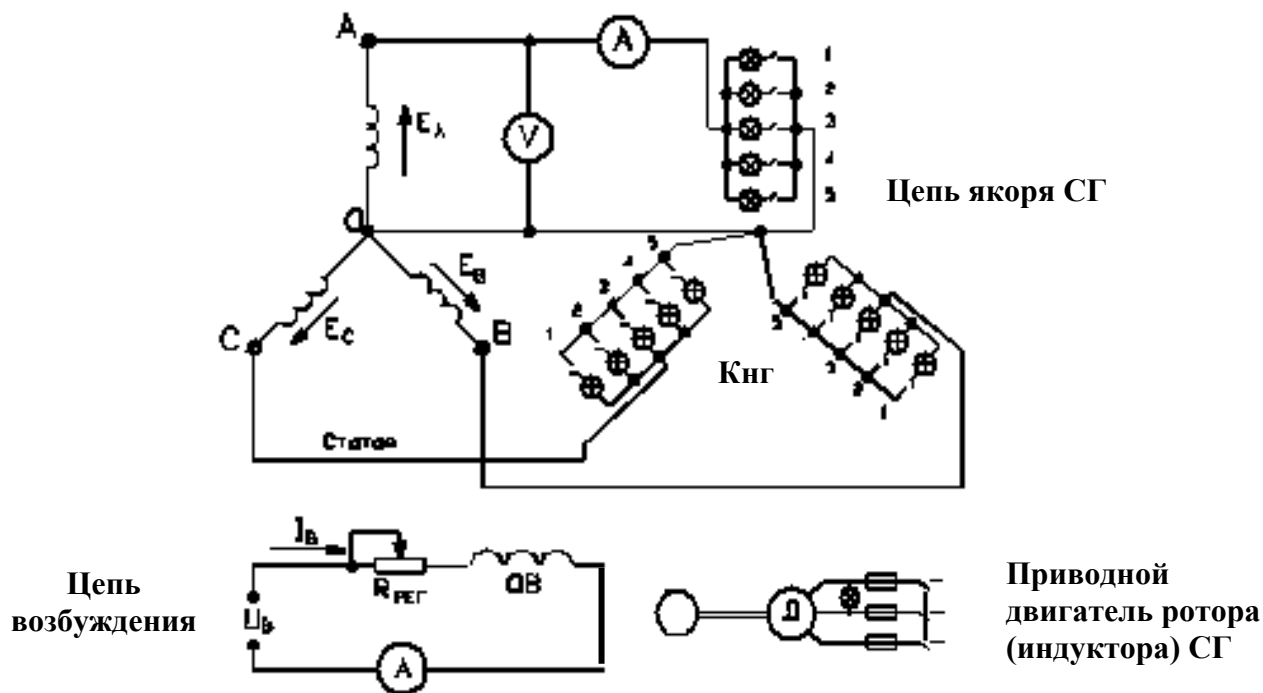


Рис. 3.1.

Программа экспериментального исследования:

1. Получение характеристики холостого хода СГ.

Разомкнуть контакты $K_{нг}$, отключив тем самым ламповый нагрузочный реостат от зажимов якорной (статорной) обмотки СГ.

Осуществить пуск СГ путем подачи с помощью контакта $K_{д}$ трехфазного питания на статорную обмотку асинхронного приводного двигателя (ПД) ротора (индуктора) СГ.

Подать питание на обмотку возбуждения СГ и изменяя его ток возбуждения $I_{в}$ от 0 до величины, при которой ЭДС будет равна $E = E_{н}$, снять показания приборов для нескольких фиксированных значений тока возбуждения (примерно для 5 значений). Полученные данные записать в табл. 3.1.

Таблица 3.1

№ п/п	$I_{в}, (A)$	$E, (B)$

Привести лабораторную установку в исходное состояние.

На основании опытных данных построить график характеристики холостого хода: $E = f(I_{в})$.

2. Получение внешней характеристики СГ

$$(U = f(I_a), \quad \text{при } I_B = \text{const}, \quad n = \text{const})$$

Осуществить пуск СГ путем подачи с помощью контакта $K_{Л}$ трехфазного питания на статорную обмотку асинхронного приводного двигателя (ПД) ротора (индуктора) СГ.

Подать питание на обмотку возбуждения СГ и изменяя его ток возбуждения I_B установить на холостом ходу СГ (контакты $K_{НГ}$ разомкнуты) номинальное значение выходной ЭДС.

За счет поочередного замыкания контактов $K_{НГ}$ постепенно изменять ток нагрузки генератора от 0 до номинальной величины, снимая показания приборов для нескольких фиксированных значений тока нагрузки (примерно для 5 значений). Результаты измерений записать в табл. 3.2.

Привести лабораторную установку в исходное состояние.

Таблица 3.2

№ п/п	Ток якоря (нагрузки) $I_a, (A)$	Выходное напряжение $U, (B)$	Примечание
			$I_B = \text{const}$

2.5. По данным опыта построить график внешней характеристики $U = f(I_a)$.

3. Получение регулировочных характеристик СГ

$$(I_B = f(I_H), \quad \text{при } U = U_H = \text{const}, \quad n = \text{const})$$

3.1. Осуществить пуск СГ путем подачи с помощью контакта $K_{Л}$ трехфазного питания на статорную обмотку асинхронного приводного двигателя (ПД) ротора (индуктора) СГ.

3.2. Подать питание на обмотку возбуждения СГ и изменяя его ток возбуждения I_B установить на холостом ходу СГ (контакты $K_{НГ}$ разомкнуты) номинальное значение выходной ЭДС.

3.3. За счет поочередного замыкания контактов $K_{НГ}$ постепенно изменять ток нагрузки генератора от 0 до номинальной величины и, поддерживая за счет изменения тока возбуждения выходное напряжение СГ, снять показания приборов для нескольких фиксированных значений тока нагрузки (примерно для 5 значений). Результаты измерений записать в таблицу 3.3.

3.4. Привести лабораторную установку в исходное состояние.

Таблица 3.3

№ п/п	Ток якоря $I_a, (A)$	Ток возбуждения $I_B, (A)$	Примечание
			$U = \text{const}$

3.5. По данным опыта построить регулировочную характеристику: $I_B = f(I_a)$ при $U = \text{const}$.

Контрольные вопросы к лабораторной работе № 3

1. Какими сопротивлениями характеризуется якорная цепь **неявнополюсного** синхронного генератора в установившихся режимах работы?
2. Какими сопротивлениями характеризуется якорная цепь **явнополюсного** синхронного генератора в установившихся режимах работы?
3. Какие опыты необходимо выполнить для определения сопротивлений якорной цепи **неявнополюсного** синхронного генератора для установившихся режимов работы?
4. Какие опыты необходимо выполнить для определения сопротивлений якорной цепи **явнополюсного** синхронного генератора для установившихся режимов работы?
5. Опишите порядок действий при выполнении экспериментальных исследований СГ, соответствующих п.п.3 и 4.
6. Приведите расчетные соотношения, применяемые для получения значений сопротивлений якорной цепи синхронных генераторов (п.п. 3,4) на основании экспериментальных данных.
7. Объясните последовательность действий при экспериментальном определении характеристики холостого хода СГ.
8. Объясните последовательность действий, выполняемых при экспериментальном определении внешних характеристик СГ.
9. Покажите, каким образом на основании полученных значений сопротивлений СГ можно построить его векторные диаграммы для заданных значений параметров нагрузки (активной, индуктивной и емкостной).
10. При выполнении каких условий может быть обеспечена безаварийное включение и эффективная параллельная работа СГ?
11. Как экспериментально проверить выполнение всех условий, обеспечивающих безаварийное включение и эффективную параллельную работу СГ?
12. Каким образом определяется момент времени, когда СГ можно подключать параллельно к сети (или к другому СГ)?
13. Каковы последствия невыполнения каждого из условий включения СГ на параллельную работу?
14. Изложите порядок действий, направленных на включение СД в сеть.
15. Изложите порядок действий, направленных на осуществления реверса СД, предварительно включенного в сеть.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы:

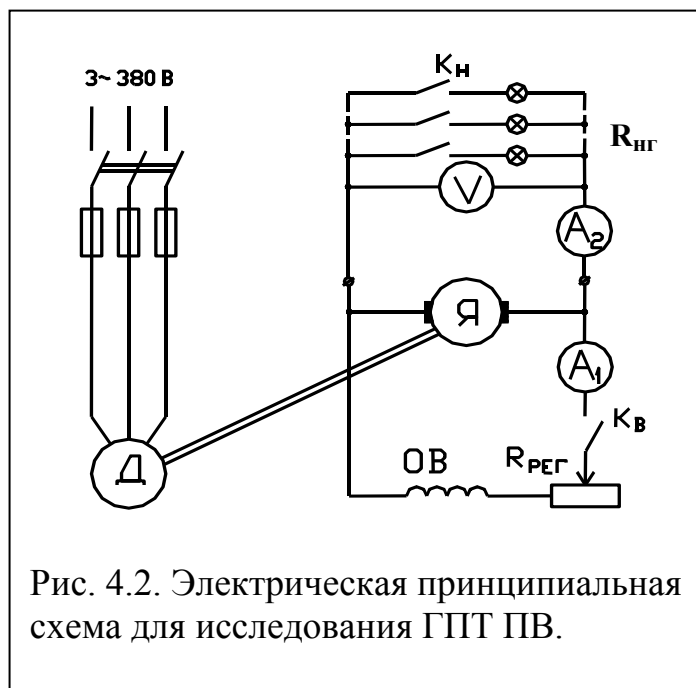
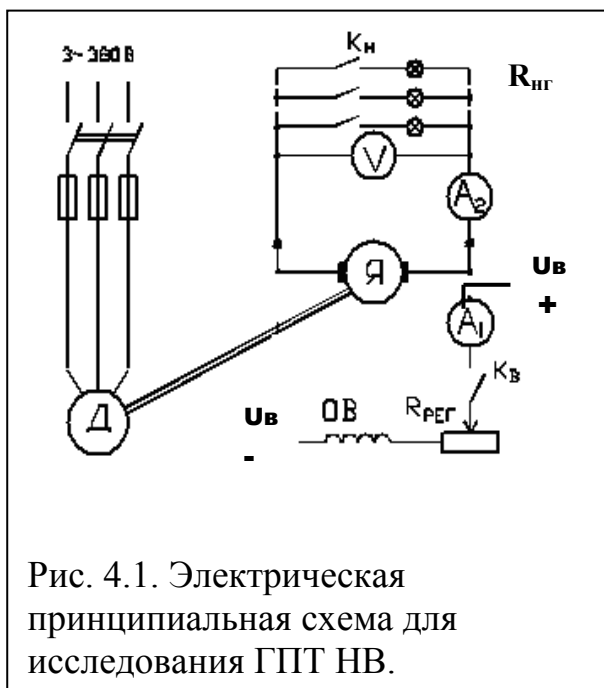
Ознакомиться с конструкцией, принципом действия и схемами включения генератора постоянного тока при независимом (ГПТ НВ) и параллельном (ГПТ ПВ) возбуждении, снять основные характеристики генератора.

План работы:

- Ознакомиться с установкой и экспериментальными электрическими схемами (рис.4.1 и 4.2).
- Изучить порядок проведения работы и получить от преподавателя допуск к работе.
- Выполнить экспериментальное исследование ГПТ ПВ в соответствии с

приведенной ниже программой.

- Оформить отчет.



Программа экспериментального исследования ГПТ

1. Получение характеристики холостого хода

$$(E = f(I_B), \text{ при } I_H = 0, n = \text{const})$$

Характеристику холостого хода ГПТ с учетом получения полной петли гистерезиса можно снять только лишь в схеме ГПТ НВ (рис. 4.1). Необходимо предварительно изучить форму характеристики холостого хода (XXX) и порядок получения всех её восходящих и нисходящих участков. **Обратить внимание на то, что ток возбуждения при снятии ветвей XXX необходимо менять монотонно (в одну и ту же сторону для каждой ветви).**

Подготовить таблицы 4.1.1 – 4.1.5 для записи данных, полученных в п.п. 1.4 – 1.8.

Разомкнуть контакты Кн, Кв и включить питание на приводной двигатель генератора Д.

Снять начальную восходящую ветвь XXX для положительного значения тока возбуждения. Первая точка XXX снимается при $I_B = 0$ (контакт Кв – разомкнут). Далее контакт Кв замыкается и значение тока I_B увеличивается с помощью регулировочного устройства RРЕГ до значения, при котором $E = 1,1U_H$, при этом фиксируются промежуточные значения ЭДС, соответствующие заранее намеченным значениям тока возбуждения (около (4-5 значений)).

Снять нисходящую ветвь XXX для положительного значения тока возбуждения, уменьшая ток возбуждения I_B от максимума до нуля, фиксируя

промежуточные значения ЭДС, соответствующие заранее намеченным значениям тока возбуждения (около (4-5 значений)).

Снять обратную восходящую ветвь ХХХ (для условно «отрицательного» значения тока возбуждения). Для этого при выключенном контакте K_B необходимо поменять местами провода на зажимах обмотки возбуждения. Первая точка ХХХ снимается при $I_B = 0$ (контакт K_B – разомкнут). Далее контакт K_B замыкается и значение тока I_B увеличивается с помощью регулировочного устройства $R_{РЕГ}$ до значения, при котором $E = 1,1U_H$, при этом фиксируются промежуточные значения ЭДС, соответствующие заранее намеченным значениям тока возбуждения (около (4-5 значений)).

Снять обратную нисходящую ветвь ХХХ (для условно «отрицательного» значения тока возбуждения, уменьшая ток возбуждения I_B от максимума до нуля, фиксируя промежуточные значения ЭДС, соответствующие заранее намеченным значениям тока возбуждения (около (4-5 значений)).

Снова снять восходящую ветвь ХХХ (для условно «положительного» значения тока возбуждения). Для этого при выключенном контакте K_B необходимо снова поменять местами провода на зажимах обмотки возбуждения. Далее контакт K_B замыкается и значение тока I_B увеличивается с помощью регулировочного устройства $R_{РЕГ}$ до значения, при котором $E = 1,1U_H$, при этом фиксируются промежуточные значения ЭДС, соответствующие заранее намеченным значениям тока возбуждения (около (4-5 значений)).

Привести лабораторную установку в исходное состояние.

На основании опытных данных построить характеристику холостого хода ГПТ $E = f(I_B)$.

Таблица 4.1.1.

Начальная восходящая петля для «положительного» направления I_B

№ п/п	$E, (В)$	$I_B, (А)$	Примечание
			$I_a = 0$

Таблица 4.1.2.

Нисходящая петля для «положительного» направления I_B

№ п/п	$E, (В)$	$I_B, (А)$	Примечание
			$I_a = 0$

Таблица 4.1.3.

Восходящая петля для «отрицательного» направления I_B

№ п/п	$E, (В)$	$I_B, (А)$	Примечание
			$I_a = 0$

Таблица 4.1.4.

Нисходящая петля для «отрицательного» направления I_B

№ п/п	$E, (B)$	$I_B, (A)$	Примечание
			$I_a = 0$

Таблица 4.1.5.

Восходящая петля для «положительного» направления I_B

№ п/п	$E, (B)$	$I_B, (A)$	Примечание
			$I_a = 0$

2. Определение внешней характеристики ГПТ НВ

$(U = f(I_a), \quad \text{при } n = \text{const} \text{ и } I_B = \text{const}):$

2.1. При разомкнутых контактах K_n, K_b включить питание на приводной двигатель генератора Д (рис. 4.1).

2.2. Возбудить генератор включив контакт K_b . Довести значение выходного напряжения на холостом ходу до номинального значения и занести в таблицу координаты первой точки внешней характеристики.

2.3. Изменяя с помощью поочередного включения контактов K_n ток якоря генератора I_a от 0 до номинальной величины $I_{ан}$ снять показания приборов (5 измерений) и записать их в таблицу 4.2.

2.4. Привести лабораторную установку в исходное состояние.

2.5. По данным опыта построить внешнюю характеристику $U = f(I_a)$.

Таблица 4.2

№ п/п	$U, (B)$	$I_a, (A)$	Примечание
			$I_B = \text{const}$

3. Определение внешней характеристики ГПТ ПВ

$(U = f(I_a), \quad \text{при } n = \text{const} \text{ и } I_B = \text{const})$

3.1. Собрать схему генератора постоянного тока с параллельным возбуждением (рис. 4.2).

3.2. При разомкнутых контактах K_n, K_b включить питание на приводной двигатель генератора Д.

3.3. Возбудить генератор включив контакт K_b и выполнив все условия самовозбуждения. Довести значение выходного напряжения на холостом ходу до номинального значения и занести в таблицу 4.3 координаты первой точки внешней характеристики.

3.4. Изменяя с помощью поочередного включения контактов K_n ток якоря генератора I_a от 0 до номинальной величины $I_{ан}$ снять показания приборов (примерно 5 измерений) и записать их в таблицу 4.3.

3.5. Выключить приводной двигатель генератора и не изменяя состояния схемы закортить выходные зажимы генератора после амперметра А2.

3.6. Снова включить питание на приводной двигатель генератора Д (рис. 4.2), снять и занести в таблицу 4.3.1 координаты внешней характеристики, соответствующие режиму установившегося короткого замыкания ($U = 0$).

3.7. Привести лабораторную установку в исходное состояние.

3.8. По данным опыта построить внешнюю характеристику $U = f(I_a)$.

Таблица 4.3

№ п/п	U, (В)	I _a , (А)	Примечание
			I _B = const

Контрольные вопросы к лабораторной работе № 4

1. Какие электрические принципиальные схемы соответствуют различным типам возбуждения ГПТ?
2. Какая электрическая принципиальная схема соответствует опыту по определению ХХХ ГПТ с учетом получения полной петли гистерезиса?
3. Опишите порядок действий при экспериментальном определении ХХХ ГПТ с учетом получения полной петли гистерезиса.
4. Опишите порядок действий, направленных на создание условий для самовозбуждения ГПТ.
5. Какая электрическая принципиальная схема соответствует опыту по определению внешних и нагрузочных характеристик ГПТ?
6. Опишите порядок действий при экспериментальном определении внешних и нагрузочных характеристик ГПТ.
7. Каким образом, имея ХХХ ГПТ, можно построить график его нагрузочной характеристики? Какие для этого необходимы данные и как их определить?
8. Какими параметрами определяется величина установившегося тока короткого замыкания ГПТ с параллельным возбуждением? Почему ударный ток якоря при внезапном коротком замыкании такого генератора во много раз превышает значение установившегося тока короткого замыкания?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Цель работы:

Ознакомиться с устройством, принципом действия, способами пуска и регулирования выходной скорости двигателей постоянного тока. Научиться снимать основные характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения (ДПТ ПВ).

Программа экспериментального исследования ДПТ

План работы:

- Ознакомиться с установкой, изучить схему лабораторного стенда и

назначение каждого её элемента (рис. 5.1).

- Изучить порядок проведения исследований и получить от преподавателя допуск к работе.
- Выполнить экспериментальное исследование ДПТ ПВ в соответствии с приведенной ниже программой.
- Оформить отчет.

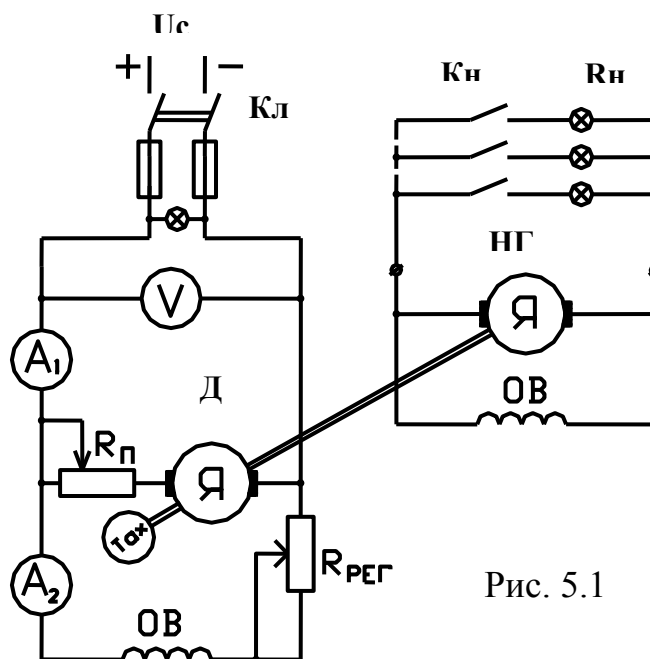


Рис. 5.1

1. Получение естественной внешней характеристики ДПТ ПВ

Получить у преподавателя разрешение на пуск исследуемого двигателя Д. Для пуска двигателя необходимо убедиться, что пусковой реостат $R_{п}$ в цепи якоря полностью введен, а регулировочный реостат $R_{рег}$ в цепи возбуждения полностью выведен. Установить в цепи возбуждения двигателя номинальный ток, после чего включить контакт Кл и, постепенно уменьшая до нуля сопротивление пускового реостата $R_{п}$, пустить двигатель Д в ход, наблюдая при этом за характером изменения его тока якоря.

Снять естественную электромеханическую характеристику ДПТ $n = f(I_a)$ при номинальном напряжении сети, отсутствии дополнительных сопротивлений в цепи якоря, при номинальном токе возбуждения и изменении момента сопротивления на валу двигателя. Для этого:

- убедиться, что пусковой реостат полностью выведен, а по обмотке возбуждения течет номинальный ток;
- за счет поочередного включения контактов $K_{н}$ в цепи якоря нагрузочного генератора НГ постепенно увеличить нагрузку на валу исследуемого двигателя Д до номинального значения, фиксируя при этом значения тока якоря двигателя I_a (амперметр A_1) и соответствующую частоту вращения вала двигателя n (по тахометру), полученные данные (5-6 точек) занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1.

Естественная электромеханическая характеристика ДПТ ПВ

№ п/п	I_a , (А)	n, (об/мин)	Примечание
			$I_{BH} = I_B = \text{const}$ $R_{\Pi} = 0$

2. Получение электромеханической характеристики ДПТ ПВ при введении добавочного сопротивления в цепь якоря (реостатной ЭМХ):

2.1. Ввести в цепь якоря пусковой реостат.

2.2. Выполнить действия указанные в п. 1.2 с введенным в цепь якоря двигателя Д сопротивлением пускового реостата. Полученные данные записать в таблицу 5.2. **Примечание: при увеличении нагрузки реостат в цепи якоря не должен оставаться длительное время!**

Таблица 5.2.

Реостатная электромеханическая характеристика ДПТ ПВ

№ п/п	I_a , (А)	n, (об/мин)	Примечание
			$I_{BH} = I_B = \text{const}$ $0 < R_{\Pi}$

3. Получение электромеханической характеристики ДПТ ПВ при введении добавочного сопротивления в цепь возбуждения (ЭМХ с ослаблением потока):

3.1. Осуществить пуск ДПТ.

3.2. Уменьшить ток возбуждения с помощью регулировочного реостата $R_{рег}$ в цепи обмотки возбуждения, следя за тем, чтобы частота вращения двигателя Д при отсутствии нагрузки на валу превышала номинальную не более чем на 10%.

3.3. Выполнить действия указанные в п. 1.2 с введенным в цепь возбуждения двигателя Д регулировочным сопротивлением. Полученные данные записать в таблицу 5.3.

Таблица 5.3.

Электромеханическая характеристика ДПТ ПВ при ослаблении потока

№ п/п	I_a , (А)	n, (об/мин)	Примечание
			$I_{BH} > I_B = \text{const}$ $R_{\Pi} = 0$

6. По данным, представленным в таблицах 5.1 – 5.3, построить в одних осях 3 электромеханические характеристики ДПТ ПВ $n = f(I_a)$ при различных схемах включения ДПТ. Сравнить полученные характеристики и дать соответствующее заключение о причинах их различий.

Контрольные вопросы к лабораторной работе № 5

1. Изобразите электрические принципиальные схемы включения ДПТ, соответствующие различным типам возбуждения.

2. Почему при пуске ДПТ в цепь якоря необходимо вводить пусковое сопротивление? Почему его можно закортить после разгона ДПТ?

3. Как определить сопротивление пускового сопротивления ДПТ?

4. Изобразите электрическую принципиальную схему установки, которая позволяет экспериментально определить механическую характеристику ДПТ.

5. Изобразите электрические принципиальные схемы включения ДПТ, соответствующие различным методам регулирования его выходной скорости.

6. Расположите последовательно методы регулирования выходной скорости ДПТ с точки зрения величины первоначальных затрат.

7. Расположите последовательно методы регулирования выходной скорости ДПТ с точки зрения потерь энергии при эксплуатации.

8. Расположите последовательно методы регулирования выходной скорости ДПТ с точки зрения плавности и диапазона регулирования.

9. Почему ДПТ, якорная обмотка которого подключена к сети, нельзя оставлять без возбуждения? Какие ограничения в связи с этим накладываются на условия использования ДПТ с последовательным возбуждением?

**Образец оформления титульного листа отчета о выполнении
лабораторных работ**

**СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра электротехники и электромеханики

Дисциплина: **Электрические машины**

**ОТЧЕТ
о выполнении лабораторной работы**

наименование лабораторной работы

Шифр и Ф.И.О. студента: _____

**Шифр и наименование
специальности:** _____

Форма обучения: _____

Курс: _____

Преподаватель: _____
должность преподавателя по кафедре, Ф.И. О.

Отметка о зачете: _____

Дата: _____

**Санкт-Петербург
200__**

3.7. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

3.7.1. Введение и общие рекомендации

Тематика и материал практических занятий должны соответствовать основным разделам дисциплины: «Трансформаторы», «Асинхронные машины», «Синхронные машины», «Машины постоянного тока».

Для получения зачета по материалу практических занятий студенты очной формы подготовки должны представить преподавателю «Рабочую тетрадь по практическим занятиям» (образец титульного листа представлен ниже) с решениями расчетно-практических заданий в соответствии со своим вариантом.

Практические занятия для студентов различных форм обучения организованы в соответствии с формами проведения занятий (аудиторные, ДОТ), предусмотренных тематическими планами (см. п.п. 2.2.3 и п. 2.5).

Каждому студенту выдаются индивидуальные расчетно-практические задания в соответствии с номером соответствующего варианта. **Для этих целей используются исходные данные для выполнения контрольных работ, представленные в п. 4.2.**

Для студентов очно-заочной и заочной форм обучения практические занятия служат организационной и методической основой для выполнения контрольных работ (подробнее см. п.4.2)

Общее и минимально необходимое количество рейтинговых баллов, которое можно набрать по результатам выполнения расчетно-практических заданий и контрольных работ, указано в п. 2.6.1 настоящего учебно-методического комплекса.

3.7.2. Методические указания к решению задач

ТРАНСФОРМАТОРЫ

1. Программа расчета

1.1. Рассчитать параметры схемы замещения трансформатора.

1.2. Построить в масштабе векторные диаграммы для следующих случаев:

- для режима холостого хода;
- при коэффициенте загрузки трансформатора $\beta = 1$ и коэффициенте мощности $\text{Cos } \varphi_2 = 1$;
- при $\beta = 0,5$ и $\text{Cos } \varphi_2 = 0,85$ при активно-индуктивной нагрузке;

1.3. найти значения коэффициента полезного действия (КПД) при заданных нагрузках;

1.4. найти напряжения на нагрузке с учетом падения напряжения в трансформаторе.

1.5. дать краткую характеристику конструкции и назначения трансформатора (на основании его буквенно-цифрового обозначения).

2. Исходные данные

S_H - номинальная полная мощность трансформатора;

U_{1H} и U_{2H} - номинальные значения напряжения первичной и вторичной обмотки;

$u_k \%$ - напряжение короткого замыкания в процентах от U_{1H} ;

$I_0 \%$ - ток холостого хода в процентах от номинального тока I_{1H} ;

P_k - активная мощность, потребляемая трансформатором в опыте короткого замыкания;

P_0 - активная мощность, потребляемая трансформатором в опыте холостого хода;

f - частота сети 50 Гц, что соответствует цикловой частоте $\omega = 2\pi f = 314 \text{ c}^{-1}$.

Если исходные данные относятся к трехфазным трансформаторам, то перед началом решения задачи необходимо привести все заданные параметры к одной фазе, полагая, что обмотки трансформатора соединены или по схеме «Y-Y» (при $U_{2нл} = 400 \text{ В}$), или по схеме «Y-Δ» (при $U_{2нл} = 230 \text{ В}$), т. е. для схемы «Y-Y»:

$$U_{1H} = U_{1нл} / \sqrt{3}; \quad U_{2H} = U_{2нл} / \sqrt{3}; \quad S_H = S_{н3} / 3; \quad P_0 = P_{03} / 3; \quad P_k = P_{к3} / 3,$$

для схемы «Y-Δ»:

$$U_{1H} = U_{1нл} / \sqrt{3}; \quad U_{2H} = U_{2нл}; \quad S_H = S_{н3} / 3; \quad P_0 = P_{03} / 3; \quad P_k = P_{к3} / 3.$$

Величины, стоящие в числителях правых частей приведенных выше формул, взяты из представленной ниже таблицы исходных данных, а в левых частях этих формул стоят используемые в дальнейших расчетах величины, относящиеся к одной фазе трехфазного трансформатора.

3. Порядок выполнения расчетов и расчетные формулы (см также [1] ч.2, с. 30-47, 62-67, 79-84)

3.1. Расчет параметров схемы замещения трансформатора по данным опыта холостого хода и короткого замыкания

Коэффициент трансформации $k_{тр} = U_{1H} / U_{2H}$;

Номинальный ток первичной обмотки $I_{1H} = S_H / U_{1H}$;

Ток холостого хода $I_0 = I_0 \% I_{1H} / 100$;

Напряжение короткого замыкания $U_k = u_k \% U_{1H} / 100$.

3.1.1. Опыт холостого хода

Данные опыта холостого хода позволяют определить параметры контура намагничивания для схемы замещения трансформатора на основании следующего.

В режиме холостого хода напряжение, приложенное к первичной цепи

трансформатора почти полностью уравнивается ЭДС, наводимой в его первичной обмотке. Поэтому ток холостого хода трансформатора составляет всего несколько процентов от его номинального тока.

Для указанных условий в схеме замещения трансформатора можно пренебречь падением напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях первичной обмотки и упростить её до схемы, содержащей только лишь элементы контура намагничивания (рис.1).

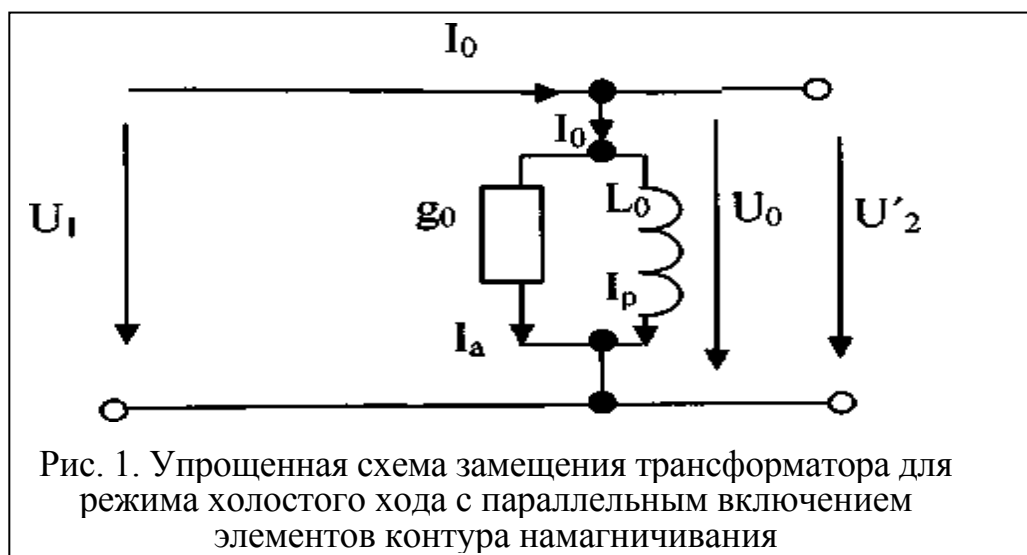
В этом случае $U_1 = U_0 = U'_2 = U_{1н}$.

Мощность потерь холостого хода, выделяемая на активном элементе контура намагничивания проводимостью g_0

$$P_0 = g_0 U_{1н}^2.$$

Отсюда активная проводимость контура намагничивания (1/Ом):

$$g_0 = P_0 / U_{1н}^2.$$



Ток I_a через активный элемент g_0 совпадает по фазе с приложенным напряжением U_0 , а ток I_p через индуктивность L_0 отстает от напряжения на четверть периода (90°). Так как напряжение к этим элементам приложено одно и то же, то сдвиг по фазе между векторами токов I_p и I_a также равен 90° . Векторная сумма этих токов равна общему току I_0 , потребляемому трансформатором на холостом ходу, то есть:

$$I_p + I_a = I_0$$

Определим действующие значения этих токов, а затем и параметры элементов по которым они протекают:

$$I_a = U_{1н} \cdot g_0 ; \quad I_p = \sqrt{I_0^2 - I_a^2} ; \quad b_0 = I_p / U_{1н} ; \quad L_0 = 1 / (\omega \cdot b_0)$$

где: b_0 - реактивная проводимость контура намагничивания; L_0 - индуктивность намагничивания.

3.1.2. Опыт короткого замыкания

Данные опыта короткого замыкания позволяют определить активные и индуктивные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора на основании следующего.

В опыте короткого замыкания к первичной обмотке трансформатора приложено напряжение, составляющее всего несколько процентов от номинального, вследствие чего магнитный поток трансформатора и потери в стали (пропорциональные квадрату магнитной индукции в сердечнике) также ничтожно малы. Это обстоятельство позволяет упростить схему замещения трансформатора за счет отбрасывания контура намагничивания (рис.2).

По упрощенной схеме замещения рис.2 видно, что в первичной и вторичной цепи трансформатора течет один и тот же ток, а все элементы включены последовательно. Обычно в таких схемах объединяют все последовательно включенные однородные элементы (активные или индуктивные сопротивления), заменив их одним (рис.3).

У большинства трансформаторов индуктивности рассеяния и активные сопротивления первичных обмоток равны приведенным индуктивностям рассеяния и активным сопротивлениям вторичных обмоток, поэтому:

$$L_k = L_{p1} + L'_{p2} = 2 L_{p1};$$

$$r_k = r_1 + r'_2 = 2 r_1;$$

и соответственно

$$Z_k = Z_1 + Z'_2 = 2 Z_1;$$

$$x_k = x_1 + x'_2 = 2 x_1.$$

Модуль полного комплексного сопротивления короткого замыкания трансформатора:

$$Z_k = U_k / I_{1н}$$

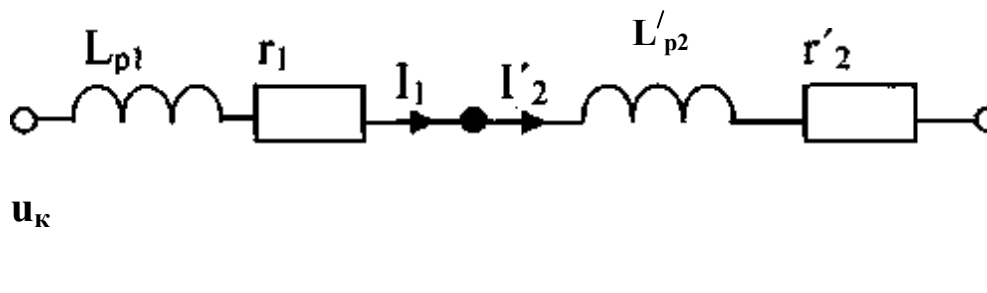


Рис.2. Упрощенная схема замещения трансформатора для опыта короткого замыкания

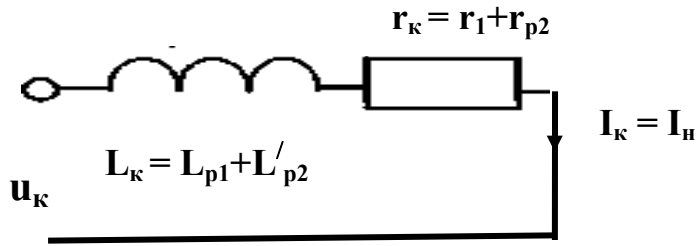


Рис.3. Упрощенная схема замещения трансформатора для опыта короткого замыкания с объединенными элементами

Остальные параметры:

$$r_1 = r'_2 = 0,5 \cdot U_{1k}^2 / P_k, \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - (2r_1)^2}, \quad L_{1p} = L'_{2p} = 0,5 \cdot x_k / \omega$$

Через x_k здесь обозначено общее реактивное (индуктивное) сопротивление короткого замыкания.

Найденные параметры вторичной цепи помечены штрихом, т.е. являются приведенными.

С учетом правил приведения вторичной обмотки к первичной найдем реальные параметры вторичной цепи:

$$r_2 = r'_2 / k_{тр}^2;$$

$$L_{2p} = L'_{2p} / k_{тр}^2;$$

$$x_2 = x'_2 / k_{тр}^2 = 2\pi f L_{2p} = \omega L_{2p}.$$

Схема замещения трансформатора, соответствующая указанным выше соображениям и расчетам, представлена на рис. 4.

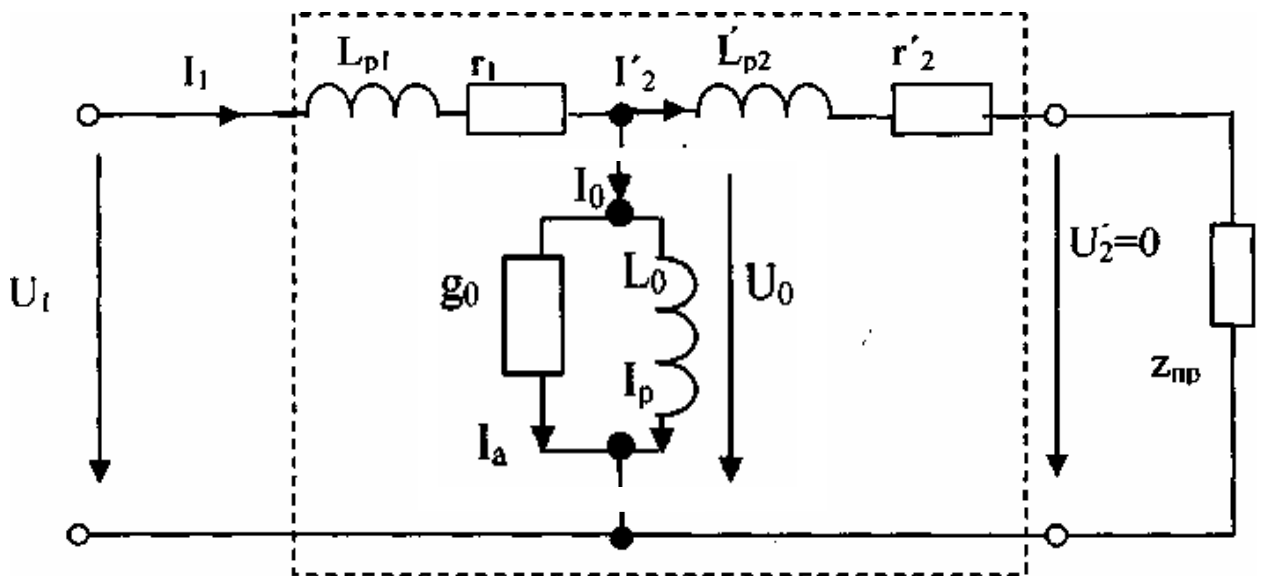


Рис.4. Т-образная схема замещения с параллельным включением элементов контура намагничивания

3.2. Расчет и построение векторных диаграмм

Для построения векторных диаграмм и анализа режимов работы трансформатора чаще используют Т-образную схему замещения, у которой контур намагничивания представлен последовательным соединением активного r_0 и индуктивного x_0 сопротивлений холостого хода (рис.5).

Для того, чтобы привести параллельную схему контура намагничивания (рис. 4) к последовательной схеме (рис.5) необходимо применить известную формулу замены параллельного соединения сопротивлений последовательным соединением в комплексной форме. При этом

$$\underline{Z}_0 = r_0 + jx_0 = 1/\underline{Y}_0 = 1/(g_0 + jb_0) = (g_0 - jb_0)/((g_0 + jb_0) \cdot (g_0 - jb_0)) = g_0/(g_0^2 + b_0^2) - jb_0/(g_0^2 + b_0^2)$$

Из последней формулы видно, что

$$r_0 = g_0/(g_0^2 + b_0^2), \text{ а } jx_0 = -jb_0/(g_0^2 + b_0^2)$$

А схема приобретает следующий вид

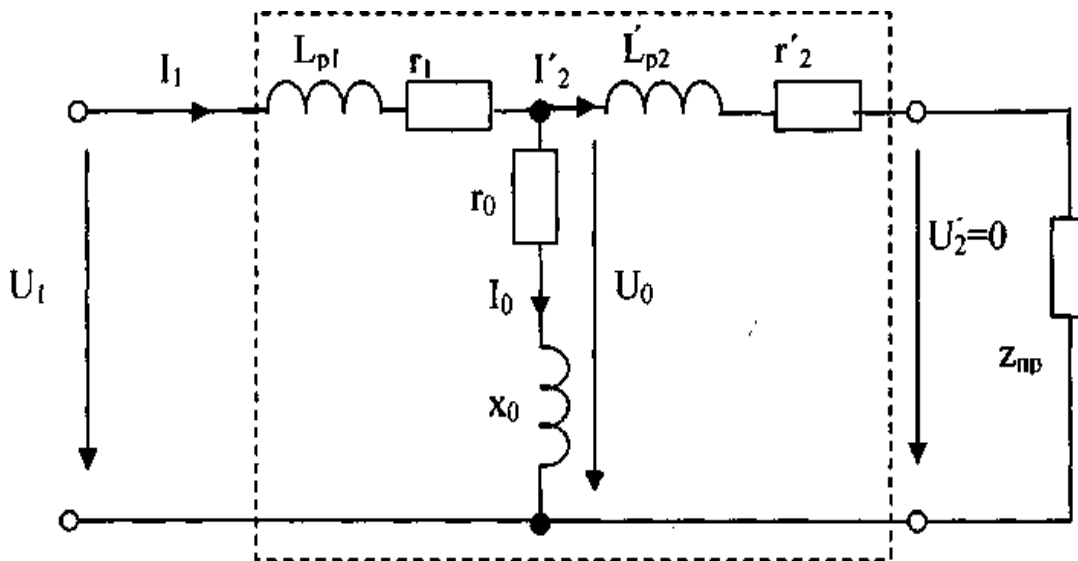


Рис.5. Т-образная схема замещения с последовательным включением элементов контура намагничивания

Перед расчетом необходимых параметров и построением векторных диаграмм нужно сначала определиться с базовым (начальным) вектором.

Удобнее всего в качестве такого вектора взять вектор \underline{U}_0 (рис.4 и рис.5), для которого выполняется следующее условие:

$$\underline{U}_0 = -\underline{E}_1 = -\underline{E}'_2.$$

Модуль и положение вектора тока \underline{I}_0 удобнее определить на основании выполненных выше расчетов для схемы замещения рис. 4.

При этом необходимо учесть следующее:

- Вектор тока \underline{I}_0 состоит из активной \underline{I}_a и реактивной \underline{I}_p составляющих.
- Активная составляющая \underline{I}_a совпадает по фазе с вектором напряжения \underline{U}_0 (находится в противофазе с векторами \underline{E}_1 и \underline{E}_1).
- Модуль вектора $I_a = U_0 g_0$.
- Реактивная составляющая \underline{I}_p отстаёт от вектора напряжения \underline{U}_0 на 90° (опережает вектора \underline{E}_1 и \underline{E}_1 на 90°).
- Модуль вектора $I_p = U_0 b_0$.

Дальнейшее построение векторных диаграмм трансформатора производится на основании схемы замещения рис.5 и уравнений электрического равновесия первичной и вторичной цепей по известным правилам с учетом принятого в электротехнике взаимного расположения векторов токов и напряжений на активных и реактивных элементах схем (см. [1], ч.2 с. 43-47, а также тему 2.3 опорного конспекта (п.3.2 УМК).

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

1. Программа расчета

На основании паспортных данных асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

1.1. Определить:

- число пар полюсов обмотки двигателя p ;
- частоту вращения магнитного поля в рабочем зазоре n_1 ;
- скольжение при номинальной нагрузке s_n ;
- активную мощность, потребляемую двигателем из электросети P_1 в номинальном режиме;
- номинальный и пусковой токи статора I_H и I_{Π} .

1.2. Рассчитать и построить механическую характеристику асинхронного двигателя (АД) в осях $M_{\text{ЭМ}} = f(n_2)$ и $M_{\text{ЭМ}} = f(s)$ с обязательным отображением на ней номинального ($M_{\text{ЭМ}} = M_H, n_2 = n_H$) пускового ($M_{\text{ЭМ}} = M_{\Pi}, n_2 = 0$) и критического ($M_{\text{ЭМ}} = M_{\text{МАХ}}, n_2 = n_{\text{кр}}$) режимов.

1.3. На основании обозначения типа асинхронного двигателя дайте краткую характеристику его конструкции и назначения.

Во всех вариантах считать, что все двигатели, представленные в табл.2.1 рассчитаны на номинальное линейное напряжение 380 В при включении трехфазных обмоток якоря (статора) звездой и на номинальное линейное напряжение 220 В при включении их треугольником.

2. Исходные данные

- P_H – номинальная мощность, развиваемая двигателем на валу (P_{2H}), кВт;
- n_H – номинальная частота вращения вала двигателя (об/мин);
- η_H – КПД двигателя в номинальном режиме, %;

$\cos \varphi$ - коэффициент мощности со стороны сети (цепи обмотки статора);

$k_{\text{Мкр}}$ – кратность максимального (критического) момента АД на естественной характеристике по отношению к номинальному моменту;

$k_{\text{мп}}$ – кратность пускового момента АД на естественной характеристике по отношению к номинальному моменту;

k_I – кратность пускового тока АД на естественной характеристике по отношению к номинальному току.

3. Порядок выполнения расчетов и расчетные формулы (см. также [1] ч.4, с. 5-64)

3.1. Для выполнения п. 1.1 задания ключевыми являются следующие соотношения.

3.1.1. Угловая скорость вращения магнитного поля ω_1 (синхронная скорость, рад/с) равна циклической частоте ω_0 напряжения сети, деленной на число пар полюсов обмотки якоря (статора)

$$\omega_1 = \omega_0 = 2\pi f_1 \quad (1)$$

На практике вместо угловой скорости используют понятие частоты вращения n (об/мин), которая измеряется количеством оборотов в минуту. В этом случае выражение (1) примет следующий вид:

$$n_1 = 60\omega_1/2\pi = 60f_1 / p \quad (2)$$

На основании соотношения (2) можно составить следующую таблицу фиксированных значений частот вращения магнитного поля n_1 создаваемого симметричной трехфазной статорной обмоткой, подключенной к симметричной трехфазной системе напряжений стандартной частоты 50 Гц в зависимости от количества пар полюсов p , на которое выполнена обмотка:

Таблица 2.2.

Стандартные соотношения между p и n_1 (для $f_1 = 50$ Гц)

p	1	2	3	4	5	6
n_1 (об/мин)	3000	1500	1000	750	600	500

3.1.2. Скольжением s , соответствующим частоте вращения поля n_1 и частоте вращения ротора n_2 называется величина, определяемая следующим соотношением:

$$s = (n_1 - n_2) / n_1 \quad (3)$$

Так как номинальная частота вращения n_n АД общепромышленного исполнения отличается от синхронной частоты вращения всего на несколько процентов, то **в качестве синхронной частоты вращения нужно принять стандартное значение (из таблицы 2), ближайшее по значению к номинальной частоте вращения.**

Величину скольжения для номинального режима можно определить непосредственно по соотношению (3).

3.1.3. Для определения числа пар полюсов p обмотки якоря необходимо

обратиться непосредственно к табл. 2.2 или воспользоваться соотношением (2).

3.1.4. Активную мощность P_1 , потребляемую двигателем из сети в номинальном режиме найдем по заданной номинальной мощности и коэффициенту полезного действия:

$$P_1 = P_n / \eta_n \quad (4)$$

В формуле (4) КПД η_n необходимо подставлять не в %, а в долях от единицы (то есть, например, не 85, а 0,85).

3.1.4. Номинальный линейный ток якоря АД $I_{1нл}$ можно определить на основании формулы мощности для трехфазной системы токов.

При соединении обмоток якоря «звездой»:

$$P_1 = 3U_{1ф} I_{1ф} \cos \varphi = (U_{1л} 3 / \sqrt{3}) I_{1л} \cos \varphi = U_{1л} \sqrt{3} I_{1л} \cos \varphi ,$$

откуда

$$I_{1лн} = P_{1н} / (U_{1лн} \sqrt{3} \cos \varphi) \quad (5)$$

При соединении обмоток якоря «треугольником»

$$P_1 = 3U_{1ф} I_{1ф} \cos \varphi = U_{1л} (I_{1л} 3 / \sqrt{3}) \cos \varphi = U_{1л} I_{1л} \sqrt{3} \cos \varphi$$

откуда для $I_{1лн}$ также получается соотношение (5).

3.1.5. Пусковой ток найдем по заданному в таблице 2.1 коэффициенту кратности пускового тока (по отношению к номинальному току)

$$I_{1Пуск} = k_I I_{1н} \quad (6)$$

3.2. Для расчета механических характеристик $M_{эм} = f(s)$ асинхронных двигателей средней и большой мощности допустимо применение упрощенной формулы Клосса

$$M = 2 M_{кр} / [(s / s_{кр}) + (s_{кр} / s)] \quad (7)$$

Записав уравнение (6) для номинального режима (естественной механической характеристики) и решив его относительно $s_{кр}$ получим

$$s_{кр} = s_n [k_M + \sqrt{(k_M^2 - 1)}] , \quad (8)$$

где: $k_M = M_{кр} / M_n$.

Уравнение (7) после подстановки в него значения $s_{кр}$ из (8) позволяет по каталожным данным АД построить его механическую характеристику, задаваясь произвольными значениями скольжения s и получая соответствующие значения электромагнитного момента M .

Максимальный (критический) каталожный момент определяется по значению его кратности (по отношению к номинальному моменту), заданному

в таблице.

Точку номинального режима (для контроля) можно получить также исходя из номинальных данных АД используя формулу для определения величины мощности на валу двигателя

$$P_2 = \sim M_2 \omega_2 = 2\pi n_2 M_2 / 60 \quad (9)$$

Откуда для номинального режима ($M_2 = M_n$; $P_2 = P_n$; $n_2 = n_n$)

$$M_n = 9,55 P_n / n_n \quad (10)$$

Примечание: в приведенных выше формулах необходимо перевести мощность из киловатт в ватты.

3.3. Для описания конструкции и назначения машины по её буквенно-цифровому обозначению необходимо изучить [1], ч.1, с. 48-57; ч.4, с.137-145.

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

1. Программа расчета

На основании исходных данных синхронной машины (см. табл. 3.1 и табл. 3.2):

1.1. Построить векторные диаграммы для неявнополюсного (НЯП) и явнополюсного (ЯП) синхронного генератора (СГ) для номинального режима работы.

1.2. Построить угловую характеристику ЯПСГ при номинальных значениях параметров питания и сопротивлений (значение E_0 определить на основании векторной диаграммы). Указать запас статической устойчивости СМ.

1.3. Определить отношение короткого замыкания (ОКЗ) ЯПСГ.

2. Исходные данные для расчетов параметров и режимов работы синхронной машины

Ниже в качестве исходных данных для расчета даны: в табл.3.1 - характеристика холостого хода СГ, а в табл. 3.2 - в соответствии с вариантом следующие параметры 3-х фазного синхронного генератора (соединение фаз – Y):

S_n – полная номинальная мощность;

n_n - номинальная (синхронная) частота вращения;

$\cos \varphi_n$ – номинальный коэффициент мощности;

$U_{нл}$ – номинальное линейное напряжение;

R_a , $X_{сн}$, X_d , X_q , X_s – сопротивления якоря соответственно: активное, синхронное индуктивное (для случая НЯПСГ), индуктивное по продольной оси

и индуктивное по поперечной осям (для случая ЯПСГ), рассеяния;
 W_1 – число витков фазы статора.

3. Порядок выполнения расчетов и расчетные формулы (см также [1] ч.5, с.с. 13-18)

3.1. Построение векторных диаграмм для неявнополюсного (НЯП) и явнополюсного (ЯП) синхронного генератора (СГ) для номинального режима работы.

Если пренебречь, ввиду относительной малости, величиной активного сопротивления якорной цепи ($R_a \ll x_a + x_s$), то расчеты можно вести с использованием упрощенных уравнений электрического равновесия и векторных диаграмм цепи якоря синхронной машины, приведенных ниже.

На векторной диаграмме ненасыщенного неявнополюсного синхронного генератора (см. рис.1а) параметр x_c называется синхронным индуктивным сопротивлением якоря, при этом

$$x_c = x_a + x_s \quad . \quad (1)$$

На векторной диаграмме ненасыщенного явнополюсного синхронного генератора (см. рис.1б)

$$x_d = x_{ad} + x_s \quad ; \quad (2)$$

$$x_q = x_{aq} + x_s \quad . \quad (3)$$

Для случая НЯП СМ (рис. 1а) определение всех составляющих и построение векторной диаграммы очевидно и не вызывает затруднений.

Для случая ЯП СМ (рис. 1б) затруднение вызывает необходимость разложения полного тока якоря на две составляющие относительно вектора \underline{E}_0 : активную или поперечную \underline{I}_q и индуктивную или продольную \underline{I}_d для чего необходимо определить положение линии, на которой находится вектор ЭДС холостого хода СГ (\underline{E}_0).

Для определения положения этой линии необходимо из вершины вектора \underline{U} провести перпендикулярно к вектору полного тока якоря \underline{I} отрезок BD (рис. 1б), длина которого равна произведению действующего значения полного тока на индуктивное сопротивление по поперечной оси x_q , т.е.

$$BD = I x_q \quad . \quad (4)$$

После того, как будет определено положение прямой OD, по которой направлен вектор ЭДС \underline{E}_0 вектор полного тока якоря \underline{I} можно разложить на поперечную \underline{I}_q (совпадает по фазе с вектором \underline{E}_0) и индуктивную или продольную \underline{I}_d (отстаёт от вектора \underline{E}_0 на 90°).

Дальнейшие расчеты и построения не вызывают никаких затруднений: если

к вектору \underline{U} прибавить последовательно вектора $\underline{I}_q x_q$ и $\underline{I}_d x_d$, то получим вектор \underline{E}_0 , завершающий векторную диаграмму ЯП СГ.

3.2. Построение угловой характеристики ЯПСГ в виде зависимости электромагнитного момента M_ψ от угла нагрузки θ при номинальных значениях параметров питания и сопротивлений выполняем на основании следующего уравнения, задаваясь произвольными значениями угла θ от 0 до 180° :

$$M_\psi = \frac{P_\psi}{\omega_c} = \frac{mUE_0}{\omega_c x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\omega_c} \left[\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right] \sin 2\theta = M_\theta + M_{2\theta} \quad (5)$$

При этом расчеты вести удобно отдельно для активной составляющей момента M_θ и реактивной составляющей момента $M_{2\theta}$, занося данные расчета сначала в 2 отдельные строки таблицы (табл. 3), а затем суммируя значения моментов для одних и тех же значений угла θ определить суммарную угловую характеристику (рис. 2).

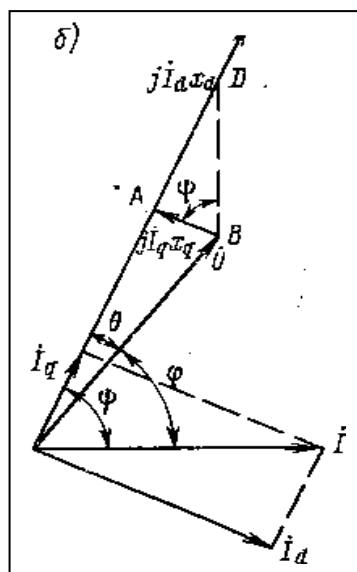
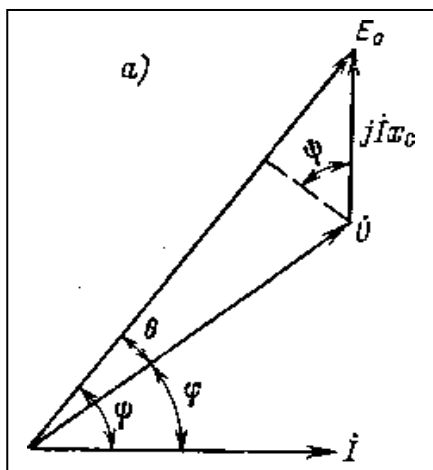


Рис. 1. Упрощенные векторные диаграммы цепи якоря неявнополюсной (а) и явнополюсной (б) синхронной машины

Величина E_0 определяется на основании векторной диаграммы (см. п.3.1).

Для определения запаса устойчивости по моменту и углу нагрузки необходимо определить по исходным данным значение номинального электромагнитного момента и нанести его значение на график угловой характеристики.

Разность между $M_{\psi \max}$ и значением номинального электромагнитного момента даст искомое значение запаса статической устойчивости СМ по моменту.

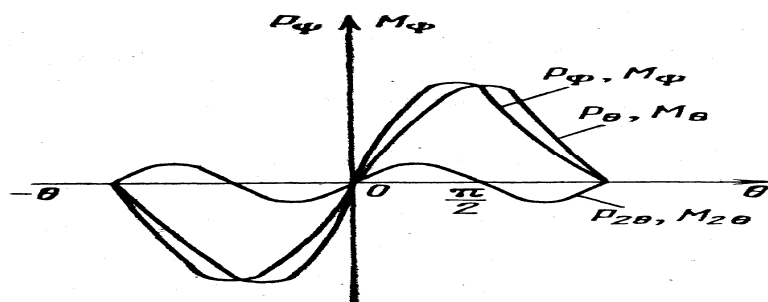


Рис. 2. Угловая характеристика явнополюсной синхронной машины

Разность между θ_{\max} , соответствующим $M_{\psi \max}$ и значением θ_n , соответствующим номинальному электромагнитному моменту даст искомое значение запаса статической устойчивости СМ по углу нагрузки.

θ , град	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
$\sin \theta$													
M_{θ}													
$\sin 2\theta$													
$M_{2\theta}$													
M_{ψ}													

3.3. Отношение короткого замыкания (ОКЗ) СГ имеет важное значение для эксплуатационных свойств СГ, так как отражает перегрузочную способность СМ (см. уравнение угловой характеристики).

Обычно ОКЗ определяют как отношение установившегося тока симметричного короткого замыкания СГ к его номинальному току при номинальном токе возбуждения. Так как установившийся ток короткого замыкания

$$I_{\text{кз уст}} = U_n / x_d$$

то

$$\text{ОКЗ} = U_n / I_n x_d = 1 / x_d^* \quad (6)$$

где x_d^* - относительное значение индуктивного сопротивления по продольной оси (задано в таблице исходных данных).

Примечание: для НЯП СГ вместо x_d^* используется сопротивление $x_{\text{сн}}^*$.

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Программа расчета

На основании исходных данных машины постоянного тока (см. табл. 4.1 и табл. 4.2):

1.1. Построить механическую характеристику для двигательного режима.

1.2. Подобрать пусковой реостат $R_{п}$, чтобы в момент пуска ток якоря не превышал предельного значения для данного двигателя.

1.3. Найти коэффициент полезного действия двигателя η_n при номинальной нагрузке.

1.4. Рассчитать сопротивление $R_{вд}$, которое надо ввести в цепь обмотки возбуждения для того, чтобы увеличить частоту вращения двигателя при номинальном токе якоря на 10%. Какова при этом величина электромагнитного момента, развиваемая двигателем?

1.5. Рассчитать сопротивление, которое надо ввести в цепь обмотки якоря, чтобы уменьшить частоту вращения на 10% при номинальном моменте сопротивления на валу. Какова при этом будет величина тока якоря?

1.6. Определить частоту вращения, с которой необходимо вращать вал рассмотренной выше МПТ чтобы она, работая в режиме генератора с параллельным возбуждением, обеспечивала на выходе номинальное напряжение при номинальном токе якоря.

2. Исходные данные

P_n – номинальная мощность, развиваемая двигателем на валу (P_{2n}), кВт;

n_n – номинальная частота вращения вала двигателя (об/мин);

I_n – ток, потребляемый МПТ из сети в номинальном двигательном режиме;

R_a – сопротивление внутренней части цепи якоря (Ом);

R_v – сопротивление параллельной (независимой) обмотки возбуждения (Ом);

k_I – максимально допустимая кратность тока якоря при пуске ДПТ по отношению к номинальному току.

3. Порядок выполнения расчетов и расчетные формулы (см также [1] ч.6, с. 17-30)

3.1. Так как механическая характеристика (МХ) двигателя постоянного тока (ДПТ) параллельного возбуждения представляет собой прямую линию, то для выполнения п.1 Задания достаточно найти две точки, через которые проходит МХ ДПТ. Это могут быть, например, точки соответствующие номинальному режиму и режиму холостого хода. Для номинального режима частота задана в таблице. Момент же можно найти из формулы для механической мощности

$$P_2 = \sim M_2 \omega_2 = 2\pi n_2 M_2 / 60 \quad (1)$$

Откуда для номинального режима ($M_2 = M_n$ (Нм); $P_2 = P_n$ (Вт); $n_2 = n_n$ (об/мин))

$$M_n = 9,55 P_n / n_n \quad (2)$$

Для второй точки МХ необходимо определить лишь частоту вращения n_0 для режима идеального холостого хода, для которого $I_a = 0$, $M_{эм} = 0$.

В этом случае, на основании уравнения электромеханической характеристики (ЭМХ) ДПТ

$$n = (U - I_a R_a) / C_e \Phi \quad (3)$$

имеем:

$$n_0 = U / C_e \Phi \quad (4)$$

где величину $C_e \Phi$ можно определить, подставив в выражение (3) данные номинального режима

$$C_e \Phi = (U_H - I_{aH} R_a) / n_H \quad (5)$$

Откуда, после подстановки (5) в (4) окончательно имеем для естественной МХ

$$n_0 = n_H U_H / (U_H - I_{aH} R_a) \quad (6)$$

3.2. Пусковой реостат (см. п. 2 «Задания») подбирается из следующих соображений.

Ток якорной цепи ДПТ определяется следующим соотношением:

$$I_a = (U_a - E_a) / R_a \quad (7)$$

где

$$E_a = C_e \Phi n \quad (8)$$

При $n = 0$ $E_a = 0$, поэтому

$$I_{a \text{ пуск}} = U / R_a \quad (9)$$

Так как естественное сопротивление якорной цепи машин постоянного тока очень мало (см. Табл.4.1), то при прямом подключении двигателей на полное номинальное напряжение сети бросок ток якоря достигает недопустимых величин. Вследствие этого прямой пуск применяется только для двигателей мощностью до нескольких сотен Ватт, у которых R_a относительно велико.

Самым распространенным является пуск с помощью дополнительных пусковых сопротивлений R_{Π} , включаемых последовательно в цепь якоря. При этом в начальный момент пуска, при $n = 0$ имеем

$$I_{a \text{ пуск}} = U / (R_a + R_{\Pi}) \quad (10)$$

где R_{Π} — величина пускового сопротивления. Величина R_{Π} подбирается так, чтобы в начальный момент пуска:

$$I_{a \text{ пуск}} = k_I I_H \quad (11)$$

Для того, чтобы это обеспечить необходимо в цепь якоря включить пусковое сопротивление следующей величины:

$$R_{\Pi} = (U / k_I I_H) - R_a \quad (12)$$

3.3. КПД электродвигателя (см. п. 3 «Задания») это отношение полезной механической мощности P_2 , развиваемой двигателем на валу ко всей электрической мощности P_1 , потребляемой двигателем из сети.

Полезная мощность двигателя в номинальном режиме указана в

таблице 1 (в кВт): при этом $P_{2H} = P_H$ (не забудьте перевести в ватты!).

Затрачиваемую мощность можно найти по известной формуле мощности постоянного тока $P_{1H} = U_H I_H$.

В этом случае КПД двигателя η_H для номинального режима

$$\eta_H = P_H / U_H I_H \quad (13)$$

3.4. Вводя сопротивление в цепь обмотки возбуждения (см. п. 4 «Задания»), мы уменьшаем ток возбуждения, а значит, и рабочий магнитный поток двигателя. За счет этого уменьшится ЭДС якоря (см. выражение 8). Уменьшение ЭДС в соответствии с формулой (7) приведет к росту тока якоря и появлению избыточного вращающего электромагнитного момента, под действием которого двигатель начнет ускоряться. Рост частоты вращения будет продолжаться до тех пор, пока пропорциональная частоте вращения ЭДС якоря не уменьшит ток якоря до уровня, при котором электромагнитный момент снова уравновесит момент нагрузки (момент сопротивления) на валу. Если момент сопротивления останется неизменным, то новый установившийся режим возникнет при большем значении тока якоря (из-за уменьшения магнитного потока) и большем значении частоты вращения вала.

Для определения величины сопротивления, которое нужно ввести в цепь возбуждения для выполнения п.4 задания, необходимо рассмотреть уравнение естественной электромеханической характеристики ДПТ

$$n_e = (U_a - I_a R_a) / C\Phi_e \quad , \quad (14)$$

и уравнение искусственной электромеханической характеристики ДПТ при ослабленном магнитном потоке Φ_H

$$n_H = (U_a - I_a R_a) / C\Phi_H \quad . \quad (15)$$

По условиям задания, отношение частоты вращения на искусственной характеристике n_H к частоте вращения на естественной характеристике n_e должно быть

$$n_H / n_e = 1,1 \quad ,$$

откуда с учетом (10) и (11):

$$n_H / n_e = \Phi_e / \Phi_H = 1,1 \quad ,$$

откуда

$$\Phi_H = 0,91 \Phi_e \quad . \quad (16)$$

Определим по ХХХ значение тока возбуждения I_{BH} , которое соответствует величине требуемого магнитного потока Φ_H на искусственной ЭМХ двигателя (в относительных единицах величины потока и ЭДС равны между собой) $I_{BH} = \sim 0,7 I_{BH}$

где

$$I_{BH} = U_H / R_B$$

$$I_{BH} = U_H / (R_B + R_{ВД})$$

откуда значение добавочного сопротивления в цепи возбуждения

$$R_{ВД} = (U_H / I_{BH}) - R_B \quad (17)$$

Так как по условию задания ток якоря остался номинальным, то электромагнитный момент, соответствующий новому установившемуся режиму на искусственной характеристике уменьшится пропорционально значению магнитного потока, т.е.

$$M_{II} = M_H (\Phi_H / \Phi_e) = 0,91 M_H \quad (18)$$

3.5. Для расчета величины добавочного сопротивления $R_{ад}$, вводимого в цепь якоря (см. п.5 «Задания») при номинальном напряжении U_H , номинальном токе якоря I_H и номинальном потоке Φ_H (см п. 4 «Задания») с целью уменьшения скорости вращения двигателя до величины $n_{II} = 0,9 n_H$ можно воспользоваться уравнением ЭМХ (11)

$$n_{II} = [U_H - I_H (R_a + R_{ад})] / C\Phi_H \quad (19)$$

$$n_H = (U_H - I_H R_a) / C\Phi_H \quad (20)$$

Разделив уравнение (15) на уравнение (16) получим

$$n_{II} / n_H = [U_H - I_H (R_a + R_{ад})] / (U_H - I_H R_a)$$

откуда, при условии $n_{II} / n_H = 0,9$

$$U_H - I_H (R_a + R_{ад}) = 0,9 (U_H - I_H R_a)$$

или окончательно

$$R_a + R_{ад} = [U_H - 0,9 (U_H - I_H R_a)] / I_H \quad (21)$$

Очевидно, что ток якоря в новом установившемся режиме работы ДПТ (который характеризуется равенством электромагнитного момента $M_{эм} = C I_a \Phi$ и момента сопротивления M_c) после введения в цепь якоря дополнительного сопротивления $R_{ад}$ и неизменном моменте сопротивления на валу не изменится, так как магнитный поток двигателя при этом остался неизменным.

3.6. Так как выходное напряжение, обеспечиваемое МПТ в режиме генератора параллельного возбуждения, должно быть номинальным (см. пункт 6 «Задания»), то ток в его обмотке возбуждения и его магнитный поток будут также номинальными.

Для расчета необходимой частоты вращения $n_{Г}$ якоря генератора используем формулы (7) и (8) для генераторного режима ($U_a < E_a$), откуда следует:

$$E_{aГ} = U_H + I_H R_a \quad (22)$$

$$E_{aГ} = C_e \Phi_H n_{Г} \quad (23)$$

или

$$n_{Г} = (U_H + I_H R_a) / C_e \Phi_H$$

где значение $C_e \Phi_H$ можно рассчитать по номинальным данным с учетом (20):

$$C\Phi_H = (U_H - I_H R_a) / n_H \quad (24)$$

и окончательно:

$$n_{\Gamma} = n_{\text{H}} (U_{\text{H}} + I_{\text{H}} R_{\text{a}}) / (U_{\text{H}} - I_{\text{H}} R_{\text{a}}) \quad (25)$$

Образец оформления титульного листа рабочей тетради для практических занятий

**СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра электротехники и электромеханики

Дисциплина: Электрические машины

**РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ
по практическим занятиям**

Шифр и Ф.И.О. студента: _____

Шифр и наименование специальности: _____

Форма обучения: _____ **Курс:** _____

Преподаватель: _____
должность преподавателя по кафедре, Ф.И.О.

Отметка о зачете: _____ **Дата:** _____

**Санкт-Петербург
200__**

4. БЛОК КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Общие пояснения

При освоении дисциплины «Электрические машины» необходимо:

- изучить теоретический материал, объем и содержание которого соответствуют рабочей программе и соответствующему тематическому плану;
- выполнить программу лабораторных работ;
- выполнить программу практических занятий (для очной формы обучения);
- выполнить программу контрольных работ (для очно-заочной и заочной форм обучения).

Итоги освоения дисциплины по каждому виду учебной нагрузки оцениваются определенным количеством баллов в соответствии с балльно-рейтинговой системой, рассмотренной в п. 2.6.

При этом, целесообразно выделить несколько уровней контроля знаний:

- **текущий контроль (в т.ч. самоконтроль, тренировочное тестирование, рубежное тестирование);**
- **итоговый контроль.**

Самоконтроль выполняется самим студентом в процессе усвоения знаний по дисциплине. Инструментами такого контроля являются **вопросы для самопроверки** по материалу каждой темы, **которые приведены в «Опорном конспекте» (см. п. 3.2).**

После изучения учебного теоретического материала каждого раздела полезно пройти в ручном или автоматизированном режиме тренировочное тестирование с использованием соответствующих тренировочных тестов (см. ниже п. 4.3.1).

После самопроверки и тренировочного тестирования студент может получить соответствующие тесты рубежного контроля по данному разделу (см. п. 4.3.2). Тесты рубежного контроля сформированы на базе соответствующих тренировочных тестов, относящихся к данному разделу, и содержат тестовые задания по каждой теме данного раздела (по одному заданию из каждой темы). Время для ответа и число попыток на рубежном тестировании ограничены.

По результатам прохождения тестирования теоретических знаний, выполнения расчетно-практических и контрольных работ, а также выполнения и защиты лабораторных работ **студент получает соответствующее количество баллов (см. табл. 2.6.1).**

Общее максимальное количество баллов, которое можно набрать по всем видам учебной нагрузки, составляет 100 баллов.

Минимальное количество баллов, необходимое для получения промежуточного зачета по каждому виду учебной нагрузки, а также для получения общего зачета и допуска к экзамену (итоговому тестированию) составляет 60% от максимально возможного количества баллов.

ЗАДАНИЯ НА КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

4.2.1. Общие методические указания к выполнению контрольных работ

Тематическими планами дисциплины для студентов очно-заочной и заочной форм обучения предусматривается выполнение двух контрольных работ.

Тематика контрольной работы №1 соответствует разделам: «Трансформаторы» (часть 1-1) и «Асинхронные машины» (часть 1-2).

Тематика контрольной работы №2 соответствует разделам: «Синхронные машины» (часть 2-1) и «Машины постоянного тока» (часть 2-2).

Каждое расчетно-практическое задание контрольной работы необходимо выполнить в соответствии с номером своего варианта, который определяется как сумма двух последних цифр личного шифра студента (кроме табл. 4.1.4-2).

Отчет о выполнении контрольных работ необходимо оформить на бумажном носителе с указанием всей последовательности расчетов, а также необходимых выводов и комментариев (образец оформления титульного листа отчета см. ниже).

Для предварительной проверки выполненные контрольные работы могут быть представлены преподавателю в электронном виде (в том числе по электронной почте).

Общее и минимально необходимое количество рейтинговых баллов, которое можно набрать по результатам выполнения контрольных работ указано в п. 2.6.1 учебно-методического комплекса.

Можно рекомендовать следующие общие подходы к выполнению расчетно-практических заданий, входящих в программу контрольных работ:

- Внимательно прочитать условие задачи и при необходимости дать его наглядную схемную интерпретацию, используя условные графические обозначения элементов электрических схем и электрических машин в соответствии с ГОСТами.

- Записать числовые данные условия задачи и их единицы измерения. При этом необходимо указывать также те и величины, числовые значения которых непосредственно не задаются, но о которых говорится в условии задачи. Например, если в условии сказано, что активным сопротивлением обмотки якоря можно пренебречь, следует записать $R_a = 0$ и т.п.

- Установить искомые величины и единицы их измерения.

- Подобрать нужную формулу. Если искомая величина может быть определена из нескольких выражений, то необходимо сравнить заданные величины с величинами, входящими в различные формулы, и выбрать нужное выражение. При необходимости выполнить нужные преобразования для определения искомой величины.

- В найденное выражение подставить числовые значения заданных величин, предварительно осуществив пересчет всех данных и выразив их в системе СИ, обращая при этом внимание на соразмерность величин (например, значение КПД указывать в относительных единицах, а не в процентах, мощность в Ваттах, а не в киловаттах и т.п.).

- Если решение задачи требует графических построений (векторные диаграммы, механические и угловые характеристики), то следует предварительно наметить последовательность графических операций. Исходя из выбранного формата листа, для графических построений рассчитать масштабы и определить необходимые величины в соответствующем масштабе. При выполнении построений последовательность графических операций отмечать цифрами.

- Провести численный расчет и анализ полученных результатов. Все вычисления желательно выполнять с помощью компьютера или микрокалькулятора. Правильность полученного ответа проверить по получившейся размерности и с точки зрения здравого смысла исходя из представлений о физическом смысле и возможных реальных пределах изменения искомой величины.

При выполнении вычислений следует пользоваться правилами приближенных вычислений и записывать ответ с определенной степенью точности, соответствующей точности исходных данных, а также техническому или конструктивному смыслу искомой величины.

Без твердого знания теории нельзя рассчитывать на успешное решение даже сравнительно простых практических задач, поэтому, прежде чем приступить к решению задач, необходимо тщательно проработать соответствующий теоретический раздел, используя рекомендованные источники информации

Задания и исходные данные на выполнения контрольных работ приведены ниже. Конкретные приемы решения задач представлены в п. 3.7 настоящего УМК, а также в следующей литературе:

1. Брандина, Е. П. Электрические машины: опорный конспект (конспект лекций), примеры решения задач / Е. П. Брандина. - СПб. : Изд-во СЗТУ, 2007. - 99 с.

2. Данку, А. Электрические машины: сборник задач и упражнений, пер. с венг./ А. Данку, А. Фракаш, Л. Надь.- М.: Энергоатомиздат, 1984.- 360 с.

3. Рябуха, В. И. Электрические машины : общие вопросы теории машин переменного тока: сборник задач с ответами / В. И. Рябуха. - СПб. : СЗПИ, 1994. - 60 с.

4. Рябуха, В. И. Электрические машины : трансформаторы: сборник задач с ответами / В. И. Рябуха. - СПб. : СЗПИ, 1993. - 60 с.

5. Читечян, В.И. Электрические машины. Сборник задач: учеб. пос. для вузов / В.И. Читечян. – М.: Высшая школа, 1988, 231с.

**СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра электротехники и электромеханики

Дисциплина: Электрические машины

**ОТЧЕТ
о выполнении контрольной работы**

_____ № и тематика контрольной работы

№ варианта: _____

Шифр и Ф.И.О. студента:

Шифр и наименование специальности: _____

Форма обучения: _____

Курс: _____

Преподаватель: _____

_____ должность преподавателя по кафедре, Ф.И.О.

Отметка о зачете: _____

Дата: _____

**Санкт-Петербург
200__**

4.2.2. Задания для выполнения контрольной работы №1.

Часть 1-1. Трансформаторы

1. Программа расчета

На основании паспортных данных и результатов опытов холостого хода и короткого замыкания (табл. 4.2.1):

1.1. Рассчитать параметры схемы замещения трансформатора.

1.2. Построить в масштабе векторные диаграммы для двух случаев:

- при коэффициенте загрузки трансформатора $\beta = 1$ и коэффициенте мощности $\cos \varphi_2 = 1$;

- при $\beta = 0,5$ и $\cos \varphi_2 = 0,85$ при активно-индуктивной нагрузке;

1.3. найти значения коэффициента полезного действия (КПД) при заданных нагрузках;

1.4. найти напряжения на нагрузке с учетом падения напряжения в трансформаторе.

1.5. дать краткую характеристику конструкции и назначения трансформатора (на основании его буквенно-цифрового обозначения).

2. Исходные данные

S_N - номинальная полная мощность трансформатора;

$U_{1н}$ и $U_{2н}$ - номинальные значения напряжения первичной и вторичной обмотки;

u_k % - напряжение короткого замыкания в процентах от $U_{1н}$;

I_0 % - ток холостого хода в процентах от номинального тока $I_{1н}$;

P_k - активная мощность, потребляемая трансформатором в опыте короткого замыкания;

P_0 - активная мощность, потребляемая трансформатором в опыте холостого хода;

f - частота сети 50 Гц, что соответствует цикловой частоте $\omega = 2\pi f = 314 \text{ с}^{-1}$.

Так как все исходные данные относятся к трехфазным трансформаторам, то перед началом решения задачи необходимо привести все заданные параметры к одной фазе, полагая, что обмотки трансформатора соединены или по схеме «Y-Y» (при $U_{2нл} = 400 \text{ В}$), или по схеме «Y-Δ» (при $U_{2нл} = 230 \text{ В}$), т.е.

для схемы «Y-Y»:

$$U_{1н} = U_{1нл} / \sqrt{3}; \quad U_{2н} = U_{2нл} / \sqrt{3}; \quad S_N = S_{н3} / 3; \quad P_0 = P_{03} / 3; \quad P_k = P_{к3} / 3$$

для схемы «Y-Δ»:

$$U_{1н} = U_{1нл} / \sqrt{3}; \quad U_{2н} = U_{2нл}; \quad S_N = S_{н3} / 3; \quad P_0 = P_{03} / 3; \quad P_k = P_{к3} / 3$$

Величины, стоящие в числителях правых частей приведенных выше формул, взяты из представленной ниже таблицы исходных данных, а в левых

частях этих формул стоят используемые в дальнейших расчетах величины, относящиеся к одной фазе трехфазного трансформатора.

Таблица 4.2.1.
Технические данные трехфазных трансформаторов

№ вар.	Тип трансформатора	$S_{нз}$ кВ-А	$U_{1нл}$ кВ	$U_{2нл}$ кВ	$P_{0з}$ кВт	$P_{кз}$ кВт	$u_{к}$ %	I_0 %
1	ТМ-25/6	25	6	0,23	0,13	0,60	4,5	3,2
2	ТМ-25/10	25	10	0,4	0,13	0,60	4,5	3,2
3	ТМ-40/6	40	6	0,23	0,175	0,88	4,6	3,0
4	ТМ -40/10	40	10	0,4	0,175	0,88	4,5	3,0
5	ТМ-63/6	63	6	0,23	0,24	1,28	4,5	2,8
6	ТМ-63/6	63	10	0,4	0,24	1,28	4,5	2,8
7	ТМ- 100/6	100	6	0,23	0,33	1,97	6,5	2,6
8	ТМ-100/10	100	10	0,4	0,33	1,97	6,5	2,6
9	ТМ- 160/6	160	6	0,23	0,54	2,65	4,5	2,4
10	ТМ-160/10	160	10	0,4	0,54	2,65	4,5	2,4
11	ТМ-250/6	250	6	0,23	0,74	3,7	4,5	2,3
12	ТМ-250/10	250	10	0,4	0,74	3,7	4,5	2,3
13	ТМ -400/6	400	6	0,23	1,1	5,5	4,5	2,1
14	ТМ-400/10	400	10	0,4	1,1	5,5	4,5	2,1
15	ТМ-630/6	630	6	0,23	1,68	7,6	5,5	2,0
16	ТМ-630/10	630	10	0,4	1,68	7,6	5,5	2,0
17	ТМ- 1000/6	1000	6	0,23	2,45	12,2	5,5	1,5
18	ТМ- 1000/10	1000	10	0,4	2,45	12,2	5,5	1,5
19	ТМ- 1600/6	1600	6	0,23	3,3	18,0	5,5	1,3
20	ТМ- 1600/10	1600	10	0,4	3,3	18,0	5,5	1,3

Сведения о связи конструкции и назначения трансформатора с его буквенно-цифровым обозначением см. в [1], ч.1, с. 48-57; ч.2, с.14-24.

4.2.3. Задания на выполнение контрольной работы №1. Часть 1-2. Асинхронные машины

1. Программа расчета

На основании паспортных данных асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (см. табл. 4.2.2):

1.1. Определить:

- число пар полюсов обмотки двигателя p ;
- частоту вращения магнитного поля в рабочем зазоре n_1 ;

- скольжение при номинальной нагрузке s_n ;
- активную мощность, потребляемую двигателем из электросети P_1 в номинальном режиме;
- номинальный и пусковой токи статора I_n и $I_{п.}$.

1.2. Рассчитать и построить механическую характеристику асинхронного двигателя (АД) в осях $M_{ЭМ} = f(n_2)$ и $M_{ЭМ} = f(s)$ с обязательным отображением на ней номинального ($M_{ЭМ} = M_n, n_2 = n_n$) пускового ($M_{ЭМ} = M_{п.}, n_2 = 0$) и критического ($M_{ЭМ} = M_{макс}, n_2 = n_{кр.}$) режимов.

1.3. На основании обозначения типа асинхронного двигателя дайте краткую характеристику его конструкции и назначения.

Во всех вариантах считать, что все двигатели, представленные в Табл.2.1 рассчитаны на номинальное линейное напряжение 380 В при включении трехфазных обмоток якоря (статора) звездой и на номинальное линейное напряжение 220 В при включении их треугольником.

2. Исходные данные

P_n – номинальная мощность, развиваемая двигателем на валу (P_{2n}), кВт;

n_n – номинальная частота вращения вала двигателя (об/мин);

η_n – КПД двигателя в номинальном режиме, %;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности со стороны сети (цепи обмотки статора);

$k_{макс}$ – кратность максимального (критического) момента АД на естественной характеристике по отношению к номинальному моменту;

$k_{п.}$ – кратность пускового момента АД на естественной характеристике по отношению к номинальному моменту;

k_I – кратность пускового тока АД на естественной характеристике по отношению к номинальному току.

Таблица 4.2.2.

Технические данные трехфазных асинхронных двигателей

№ вар.	Тип двигателя	P_n , кВт	n_n , об/мин	η_n , %	$\cos \varphi_n$	$k_{макс}$	$k_{п.}$	k_I
1	4А80А4У3	1,1	1420	75,0	0,81	2,2	2,0	5,0
2	4А80В4У3	1,5	1415	77,0	0,83	2,2	2,0	5,0
3	4А90L4У3	2,2	1425	80,0	0,83	2,4	2,1	6,0
4	4А100S4У3	3,0	1435	82,0	0,83	2,4	2,0	6,0
5	4А00L4У3	4,0	1430	84,0	0,84	2,4	2,0	6,0
6	4А112M4У3	5,5	1445	85,5	0,85	2,2	2,0	7,0
7	4А132S4У3	7,5	1455	87,5	0,86	3,0	2,2	7,5
8	4А132M4У3	11,0	1460	87,5	0,87	3,0	2,2	7,5
9	4А160S4У3	15,0	1465	88,5	0,88	2,3	1,4	7,0
10	4А160M4У3	18,5	1465	89,5	0,88	2,3	1,4	7,0
11	4А180S4У3	22,0	1470	90,0	0,90	2,3	1,4	6,5
12	4А180M4У3	30,0	1470	91,0	0,90	2,3	1,4	6,5
13	4А200M4У3	37,0	1475	91,0	0,90	2,5	1,4	7,0
14	4А200L4У3	45,0	1475	92,0	0,90	2,5	1,4	7,0
15	4А225M4У3	55,0	1480	92,5	0,90	2,5	1,3	7,0

16	4A250S4Y3	75,0	1480	93,0	0,90	2,3	1,2	7,0
17	4A250M4Y3	90,0	1480	93,0	0,91	2,3	1,2	7,0
18	4A80B6Y3	1,1	920	74,0	0,74	2,2	2,0	4,0
19	4A90L6Y3	1,5	935	75,0	0,74	2,2	2,0	4,5
20	4A100L6Y3	2,2	950	81,0	0,73	2,2	2,0	5,0

4.2.4. Задания на выполнение контрольной работы №2. Часть 2-1. Синхронные машины

1. Программа расчета

На основании исходных данных синхронной машины (см. табл. 4.2.3а и Табл. 4.2.3б):

1.1. Построить векторные диаграммы для неявнополюсного (НЯП) и явнополюсного (ЯП) синхронного генератора (СГ) для номинального режима работы.

1.2. Построить угловую характеристику ЯПСГ при номинальных значениях параметров питания и сопротивлений (значение E_0 определить на основании векторной диаграммы). Указать запас статической устойчивости СМ.

1.3. Определить отношение короткого замыкания (ОКЗ) ЯПСГ.

2. Исходные данные для расчетов параметров и режимов работы синхронной машины

Ниже в качестве исходных данных для расчета даны: в таблице 4.2.3а - характеристика холостого хода СГ, а в таблице 4.2.3б - в соответствии с вариантом следующие параметры 3-х фазного синхронного генератора (соединение фаз – Y):

S_n – полная номинальная мощность;

n_n - номинальная (синхронная) частота вращения;

$\cos \varphi_n$ – номинальный коэффициент мощности;

$U_{нл}$ – номинальное линейное напряжение;

R_a , $X_{сн}$, X_d , X_q , X_s – сопротивления якоря соответственно: активное, синхронное индуктивное (для случая НЯПСГ), индуктивное по продольной оси и индуктивное по поперечной осям (для случая ЯПСГ), рассеяния;

W_1 – число витков фазы статора;

Таблица 4.2.3а.

Характеристика холостого хода СГ

I_b , (о.е.)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
E_0 , (о.е.)	0,58	1,0	1,21	1,33	1,4	1,46	1,51

Таблица 4.2.3б.

Параметры синхронной машины

Параметр	Вариант (последняя цифра личного шифра студента)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S_н, кВА	37,5	62,5	94	125	187	250	375	500	625	750
U_{нл}	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
cos φ_н	0,9	0,85	0,8	0,9	0,85	0,8	0,9	0,85	0,8	0,85
n_н, об/мин	1500	1000	750	1500	1000	750	1000	1500	750	1000
R_а * 100, (о.е.)	4,65	2,96	3,59	3,03	2,84	2,54	1,85	3,97	1,45	1,3
X_{сн}, (о.е.)	2,4	2,2	2,25	1,3	1,2	2,1	1,7	2,0	2,3	2,4
X_s*10, (о.е.)	1,08	0,81	0,89	0,78	0,76	0,55	0,52	0,45	0,98	0,86
X_d, (о.е.)	2,23	2,08	2,15	1,16	1,0	1,92	1,6	1,66	2,18	2,3
X_q, (о.е.)	1,1	1,04	1,07	0,58	0,5	0,96	0,8	0,85	1,1	1,15
W₁	18	14	12	16	20	18	14	16	20	18

4.2.5. Задания на выполнение контрольной работы №2.**Часть 2-2. Машины постоянного тока****1. Программа расчета**

На основании исходных данных машины постоянного тока (см. Табл. 4.2.4а и Табл. 4.2.4б):

1.1. Построить механическую характеристику для двигательного режима.

1.2. Подобрать пусковой реостат $R_{п}$, чтобы в момент пуска ток якоря не превышал предельного значения для данного двигателя.

1.3. Найти коэффициент полезного действия двигателя $\eta_{н}$ при номинальной нагрузке.

1.4. Рассчитать сопротивление $R_{вд}$, которое надо ввести в цепь обмотки возбуждения для того, чтобы увеличить частоту вращения двигателя при номинальном токе якоря на 10%. Какова при этом величина электромагнитного момента, развиваемая двигателем?

1.5. Рассчитать сопротивление, которое надо ввести в цепь обмотки якоря, чтобы уменьшить частоту вращения на 10% при номинальном моменте сопротивления на валу. Какова при этом будет величина тока якоря?

1.6. Определить частоту вращения, с которой необходимо вращать вал рассмотренной выше МПТ чтобы она, работая в режиме генератора с параллельным возбуждением, обеспечивала на выходе номинальное напряжение при номинальном токе якоря.

2. Исходные данные

$P_{н}$ – номинальная мощность, развиваемая двигателем на валу ($P_{2н}$), кВт;

$n_{н}$ – номинальная частота вращения вала двигателя (об/мин);

$I_{н}$ – ток, потребляемый МПТ из сети в номинальном двигательном режиме;

$R_{а}$ – сопротивление внутренней части цепи якоря (Ом);

$R_{в}$ – сопротивление параллельной (независимой) обмотки возбуждения

(Ом);

k_I – максимально допустимая кратность тока якоря при пуске ДПТ по отношению к номинальному току.

Технические данные машин постоянного тока (МПТ) для двигательного режима представлены в табл. 4.2.4а. **Номинальное напряжение для всех представленных в таблице машин принять равным 220 В.**

Таблица 4.2.4а.

Технические данные машин постоянного тока (МПТ)

№ вар.	R_n , кВт	I_n , А	R_a , Ом	R_b , Ом	k_I	№ вар.	R_n , кВт	I_n , А	R_a , Ом	R_b , Ом	k_I
$n_H = 3000$ об /мин						$n_H = 1000$ об/мин					
1	1,5	9	2,72	744	2	13	1,5	9,3	3,97	369	2
2	2,2	12,5	1,35	883	2,2	14	2,2	13,3	2,36	321	2,2
3	3,0	16,5	0,856	353	2,4	15	3,0	17,1	1,44	222	2,4
4	4,0	21,6	0,459	335	2,5	16	4,0	22,4	0,884	243	2,5
5	5,5	30,2	0,484	370	2,6	17	5,5	30	0,660	209	2,6
6	7,5	44,1	0,270	180	1,5	18	7,5	40,3	0,528	179	1,5
7	11	59	0,183	220	1,6	19	11	69,3	0,434	119	1,6
8	15	79,3	0,099	125	1,7	20	15	84	0,350	151	1,7
9	18,5	96	0,098	137	1,8						
10	22	112,5	0,065	127	1,9						
11	30	157,5	0,064	85	2,0						
12	45	230	0,045	94	2,2						

В таблице 4.2.4б представлена характеристика холостого хода (XXX) МПТ: зависимость ЭДС генераторного режима E_a (при номинальной частоте вращения якоря) от тока I_b в обмотке возбуждения. **XXX представлена в относительных единицах** (в качестве базисных значений параметров используются номинальные значения тока возбуждения и напряжения якоря).

Таблица 4.2.4а.

Характеристика холостого хода МПТ

I_b^* , о.е.	0	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,50
E_a^* , о.е.	0,05	0,45	0,73	0,88	0,95	1,00	1,03	1,07

4.3. ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ

4.3.1. Образцы тренировочных тестов

Ниже даны образцы тренировочных тестов (ТТ) по одному тесту из каждого раздела дисциплины, а также таблица правильных ответов на представленные в них тестовые задания. **При этом, нумерация тестов отражает номер раздела (первая цифра) и номер соответствующей темы данного раздела (вторая цифра).**

Раздел 1. Общие основы функционирования и устройства ЭМ

ТТ 1-1

1. **Магнитной цепью электрической машины называют:**

- А). Путь, по которому проходит магнитный поток.
- Б). Совокупность различных ферромагнитных и других активных участков электрических машин, предназначенных для формирования основных (рабочих) магнитных полей нужной формы и интенсивности.
- В). Ферромагнитный участок пути, по которому замыкаются силовые линии основного магнитного потока.

2. **Генерирующие зоны магнитопроводов электрических машин представляют собой:**

- А). Обмотку.
- Б). Обмотку с током, охватывающую магнитопровод.
- В). Постоянный магнит.
- Г). Обмотку с током, охватывающую магнитопровод, или участок магнитопровода постоянной намагниченности.

3. **Силовые линии магнитного поля вне генерирующей зоны направлены:**

- А). От «южного» полюса к «северному».
- Б). От «северного» полюса к «южному».
- В). В соответствии с направлением магнитодвижущей силы.

4. **Силовые линии магнитного поля внутри генерирующей зоны направлены:**

- А). От «южного» полюса к «северному».
- Б). От «северного» полюса к «южному».
- В). В соответствии с направлением магнитодвижущей силы.

5. **Существование магнитного поля реально обнаруживается в следующих физических явлениях:**

- А). В механическом взаимодействии электрических зарядов.
- Б). В возникновении токов смещения.
- В). В возникновении ЭДС и электромагнитного момента.

6. **На концах проводника, движущегося в однородном магнитном поле, не индуцируется ЭДС в том случае,:**

- А). Если проводник движется без ускорения.
- Б). Если проводник движется вдоль своей собственной оси.
- В). Если нормальная составляющая вектора скорости перемещения проводника относительно направления магнитных силовых линий равна нулю.

7. **На проводник с током, находящийся в однородном магнитном поле, не действует электромагнитная сила в том случае,:**

- А). Если ось проводника совпадает с направлением магнитных силовых линий.
- Б). Если по проводнику протекает переменный ток.
- В). Если ось проводника составляет с плоскостью, перпендикулярной к направлению магнитных силовых линий прямой угол.

8. **Эффективной длиной проводника, находящегося в однородном магнитном поле, называется:**

- А). Длина той части проводника, которая непосредственно находится в магнитном поле.
- Б). Проекция части проводника, находящейся в зоне магнитного потока, на плоскость, перпендикулярную направлению магнитных силовых линий.
- В). Длина той части проводника, которая участвует в создании ЭДС и электромагнитного момента (усилия).

9. Величину магнитной индукции выражают:

- А). Через отношение величины механической силы, действующей на единицу длины проводника с током, находящегося в магнитном поле, к величине тока, протекающего по данному проводнику.
- Б). Через отношение величины механической силы, действующей на единицу длины проводника с током, находящегося в магнитном поле перпендикулярно направлению его силовых линий, к величине тока, протекающего по данному проводнику.
- В). Через отношение величины ЭДС, наведенной в единице длины проводника, находящегося в магнитном поле, к скорости движения проводника.

10. Для того, чтобы через величину магнитной индукции определить величину магнитного потока,:

- А). Нужно величину индукции разделить на площадь, пронизываемую магнитными силовыми линиями.
- Б). Нужно величину индукции умножить на площадь, пронизываемую магнитными силовыми линиями.
- В). Нужно величину индукции умножить на площадь, пронизываемую силовыми линиями магнитного потока в перпендикулярном направлении.

11. Напряженностью магнитного поля называют:

- А). Независящую от свойств окружающей среды характеристику магнитного поля, определяемую отношением величины магнитодвижущей силы (МДС), создавшей это поле, к длине участка магнитопровода, на котором действует данная МДС.
- Б). Отношение величины магнитодвижущей силы (МДС), создавшей это поле, к длине участка магнитопровода, на котором действует данная МДС.
- В). Произведение величины магнитного потока на магнитное сопротивление магнитопровода, деленное на его длину.

12. Магнитодвижущая сила (МДС), действующая по длине рабочего магнитопровода, создается:

- А). С помощью катушки.
- Б). С помощью катушки с током.
- В). С помощью катушки с током, охватывающей рабочий магнитопровод.

13. Направление магнитодвижущей силы катушки с током можно определить:

- А). По правилу левой руки.
- Б). По правилу правой руки.
- В). По правилу буравчика.

14. Величину магнитодвижущей силы катушки с током можно определить:

- А). Как произведение напряженности магнитного поля на длину магнитопровода.
- Б). Как произведение тока, текущего по проводникам катушки, на число витков катушки.
- В). Как произведение магнитного потока на магнитное сопротивление.

15. В законах Ома для электрической и магнитной цепи условно «соответствуют» друг другу:

А). ЭДС и МДС; Ток и Магнитный поток; Сопротивление току и сопротивление магнитному потоку.

Б). Напряжение и Напряженность поля; Ток и Магнитная индукция; Сопротивление току и сопротивление магнитному потоку.

В). ЭДС и МДС; Ток и Магнитная индукция; Сопротивление току и сопротивление магнитному потоку.

Раздел 2. Трансформаторы

ТТ 2-1

1. Трансформаторы в зависимости от соотношения количества витков первичной и вторичной обмоток классифицируются следующим образом:

А). Двухобмоточный - многообмоточный.

Б). Понижающий – повышающий.

В). Однофазный – многофазный.

2. Первый практически работающий однофазный трансформатор был создан:

А). Русскими инженерами П. Н. Яблочковым и И. Ф. Усагиным в 1876 г.

Б). Венгерскими электротехниками О. Блати, М. Дери и К. Циперновским в 1885 г.

В). Русским инженером и ученым М. О. Доливо-Добровольским в 1891 г.

3. Первый практически работающий трехфазный трансформатор был создан:

А). Братьями Джоном и Эдуардом Гопкинсонами в 1884 г.

Б). Венгерскими электротехниками О. Блати, М. Дери и К. Циперновским в 1885 г.

В). Русским инженером и ученым М. О. Доливо-Добровольским в 1891 г.

4. Коэффициентом трансформации трансформатора называют:

А). Отношение величины ЭДС или числа витков первичной обмотки к величине ЭДС или числу витков вторичной обмотки.

Б). Отношение величины ЭДС или числа витков вторичной обмотки к величине ЭДС или числу витков первичной обмотки.

В). Отношение величины ЭДС или числа витков обмотки высшего напряжения к величине ЭДС или числу витков обмотки низшего напряжения.

5. Значение коэффициента трансформации трансформатора можно изменить:

А). Путем увеличения площади сечения магнитопровода.

Б). Путем изменения соотношения между числами витков первичной и вторичной обмоток.

В). Путем подмагничивания магнитопровода постоянным током.

6. Для того, чтобы снизить напряжение на зажимах нагрузки при неизменном напряжении питания нужно:

А). Уменьшить количество витков вторичной обмотки.

Б). Увеличить количество витков первичной обмотки.

В). Уменьшить количество витков первичной обмотки.

Г). Уменьшить количество витков вторичной обмотки или увеличить количество витков первичной обмотки.

7. В режиме холостого хода ток, потребляемый трансформатором из сети очень мал, несмотря на то, что цепь первичной обмотки продолжает оставаться подключенной на полное напряжение сети:

- А). Из-за высокого сопротивления первичной обмотки.
- Б). Из-за того, что ЭДС первичной обмотки, находясь в противофазе с приложенным к первичной обмотке напряжением почти полностью его уравнивает.
- В). Из-за того, что магнитопровод трансформатора делают шихтованным.

8. Если первичную обмотку трансформатора ошибочно подключить к источнику постоянного тока с напряжением, равном номинальному напряжению трансформатора, то:

- А). ЭДС первичной и вторичной обмотки в установившемся режиме будут равны нулю и трансформатор не будет передавать энергию из первичной цепи во вторичную цепь.
- Б). Трансформатор выйдет из строя в связи с тем, что установившийся ток первичной обмотки будет превышать ток короткого замыкания трансформатора.
- В). ЭДС и индуктивные сопротивления рассеяния первичной обмотки в установившемся режиме будут равны нулю и трансформатор выйдет из строя от перегрева в связи с тем, что установившийся ток первичной обмотки будет превышать ток короткого замыкания трансформатора.

Раздел 3. Асинхронные машины

ТТ 3-2

1. Синхронную частоту вращения магнитного потока в рабочем зазоре АМ можно определить:

- А). В соответствии с выражением $n_1 = 60 f_1 / p$, где: f_1 – частота питающего напряжения (Гц); p – число пар полюсов, создаваемых каждой фазой обмотки статора.
- Б). По паспортным данным АМ.
- В). По конструктивным параметрам АМ.

2. Электромагнитный момент АМ зависит от тока ротора:

- А). Прямо пропорционально.
- Б). Нелинейно.
- В). Прямо пропорционально активной составляющей тока ротора.

3. Электромагнитный момент, действующий на вал АМ, направлен:

- А). В сторону, противоположную вращению магнитного поля.
- Б). В сторону вращению магнитного поля.
- В). В соответствии со схемой включения обмоток статора и ротора.

4. Термин «асинхронная» в названии АМ означает:

- А). То, что магнитные поля, создаваемые обмотками статора и ротора вращаются с разными скоростями (асинхронно).
- Б). То, что ротор и рабочее магнитное поле, создаваемое в зазоре АМ, вращаются с разными скоростями (асинхронно).
- В). То, что электромагнитный момент в АМ возникает лишь тогда, когда ротор и рабочее магнитное поле, создаваемое в зазоре АМ, вращаются с разными скоростями (асинхронно).

5. Ток холостого хода АМ всегда в несколько раз выше, чем ток холостого хода трансформатора при практически полной идентичности процессов, протекающих

в их электрических и магнитных цепях:

А). Потому, что между первичной и вторичной обмоткой обычного типового трансформатора нет никакого воздушного зазора, тогда как между обмотками статора и ротора АМ обязательно присутствует рабочий воздушный зазор, создающий большое сопротивление магнитному потоку и требующий для его создания большего тока намагничивания.

Б). Потому, что потери на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе АМ больше, чем в трансформаторе.

В). Потому, что сопротивление обмотки статора АМ на холостом ходу меньше, чем у трансформатора.

6. Ток холостого хода у асинхронных двигателей общепромышленного исполнения:

А). находится в пределах от 3% до 5 % номинального тока обмотки статора.

Б). находится в пределах от 25% до 50 % номинального тока обмотки статора.

В). может достигать 10% номинального тока обмотки статора.

7. Для того, чтобы практически получить режим идеального холостого хода АМ нужно:

А). Полностью освободить вал асинхронного двигателя от внешней нагрузки.

Б). Подключить обмотку статора к сети, а обмотку фазного ротора разомкнуть.

В). «Подкрутить» ротор в сторону вращения магнитного поля до синхронной скорости.

8. У асинхронных двигателей (АД) общепромышленного исполнения при прямом пуске (при отсутствии ограничивающих устройств в цепях статорной и роторной обмоток) пусковой ток ротора может достигать 5 – 7 кратных значений номинального тока, в то время как пусковой электромагнитный момент не превышает значений, равных 1,3 – 1,5 от номинального значения:

А). Потому что частота пускового тока ротора равна частоте питающего напряжения.

Б). Потому что значительную долю пускового тока ротора составляет не участвующая в создании электромагнитного момента индуктивная составляющая.

В). Потому что ЭДС ротора при пуске максимальна.

9. Скольжением АМ называется:

А). Относительная разность угловых скоростей магнитного поля ротора и магнитного поля статора.

Б). Относительная разность угловых скоростей ротора и магнитного поля в рабочем зазоре АМ.

В). Скорость магнитного поля ротора относительно статора.

10. При увеличении частоты вращения ротора от нуля до критической происходит увеличение электромагнитного момента от значения пускового до максимального («критического»), в то время как ток ротора на данном диапазоне увеличения частоты вращения непрерывно уменьшается:

А). Так как при разгоне ротора увеличивается его магнитный поток.

Б). Так как при увеличении частоты вращения ротора уменьшаются потери в роторной цепи обмотки.

В). Так как на данном диапазоне увеличения частоты вращения общее уменьшение тока ротора происходит менее интенсивно, чем увеличение его активной составляющей.

11. Для того, чтобы экспериментально получить генераторный режим параллельный с сетью (режим рекуперативного торможения) АМ нужно:

А). Разогнать ротор АМ в сторону вращения магнитного поля до частот вращения, превышающих синхронную ($n_2 > n_1$).

Б). Разогнать ротор АМ в сторону, противоположную вращению магнитного поля.

В). Приложить к валу АМ активный механический момент, направленный в сторону, противоположную вращению магнитного поля, величина которого превышает пусковой момент АД.

12. Для того, чтобы экспериментально получить режим противовключения нужно:

А). Разогнать ротор АМ в сторону вращения магнитного поля до частот вращения, превышающих синхронную ($n_2 > n_1$).

Б). Разогнать ротор АМ в сторону, противоположную вращению магнитного поля.

В). Приложить к валу АМ активный механический момент, направленный в сторону, противоположную вращению магнитного поля, величина которого превышает пусковой момент АД.

13. Двигательному режиму АМ соответствуют значения скольжения:

А). $0 < s < 1$.

Б). $s < 0$.

В). $1 < s$.

14. Генераторному режиму (режиму рекуперации) АМ соответствуют значения скольжения:

А). $0 < s < 1$.

Б). $s < 0$.

В). $s > 1$.

15. Режиму противовключения АМ соответствуют значения скольжения:

А). $0 < s < 1$.

Б). $s < 0$.

В). $1 < s$.

Раздел 4. Синхронные машины

ТТ 4-4

1. Для того, чтобы обеспечить переход СМ из двигательного режима в генераторный, необходимо:

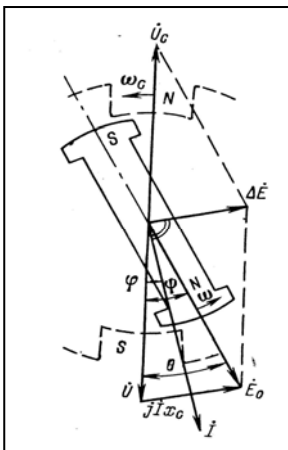
А). Увеличить ток возбуждения.

Б). Уменьшить ток возбуждения.

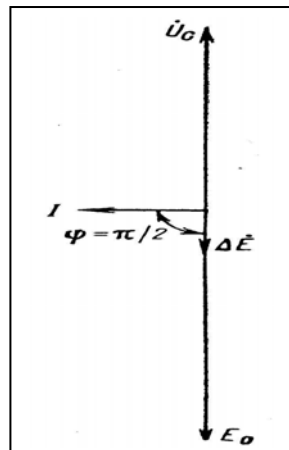
В). Создать внешний движущий момент на валу СМ.

2. Двигательному режиму синхронной машины соответствуют векторные диаграммы:

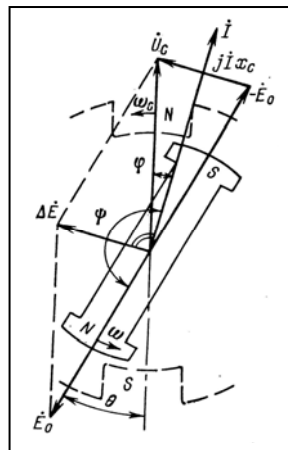
А).



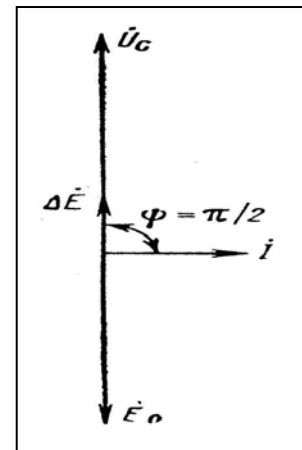
Б).



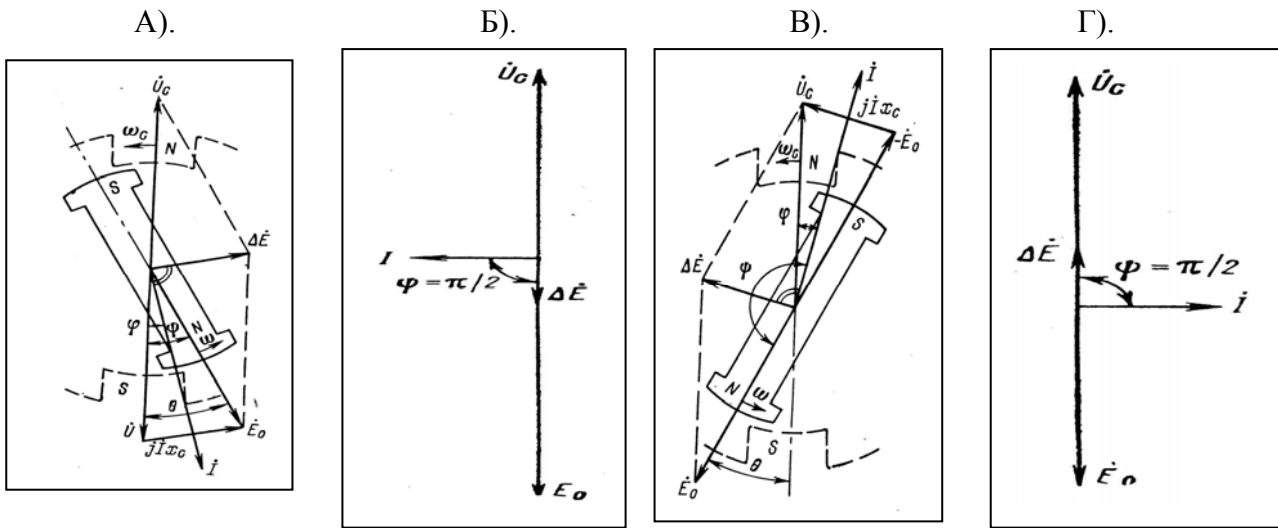
В).



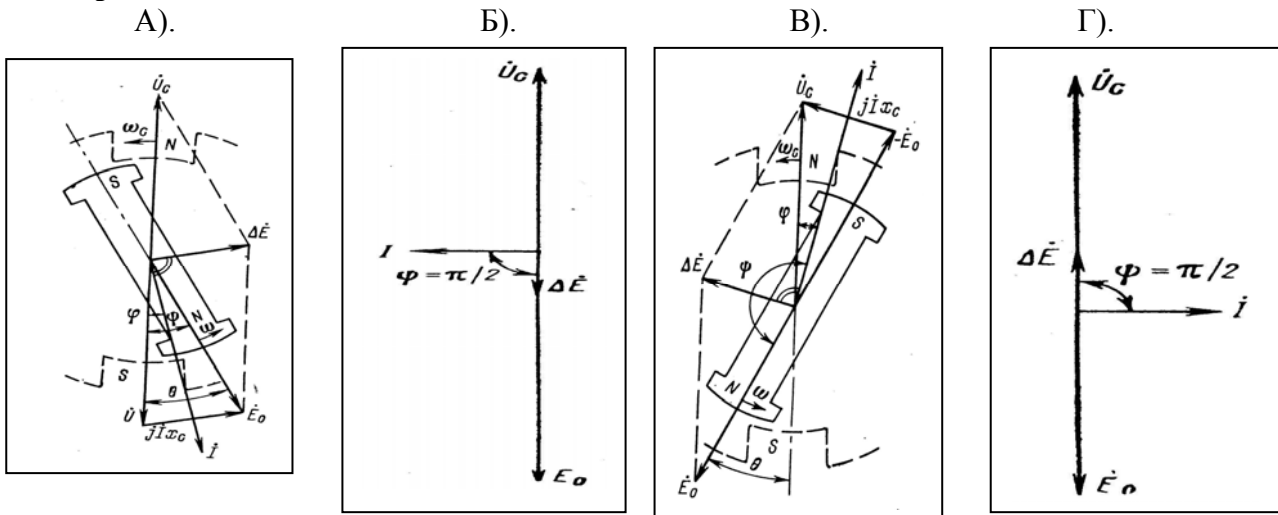
Г).



3. Режиму компенсатора синхронной машины при индуктивном характере нагрузки сети соответствуют векторные диаграммы:



4. Генераторному режиму синхронной машины соответствуют векторные диаграммы:



5. Для того, чтобы с помощью синхронного двигателя (СД) увеличить коэффициент мощности сети, работающей с индуктивной нагрузкой, необходимо:

- А). Увеличить ток возбуждения.
- Б). Уменьшить ток возбуждения.
- В). Создать внешний движущий момент на валу СМ.

6. Для того, чтобы с помощью синхронного двигателя (СД) увеличить коэффициент мощности сети, работающей с емкостной нагрузкой, необходимо:

- А). Увеличить ток возбуждения.
- Б). Уменьшить ток возбуждения.
- В). Создать внешний движущий момент на валу СМ.

7. Из перечисленных способов пуска не приемлем для синхронного двигателя (СД) способ:

- А). Прямое подключение к сети возбужденного СД.
- Б). С помощью вспомогательного (разгонного) двигателя.
- В). Асинхронный пуск.

Г). С помощью регулируемого преобразователя частоты.

8. Регулировать скорость синхронного двигателя (СД) можно:

- А). Путем изменения величины питающего напряжения.
- Б). Путем изменения частоты питающего напряжения.
- В). Путем изменения тока возбуждения.
- Г). Путем переключения числа пар полюсов.

9. Необходимо выполнить следующую последовательность действий, имеющих целью изменение направления вращения уже работающего синхронного двигателя (СД):

- А). Отключить СД от сети, поменять местами 2 фазы питающего напряжения и снова подключить СД к сети.
- Б). Отключить СД от сети, затормозить его вал, поменять местами 2 фазы питающего напряжения и снова осуществить пуск СД одним из известных способов..
- В). Отключить СД от сети, изменить направление тока возбуждения и снова подключить СД к сети.

Раздел 5. Машины постоянного тока

ТТ 5-2

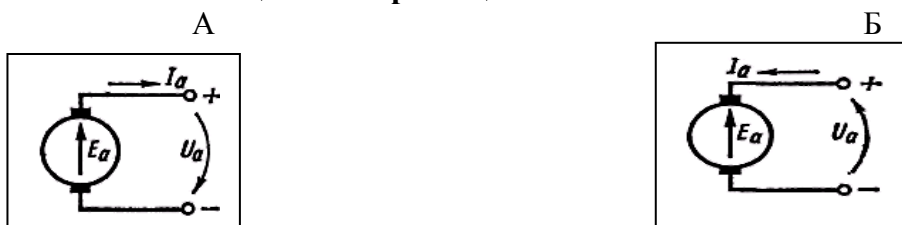
1. После пуска и разгона двигателя постоянного тока пусковой реостат из его якорной цепи выводят (закорачивают):

- А). Потому, что внутреннее сопротивление якорной цепи ограничивает ток якоря допустимыми пределами.
- Б). Во избежание выхода его из строя от перегрева.
- В). Потому, что после разгона двигателя ток якорной цепи ограничивается ЭДС, наводимой в обмотке якоря.

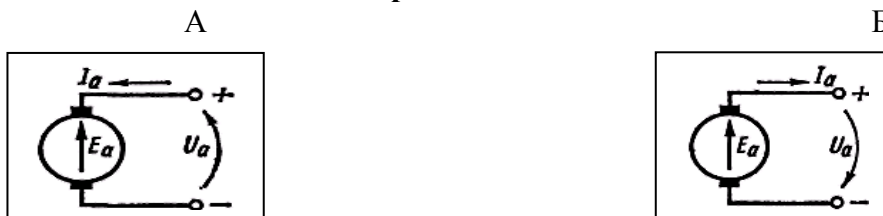
2. Число параллельных ветвей, создаваемых во внутренней цепи простой петлевой обмотки якоря машины постоянного тока определяется:

- А). Числом комплектов щеток, устанавливаемых на коллекторе.
- Б). Схемой соединений между собой отдельных секций якорной обмотки.
- В). числом главных полюсов.
- Г) равно двум.

3. Генераторному режиму машины постоянного тока соответствует электрическая схема замещения якорной цепи:



4. Двигательному режиму машины постоянного тока соответствует электрическая схема замещения якорной цепи:



5. Число параллельных ветвей, создаваемых во внутренней цепи простой волновой обмотки якоря машины постоянного тока определяется:

- А). Числом комплектов щеток, устанавливаемых на коллекторе.
- Б). Схемой соединений между собой отдельных секций якорной обмотки.
- В). числом главных полюсов.
- Г) равно двум.

6. Геометрической нейтралью машины постоянного тока называется:

- А). Линия, по которой установлены щетки на коллекторе.
- Б). Линия проходящая через точки рабочего зазора возбужденной машины, в которых, при отсутствии тока якоря, магнитная индукция равна нулю.
- В). Линия на поверхности коллектора, разделяющая внутреннюю цепь якорной обмотки на параллельные ветви.

7. Щетки в машине постоянного тока устанавливают на коллектор по линии геометрической нейтрали:

- А). Для обеспечения своевременной коммутации секций якорной обмотки.
- Б). Для обеспечения ускоренной коммутации секций якорной обмотки.
- В). Для получения максимально возможной ЭДС якорной обмотки, обеспечения оптимальных условий коммутации и стабильных эксплуатационных характеристик при любом направлении тока якоря.

8. Сдвиг щеток машины постоянного тока с геометрической нейтрали иногда применяют с целью:

- А). Устранения искрения на коллекторе.
- Б). Улучшения эксплуатационных характеристик машины.
- В). Регулирования величины выходной ЭДС якорной обмотки.

4.3.2. ТАБЛИЦА ПРАВИЛЬНЫХ ОТВЕТОВ НА ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ТЕСТЫ (ТТ)

№ Теста	Тема	Номера вопросов / Номера правильных ответов															
		№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Т1-1	1.1	№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		Ответ	Б	Г	Б	В	А	В	В	Б	Б	В	А	В	В	Б	А
Т2-1	2.1	№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8							
		Ответ	Б	А	В	В	Б	Г	Б	В							
Т3-2	3.2	№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		Ответ	А	В	Б	В	Б	Б	В	Б	Б	В	А	В	А	Б	В
Т4-4	4.4	№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9						
		Ответ	В	В	Б	А	А	Б	А	Б	Б						
Т5-2	5.2	№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8							
		Ответ	В	В	А	А	Г	Б	В	А							

4.3.3. Образец теста рубежного контроля (ТРК) (раздел 2. Трансформаторы)

ТРК 2-1

Номер и наименование темы	Тестовое задание	Варианты ответа	Макс. балл – 13, в т.ч.:
2.1. Общие сведения об устройстве, назначении и принципе действия трансформаторов	Как классифицируются трансформаторы в зависимости от соотношения количества витков первичной и вторичной обмоток?	А). Двухобмоточный – многообмоточный. Б) Понижающий – повышающий. В). Однофазный – многофазный.	2,0
2.2. Конструктивные особенности трансформаторов	Перечислите все основные конструктивные элементы трансформатора.	А). Сердечник, ярмо и обмотки. Б). Магнитная система, обмотки и система охлаждения. В). Сердечник, ярмо, обмотки и их изоляция, система охлаждения, устройства ввода-вывода.	1,5
2.3. Математическое описание физических процессов в электрических и магнитных цепях трансформатора	Укажите выражение для определения мгновенного значения ЭДС вторичной обмотки трансформатора при условии, что за базовую величину принят основной магнитный поток.	А). $e_2 = W_2 d\Phi/dt$ Б). $e_2 = W_2 \omega \Phi_m \sin \omega t$ В). $e_2 = W_2 \omega \Phi_m \sin (\omega t - \pi/2)$	3,0
2.4. Особенности устройства и работы трехфазных трансформаторов	Как можно трансформировать трехфазные системы токов и напряжений?	А). Трансформация трехфазных токов и напряжений может быть произведена только лишь с помощью группы из трех однофазных двухобмоточных трансформаторов стержневой или бронестержневой конструкции. Б). Трансформация трехфазных токов и напряжений может быть произведена только лишь с помощью трехфазного двухобмоточного трансформатора стержневой или бронестержневой конструкции. В). Трансформация трехфазных токов и напряжений может быть произведена либо с помощью группы из трех однофазных двухобмоточных	2,0

		трансформаторов, либо с помощью трехфазного двухобмоточного трансформатора, обмотки соответствующих фаз которого размещаются на общих стержнях магнитопровода стержневой или бронестержневой конструкции.	
2.5. Эксплуатационные режимы работы и характеристики трансформатора	Что называется внешней характеристикой трансформатора?	<p>А). Внешней характеристикой трансформатора называется зависимость первичного тока трансформатора от вторичного тока при неизменном напряжении питания.</p> <p>Б). Внешней характеристикой трансформатора называется зависимость изменения вторичного напряжения трансформатора от мощности нагрузки.</p> <p>В). Внешней характеристикой трансформатора называется зависимость вторичного напряжения трансформатора от вторичного тока при неизменных коэффициенте мощности нагрузки и входном напряжении первичной обмотки.</p>	3,0
2.6. Автотрансформаторы и специальные трансформаторы	Какое устройство называется автотрансформатором?	<p>А). Автотрансформатором называется трансформатор с одной обмоткой.</p> <p>Б). Автотрансформатором называется трансформатор с одной обмоткой высшего напряжения, часть которой, выведенная с помощью специальных отводов на внешние зажимы автотрансформатора, служит стороной низшего напряжения.</p> <p>В). Автотрансформатором называется трансформатор, у которого происходит автоматическое регулирование величины электроэнергии, передаваемой с первичной стороны на вторичную.</p>	1,5

4.4. ИТОГОВЫЙ КОНТРОЛЬ

4.4.1. Организация итогового контроля знаний по варианту «А» (итоговый экзамен)

При организации итогового контроля знаний по варианту «А» (итоговый экзамен) студенту даётся возможность случайным образом выбрать 5 экзаменационных заданий по одному заданию из каждого тематического блока экзаменационных заданий приведенных ниже:

1. Общие основы функционирования и устройства электрических машин (16 заданий).
2. Трансформаторы (16 вопросов).
3. Асинхронные машины (32 вопроса).
4. Синхронные машины (32 вопроса).
5. Машины постоянного тока (16 вопросов).

Экзаменатору предоставляется право задавать студентам любые дополнительные вопросы в рамках программы сдаваемой дисциплины, а также помимо теоретических вопросов давать практические задачи и примеры по программе данного курса.

Ответы на полученные экзаменационные задания оформляются письменно с последующими устными комментариями при ответе.

Время на подготовку студента к ответу после получения им экзаменационных заданий и необходимых разъяснений составляет не менее 1 академического часа (45 минут).

Качество знаний студентов на экзамене отмечаются следующими оценками: **отлично, хорошо, удовлетворительно и неудовлетворительно**, которые определяются на основании следующих **критериев**.

Оценка отлично выставляется студенту, глубоко и прочно усвоившему программный материал, исчерпывающе, последовательно, грамотно и логически стройно его излагающему, тесно увязывающему теорию с практикой, не испытывающему затруднений при видоизменении задания.

Оценка хорошо выставляется студенту, твердо знающему программный материал, не допускающему существенных неточностей при решении теоретических и практических заданий.

Оценка удовлетворительно выставляется студенту, который при изложении материала допускает неправильные формулировки, неточности не принципиального характера, испытывает затруднения в выполнении практических заданий.

Оценка неудовлетворительно выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает ошибки и неточности принципиального характера, неуверенно и с ошибками выполняет практические задания. **Оценка неудовлетворительно также выставляется в экзаменационную ведомость в случае невыполнения студентом до начала официального экзамена учебного плана по данной дисциплине.**

4.4.2. Программа теоретической части итогового экзамена

Блок экзаменационных заданий № 1.

Общие основы функционирования и устройства электрических машин

- 1.1. Основные понятия и соотношения, характеризующие магнитные цепи и магнитные поля.
- 1.2. Электромагнитная индукция, индуктивность и индуктивное сопротивление электрическому току.
- 1.3. Механическое проявление взаимодействия тока и магнитного поля. Признаки двигательного и генераторного (тормозного) режимов работы электромеханических преобразователей. Обратимость ЭМ.
- 1.4. Особенности применения ферромагнитных материалов в качестве элементов магнитопроводов электрических машин.
- 1.5. Потери энергии в магнитопроводе и методы их уменьшения.
- 1.6. Схемы замещения и векторные диаграммы электрических цепей, содержащих катушки индуктивности с ферромагнитными сердечниками.
- 1.7. Общие термины и определения, характеризующие параметры электрических машин.
- 1.8. Общие сведения о нагрузочных режимах электрических машин.
- 1.9. Классификация электрических машин по виду и типу, назначению, роду тока и принципу действия.
- 1.10. Общая классификация электрических машин по конструктивному исполнению.
- 1.11. Методы определения основных видов потерь в электрических машинах.
- 1.12. Коэффициент полезного действия. Особенности экспериментально-расчетных методов определения КПД двигателей и генераторов. Зависимость КПД от величины нагрузки.
- 1.13. Нагрев и охлаждение электрических машин. Описание процессов нагревания и охлаждения электрических машин.
- 1.14. Допустимая температура частей электрической машины.
- 1.15. Общие требования, предъявляемые к электрическим машинам. Современное состояние и тенденции развития производства и применения электрических машин.
- 1.16. Требования стандартов и международных классификационных организаций, предъявляемые к электрическим машинам.

Блок экзаменационных заданий № 2

Трансформаторы

- 2.1. Принцип действия трансформаторов и конструктивные особенности его магнитной системы.
- 2.2. Конструкция обмоток, изоляции и внешних вводов-выводов

трансформаторов. Системы охлаждения трансформаторов.

2.3. Математическое описание физических процессов в электрических и магнитных цепях трансформатора в режиме холостого хода.

2.4. Схема замещения и векторные диаграммы трансформатора на холостом ходу.

2.5. Универсальная Т-образная схема замещения трансформатора. Приведение параметров вторичной стороны трансформатора к первичной.

2.6. Экспериментальное определение параметров универсальной Т-образной схемы замещения трансформатора.

2.7. Полная система уравнений электрического равновесия и векторные диаграммы трансформатора для режимов нагрузки.

2.8. Общие сведения об особенностях трансформации трехфазных токов и напряжений.

2.9. Группы соединения трансформаторов.

2.10. Высшие гармоники тока и магнитного потока в трехфазных трансформаторах.

2.11. Зависимость выходного напряжения трансформатора от величины и характера нагрузки.

2.12. Параллельная работа трансформаторов.

2.13. Переходные процессы в трансформаторе.

2.14. Энергетические диаграммы трансформатора для потоков активной и реактивной энергии. КПД трансформатора.

2.15. Устройство и особенности работы автотрансформаторов и специальных трансформаторов (сварочные, измерительные, регулируемые с подмагничиванием, утроители частоты).

2.16. Связь напряжений, токов и мощности трансформатора с его размерами и массой.

Блок экзаменационных заданий № 3

Асинхронные машины (АМ)

3.1. Общие сведения об устройстве и принципе действия АМ.

3.2. Принципы создания магнитных полей, вращающихся (перемещающихся) в рабочих зазорах электрических машин.

3.3. Общие принципы выполнения трехфазных обмоток.

3.4. Сравнительная характеристика однослойной и двухслойной трехфазной обмотки.

3.5. Алгоритм полного расчета схемы трехфазной двухслойной четырехполюсной обмотки.

3.6. Особенности возникновения электромагнитного момента АМ.

3.7. Качественный анализ зависимостей тока ротора и электромагнитного момента АМ от скольжения.

3.8. Т-образная схема замещения асинхронной машины при неподвижном и вращающемся роторе.

3.9. Уравнения электрического равновесия АМ и векторные диаграммы

для двигательного и генераторного режимов работы асинхронной машины.

3.10. Энергетические диаграммы АМ для различных режимов её работы. КПД асинхронной машины.

3.11. Г-образная схема замещения АМ. Цели и методы формирования и использования.

3.12. Рабочие характеристики асинхронной машины.

3.13. Назначение и методы получения круговой диаграммы АМ.

3.14. Вывод и анализ уравнения электромеханической характеристики АМ.

3.15. Вывод и анализ уравнения механической характеристики АМ.

3.16. Построение механической характеристики АМ по каталожным данным (формула Клосса).

3.17. Методы изменения координат «особых» точек механической характеристики АМ.

3.18. Общие сведения о способах регулирования выходной скорости асинхронных двигателей (АД). Достоинства и недостатки различных способов регулирования выходной скорости асинхронных двигателей (АД).

3.19. Особенности регулирования выходной скорости АД путем изменения частоты питающего напряжения.

3.20. Особенности регулирования выходной скорости АД путем изменения числа пар полюсов.

3.21. Регулирование выходной скорости АД изменением скольжения без использования мощности скольжения.

3.22. Регулирование выходной скорости АД с использованием мощности скольжения (асинхронные каскады).

3.23. Способы пуска асинхронных двигателей. АД с короткозамкнутым ротором.

3.24. Способы пуска асинхронных двигателей с фазным ротором.

3.25. Асинхронные короткозамкнутые двигатели с улучшенными пусковыми свойствами.

3.26. Однофазные асинхронные двигатели.

3.27. Асинхронные исполнительные двигатели систем автоматики.

3.28. Асинхронные двигатели со сплошным ротором.

3.29. Электромагнитные индукционные насосы. Линейные и дуговые асинхронные двигатели.

3.30. Асинхронные информационные микромашины (асинхронные тахогенераторы, вращающиеся трансформаторы, сельсины).

3.31. Использование асинхронной машины в режиме генератора. Асинхронный генератор - преобразователь частоты.

3.32. Трехфазный индукционный регулятор.

Блок экзаменационных заданий № 4

Синхронные машины (СМ)

4.1. Принципы создания многофазных систем электродвижущих сил и напряжений.

4.2. Устройство и физические основы функционирования синхронной машины в генераторном режиме, двигательном режиме и режиме компенсатора.

4.3. Реакция якоря и кривые распределения индукции в неявнополюсной синхронной машине при различном характере тока якоря.

4.4. Особенности реакции якоря в явнополюсной синхронной машине при различном характере тока якоря.

4.5. Конструктивные схемы синхронной машины и их влияние на электрические и эксплуатационные свойства синхронных машин.

4.6. Магнитные потоки нагруженной синхронной машины в установившихся режимах работы.

4.7. Индуктивные сопротивления, отношение короткого замыкания и другие параметры синхронной машины.

4.8. Способы подавления высших гармоник в кривых ЭДС синхронных машин.

4.9. Уравнения электрического равновесия и векторные диаграммы якорной цепи неявнополюсной синхронной машины.

4.10. Уравнения электрического равновесия и векторные диаграммы якорной цепи явнополюсной синхронной машины.

4.11. Упрощенные векторные диаграммы цепи якоря неявнополюсной и явнополюсной синхронной машины.

4.12. Уравнения электромагнитной мощности и электромагнитного момента (угловые характеристики) явнополюсной и неявнополюсной синхронных машин. Перегрузочная способность синхронной машины.

4.13. Характеристика холостого хода и короткого замыкания синхронного генератора. Зависимость тока короткого замыкания синхронного генератора от частоты вращения ротора.

4.14. Нагрузочные и внешние характеристики синхронного генератора.

4.15. Схемы для экспериментального определения эксплуатационных характеристик синхронного генератора.

4.16. Включение на параллельную работу синхронных машин методом точной синхронизации (схема, условия включения).

4.17. Включение на параллельную работу синхронных машин методом грубой синхронизации, или самосинхронизации. (схема, условия включения).

4.18. Эксплуатационные режимы синхронной машины при её работе параллельно с сетью.

4.19. U-образные характеристики СМ.

4.20. Области применения и эксплуатационные характеристики синхронных двигателей.

4.21. Способы пуска синхронных двигателей. Схемы для реализации пуска синхронного двигателя.

4.22. Рабочие характеристики синхронных двигателей.

4.23. Синхронные компенсаторы.

4.24. Реактивный синхронный двигатель: устройство, достоинства и недостатки.

- 4.25. Шаговые синхронные двигатели с активным ротором.
- 4.26. Реактивные редукторные шаговые двигатели.
- 4.27. Сравнительные характеристики шаговых двигателей различных типов (шаг, предельная механическая характеристика, приемистость).
- 4.28. Общая характеристика переходных процессов синхронного генератора при внезапном коротком замыкании.
- 4.29. Магнитные потоки синхронного генератора на различных стадиях внезапного короткого замыкания.
- 4.30. Схемы замещения якорной цепи синхронного генератора, соответствующие «сверхпереходной», «переходной» и установившейся стадии короткого замыкания синхронного генератора.
- 4.31. Колебания ротора при резком изменении вращающего момента СМ.
- 4.32. Статическая и динамическая устойчивость СМ.

Блок экзаменационных заданий № 5 **Машины постоянного тока (МПТ)**

Устройство и физические основы функционирования машины постоянного тока (МПТ) в генераторном режиме.

Устройство и физические основы функционирования машины постоянного тока (МПТ) в двигательном режиме.

Общие сведения об устройстве и принципе действия бесколлекторных (бесконтактных) МПТ.

Области применения и схемы включения машин постоянного тока.

Общие сведения о конструкции якорных обмоток машин постоянного тока.

Поперечная реакция якоря машины постоянного тока. Причины появления и влияние на эксплуатационные свойства МПТ.

Продольная реакция якоря машины постоянного тока. Причины появления и влияние на эксплуатационные свойства МПТ.

Особенности работы щеточно-коллекторного узла (коммутация) в коллекторных машинах постоянного тока.

Причины и признаки плохой коммутации МПТ. Методы улучшения качества коммутации.

Математические соотношения для определения основных параметров и характеристик генераторов постоянного тока.

Математические соотношения для определения основных параметров и характеристик двигателей постоянного тока.

Внешние характеристики генераторов постоянного тока с различными типами возбуждения.

Особенности генератора постоянного тока с параллельным возбуждением (с самовозбуждением).

Моментные, электромеханические и механические характеристики двигателей постоянного тока с различными типами возбуждения.

Способы пуска двигателей постоянного тока.

Способы регулирования выходной скорости двигателей постоянного тока.

4.4.3. Исходные данные и условия задач для практической части итогового экзамена

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Условия задач

1. Найдите потокосцепления главного магнитного поля с первичной и вторичной обмотками трансформатора, у которого число витков W_1 , W_2 и главный магнитный поток в магнитопроводе равен $\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$. Чему равна частота питающего напряжения?

2. Активное сечение стали магнитопровода трансформатора $S_{ст}$ охвачено обмотками W_1 и W_2 . Определите действующие, амплитудные и мгновенные значения ЭДС, созданные в обмотках главным магнитным потоком $\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$, амплитудное значение индукции которого B_m , а частота питающего напряжения составляет f_1 .

3. Сечение магнитопровода трансформатора $S_{ст}$. Коэффициент заполнения пакета сталью $K_{ст}$. Определите число витков первичной обмотки, обеспечивающее при разомкнутой вторичной обмотке максимальное значение индукции в сердечнике B_m при напряжении U_1 и частоте f_1 .

4. Активное сечение магнитопровода $S_{ст}$. Найдите необходимое число витков каждой обмотки трансформатора для получения в режиме холостого хода на вторичной обмотке напряжения U_2 при напряжении первичной обмотки U_1 , частоте f_1 , максимальном значении индукции B_m .

5. Первичное напряжение трансформатора U_1 , вторичное U_2 . Для определения числа витков первичной и вторичной обмоток на сердечник намотали дополнительную обмотку из W_d . В режиме холостого хода напряжение на дополнительной обмотке U_d . Определите число витков штатных обмоток трансформатора и амплитудное значение главного потока при частоте f_1 .

6. Однофазный трансформатор в режиме ХХ при подключении к сети напряжением U_1 потребляет активную мощность P_0 при токе I_0 . Определите полную и реактивную мощность трансформатора в режиме ХХ.

7. Рассчитайте активную и реактивную составляющие входного сопротивления однофазного трансформатора, если в режиме ХХ при напряжении U_1 и токе I_0 он потребляет мощность P_0 .

8. В режиме ХХ при напряжении сети U_1 на вторичной обмотке трансформатора создается ЭДС U_2 . Пренебрегая током намагничивания определите ток, потребляемый трансформатором из сети при подключении к нему нагрузки с током I_2 .

9. Однофазный трансформатор на холостом ходу при напряжении сети U_1 потребляет мощность P_0 и ток I_0 . Напряжение на вторичной обмотке равно U_2 . Какие параметры трансформатора можно определить по

приведенным данным?

10. Однофазный трансформатор в режиме КЗ питается напряжением U_k . При этом в его первичной обмотке протекает номинальный ток I_n , а потребляемая мощность равна P_k . Определите ток вторичной обмотки, а также сопротивления обмоток трансформатора, если коэффициент трансформации равен $K_{тр}$.

Исходные данные для расчета параметров и режимов работы трансформаторов

Параметр	Вариант										Задача №
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
W 1	34	836	190	125	350	130	415	248	170	875	1
W2	850	182	850	348	130	380	145	152	298	48	
Фм, Вб	0,03	0,04	0,08	0,085	0,09	0,03	0,04	0,045	0,06	0,07	1,2
W₀	314	314	314	314	314	314	314	314	314	314	
Ст, 2 см	8	10	20	22	24	9	11	12,5	14	16	2,3,4
W_m, Тл	1,3	1,19	1,2	1,2	1,2	1,25	1,35	1,15	1,4	1,45	
f₁, Гц	60	50	50	50	50	50	60	60	60	50	3,4,5
Кст	0,94	0,95	0,93	0,96	0,92	0,97	0,93	0,92	0,95	0,94	3,4
U₂, В	24	127	450	127	380	230	36	220	400	400	3,4,5,6,7,8
U₁, В	380	380	220	220	220	5770	220	5000	35000	10000	
W_д	35	40	45	50	25	20	30	20	25	35	5
U_д, В	75	60	70	65	50	140	87	130	75	150	
P₀, Квт	0,1	0,07	0,15	0,17	1,1	1,2	0,08	1,4	1,3	1,0	6,7,9
I₀, А	0,5	1,5	0,8	1,2	5,5	2,3	0,5	0,4	0,1	0,15	
I₂, А	197	112	9,8	244	79	1440	76	227	218	93	8
U_к, В	19	30,4	11	14	13	346	12	300	1750	700	10
I_n, А	12,5	37	19,6	192	131	57,6	12,6	10,0	2,5	3,7	
P_к, Квт	0,3	0,21	0,45	0,51	3,3	3,6	0,24	4,2	3,9	3,0	
K_{тр}	15,8	3,0	0,5	1,27	0,6	25	6	22,7	87,5	25	

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Условия задач

1. Шестиполусная асинхронная машина (АМ) питается от трехфазной сети с частотой f_1 . Скольжение АМ равно s . Найти угловую скорость и частоту вращения магнитного поля и ротора. Как изменятся эти величины при заданной частоте сети f ? В каком режиме работает АМ?

2. В цепь ротора четырехполусной АМ с фазным ротором (ФР) подключен прибор магнитоэлектрической системы с нулем посередине шкалы. При питании обмотки статора от сети частотой f_1 стрелка прибора за t секунд делает Z полных колебаний. Определите возможный режим работы АМ и частоту вращения ротора.

3. Номинальная частота вращения ротора АМ составляет n_n . Определите ЭДС фазы ротора, если при неподвижном роторе она равна $E_{2к}$, а частота питающей сети равна f_1 .

4. Трехфазная АМ с числом полюсов $2p$ питается от сети частотой f_1 . Ротор двигателя вращается с угловой скоростью ω_2 . Определите частоту вращения МДС ротора относительно ротора и статора.

5. При частотном регулировании АД для сохранения неизменной его перегрузочной способности, при работе АД с вентиляторной нагрузкой на валу, величину питающего напряжения на зажимах статорной обмотки изменили в K_u раз. Как при этом была изменена частота питающего напряжения? Как изменится перегрузочная способность АД, если изменить в K_f раза только лишь частоту питающего напряжения без изменения его величины?

6. Определите сопротивление дополнительного резистора, введенного в каждую фазу ротора АД, если при номинальной нагрузке частота вращения снижается от n_n до n_2 . Сопротивление фазы ротора равно R_2 , частота питающего напряжения равна f_1 . Как при этом изменится частота вращения магнитного поля?

7. Номинальная частота вращения ротора АД при частоте питающего напряжения f_1 равна n_n . Активное сопротивление фазы ротора равно R_2 . Как изменится частота вращения ротора и магнитного поля, если при неизменном моменте на валу ввести в каждую фазу ротора добавочное сопротивление $R_{2д}$?

8. Кратность пускового момента трехфазного АД $M_{пуск} / M_n = K_p$. Определите наибольший момент нагрузки на валу АД, при котором возможен пуск двигателя переключением обмотки статора со звезды на треугольник, если напряжение сети равно фазному номинальному напряжению АД.

9. ЭДС фазы ротора АМ при скольжении s равна E_s . Определите ток фазы неподвижного ротора, если активное сопротивление фазы ротора R_2 , а индуктивность рассеяния фазы ротора равна L_2 Гн, частота сети равна f_1 .

10. Активное сопротивление фазы ротора АМ равно R_2 . ЭДС фазы неподвижного ротора равна $E_{2к}$ при токе $I_{2к}$. Определить индуктивное сопротивление фазы ротора при скольжении s .

Исходные данные для расчета параметров и режимов работы асинхронных машин

Параметр	Вариант										Задача №
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
f_1 ; Гц	50	60	50	60	50	60	50	60	50	60	1,3,4,6,7,9
s , %	3,65	2,65	2,35	1,65	3,35	3,0	2,5	2,0	1,67	1,34	1,9,10
f ; Гц	60	50	60	50	60	50	60	50	60	50	1
t ; с	5	6	7	8	9	10	12	13	14	15	2
Z	7	10	8	10	13	18	15	15	10	12	
n_n , об/мин	289	292	293	295	145	146	147	970	980	730	3, 6
$E_{2к}$, В	305	300	295	340	160	230	200	250	325	150	3,10

2р	2	4	6	8	10	12	2	4	6	8	4
ω_2, рад/с	290	145	98	71	58	45	270	135	90	65	
Ku	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,2	1,3	1,45	1,56	1,65	5
Kf	1,65	1,56	1,45	1,45	1,2	1,3	1,8	1,7	1,6	1,5	
R2, Ом	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	6,7,9,10
n2, об/мин	250	260	270	230	100	120	130	700	600	500	6
	0	0	0	0	0	0	0				
R2д, Ом	0,8	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,15	0,1	7
Kп	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,45	1,55	1,65	8
Es, В	9	7	6	5	4,5	6,5	5,5	4,8	4	3,5	
L2, мГн	0,2	0,15	0,1	0,3	0,25	0,35	0,28	0,4	0,38	0,45	9
I2к, А	600	60	90	120	200	240	300	450	100	150	
											10

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Содержание задания

1. Построить векторные диаграммы для неявнополюсного (НЯП) и явнополюсного (ЯП) синхронного генератора (СГ) для номинального режима работы.
2. Построить угловую характеристику ЯПСГ при номинальных значениях параметров питания и сопротивлений (значение E_a определить на основании векторной диаграммы). Указать запас статической устойчивости СМ.
3. Определить отношение короткого замыкания (ОКЗ) ЯПСГ.

Исходные данные и параметры 3-х фазного синхронного генератора (соединение фаз – Y)

Параметр	Вариант										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
Sн, кВА	37,5	62,5	94	125	187	250	375	500	625	750	940
Uлн	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
cos φн	0,9	0,85	0,8	0,9	0,85	0,8	0,9	0,85	0,8	0,85	0,9
nн, 1/мин	1500	1000	750	1500	1000	750	1000	1500	750	1000	1500
Ra * 100 (о.е.)	4,65	2,96	3,59	3,03	2,84	2,54	1,85	3,97	1,45	1,3	1,26
Xсн,(о.е.)	2,4	2,2	2,25	1,3	1,2	2,1	1,7	2,0	2,3	2,4	2,3
Xs*10, (о.е.)	1,08	0,81	0,89	0,78	0,76	0,55	0,52	0,45	0,98	0,86	0,91
Xd, (о.е.)	2,23	2,08	2,15	1,16	1,0	1,92	1,6	1,66	2,18	2,3	2,11
Xq, (о.е.)	1,1	1,04	1,07	0,58	0,5	0,96	0,8	0,85	1,1	1,15	1,05
W1	18	14	12	16	20	18	14	16	20	18	14

Характеристика холостого хода СГ

Iв*, (о.е.)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
Eо*, (о.е.)	0,58	1,0	1,21	1,33	1,4	1,46	1,51

где: S_n – полная номинальная мощность; n_n - номинальная частота вращения; $\cos \varphi_n$ – номинальный коэффициент мощности; $U_{лн}$ – номинальное линейное напряжение; R_a , $X_{сн}$, X_d , X_q , X_s – сопротивления якоря соответственно: активное, синхронное индуктивное, индуктивное по продольной оси, индуктивное по поперечной оси, рассеяния; W_1 – число витков фазы статора;

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Условия задач

1. Якорь МПТ имеет Z пазов, число секций в катушке равно S_k , число витков в секции равно W_c . Определите:

- число коллекторных пластин;
- общее число секций обмотки;
- общее число эффективных проводников обмотки;
- число эффективных проводников в пазу.

2. Число пазов якоря p -полюсной МПТ равно Z , число секций в катушке простой петлевой обмотке якоря равно S_k . Определите:

- число параллельных ветвей якорной обмотки;
- первый частичный шаг обмотки;
- шаг уравнивательных соединений.

3. Угловая скорость вала $2p$ -полюсной МПТ равна ω , число витков параллельной ветви простой волновой обмотки якоря равно $W_{пв}$, магнитный поток на полюс равен Φ . Определите коэффициент C_o и ЭДС якоря.

4. Якорь $2p$ -полюсной МПТ имеет K коллекторных пластин, число витков секции простой волновой обмотки якоря равно W_c , средний магнитный поток равен Φ , ток якоря равен I_a . Определите электромагнитный момент машины.

5. Якорь $2p$ -полюсной МПТ имеет простую волновую обмотку, состоящую из S W_c -витковых секций. ЭДС обмотки якоря равна E_a , частота вращения n , ток якоря I_a . Определите величину магнитного потока и электромагнитный момент машины.

6. Определите потребляемый ток и частоту вращения двигателя последовательного возбуждения с номинальным напряжением U_n , номинальным током $I_{ан}$ и номинальной частотой вращения n_n , если при неизменном моменте на валу уменьшить напряжение до величины U_i . Сопротивление якорной цепи равно R_a .

7. В таблице приведена в относительных единицах ХХХ МПТ для частоты вращения n_n . Номинальное напряжение питания равно U_n .

I_B^* , о.е.	0,0	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	3,0
E_o^* , о.е.	0,0	0,116	0,290	0,580	0,830	1,0	1,2	1,33	1,46

Указанная МПТ работает в режиме двигателя параллельного возбуждения без нагрузки на валу при напряжении сети U_c . Как нужно изменить сопротивление цепи возбуждения чтобы двигатель в указанном режиме имел частоту вращения n ?

8. МПТ работает в режиме двигателя параллельного возбуждения при следующих параметрах: U_c ; I_a ; I_b ; R_a . Определите напряжение якоря и мощность указанной МПТ при ее работе в режиме генератора при сохранении тех же значений тока возбуждения, тока якоря и частоты вращения.

9. Генераторный режим МПТ характеризуется следующими параметрами: U_a ; I_a ; n ; P ; R_a . С какой частотой вращения будет работать данная машина в режиме двигателя при тех же значениях напряжения, тока якоря и тока возбуждения?

10. Генераторный режим МПТ характеризуется следующими параметрами: U_a ; n ; P ; R_a ; R_b . Определите потребляемую мощность и частоту вращения указанной МПТ при ее работе в двигательном режиме при тех же значениях напряжения якоря, тока якоря и тока возбуждения.

Исходные данные для расчетов параметров и режимов работы МПТ

Параметр	Вариант (последняя цифра шифра студента, при «0» вариант 10)										Задача №
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Z	33	27	18	38	42	34	20	21	22	24	1,2
S_k	3	3	3	2	2	2	4	3	2	3	1,2
W_c	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	1
K	99	81	54	76	84	68	80	63	44	72	4
$\Phi, 3 Bб*10$	5,3	13,7	6,5	7,25	9,5	4,25	8,04	27,5	12,4	10,5	3,4
$2p$	4	6	4	4	6	4	4	8	6	6	2,3,4,5
S	99	81	54	76	84	68	80	63	44	72	5
W_c	3	2	3	3	2	3	3	1	2	2	4
$W_{пв}$	132	81	81	114	84	102	124	31	44	72	3
E_a, B	225	125	135	250	130	100	215	200	120	209	5
U_H	190	95	85	210	90	105	195	180	100	200	6
U_c, B	220	110	110	220	110	110	220	220	110	220	7,8
$R_a, Ом$	0,6	0,65	1,2	0,6	0,7	0,75	0,15	0,35	0,4	0,2	6,8,9,10
$P, кВт$	4,0	3,2	2,0	4,2	3,0	3,5	15	7,5	6,0	11,0	9,10
$\omega, рад/с$	90	75	45	73	48	42	140	100	87	106	3
$n_H, об/м$	900	750	450	730	475	425	1400	1000	875	1060	5,6,7,10
$n, об/м$	1000	900	600	850	520	500	1500	1100	900	1200	7,9
U_a, B	220	110	110	220	110	110	220	220	110	220	9,10
I_a, A	24,0	38,0	29,0	26,5	41,0	48,0	85,0	43,5	64,0	61,0	4,5,8,9
$I_{ан}, A$	24,0	38,0	29,0	26,5	41,0	48,0	85,0	43,5	64,0	61,0	6
I_b, A	3,0	4,0	3,0	2,5	4,5	5,0	8,5	4,3	6,4	6,1	8
$R_b, Ом$	73,0	27,5	37,0	88,0	24,0	22,0	26,0	51,0	17,0	36,0	10

4.4.4. Организация итогового контроля знаний по варианту «Б» (итоговое тестирование)

На итоговом тестировании студент должен дать ответы на тестовые задания, охватывающие весь материал дисциплины. Поэтому, тестовые задания, которые получает студент на итоговом тестировании, случайным образом

выбираются из общей базы тестовых заданий, каждое из которых соответствует определенной теме.

При этом вся база тестовых заданий разбита на 5 блоков, сформированных по следующему принципу:

Блок №1: «Общие основы функционирования и устройства электрических машин».

Блок №2: «Трансформаторы».

Блок №3: «Асинхронные машины (с элементами общей теории машин переменного тока)».

Блок №4: «Синхронные машины (с элементами общей теории машин переменного тока)».

Блок №5: «Машины постоянного тока».

Результаты тестирования оцениваются рейтинговым баллом в соответствии с соответствующим рейтинговым «весом» каждой темы тестового задания (см. табл. 2.6.2).

Итоговая оценка определяется в соответствии со следующей таблицей:

Набранный при тестировании суммарный рейтинговый балл по (в процентах от максимально возможного)	Оценка по пятибальной шкале
85-100%	5 - отлично
70-84%	4 - хорошо
55-69%	3 – удовлетворительно
Менее 55%	2 - неудовлетворительно

Общая итоговая оценка по дисциплине определяется как среднее арифметическое оценок по всем разделам дисциплины с округлением по правилам математики. **В случае получения рейтингового балла менее 50% от максимально возможного по какому-либо разделу дисциплины итоговое контрольное испытание считается не пройденным и студенту назначается дополнительное углубленное тестирование по данному разделу.** Образец теста итогового контроля представлен ниже.

4.4.5. Образец теста итогового контроля (ТИК) с указанием «веса» каждого тестового задания

Тестовое задание	Варианты ответов	Макс. балл – 60,
Блок № 1		5
1. С какой целью магнитопроводы электрических машин и аппаратов изготавливают из ферромагнитных материалов?	А). С целью уменьшения сопротивления магнитному потоку. Б). С целью уменьшения габаритов и веса аппаратов. В). С целью увеличения механической	0,8

	прочности аппарата.	
2. Какому реальному физическому явлению соответствует расчетный параметр «Индуктивное сопротивление электрическому току»?	А). ЭДС самоиндукции. Б). Процессу обмена реактивной энергией между катушкой и источником. В). Накоплению энергии магнитного поля.	0,7
3. В каком случае рассматриваемый объект является для внешней среды (взаимодействующего с ним внешнего объекта) источником энергии?	А). Если знак мощности, развиваемой объектом на выходе, положителен. Б). Если знак мощности, развиваемой на выходе объекта, положителен. В). Если знак мощности, развиваемой на выходе объекта, отрицателен.	1,0
4. Какой режим электрической машины называется «Продолжительным режимом»? Какое условное обозначение имеет этот режим?	А). S1 - режим, при котором время работы машины при практически неизменных нагрузке и температуре охлаждающей среды достаточно для нагрева всех ее частей до практически установившейся температуры. Б). S2 - режим, при котором машина успевает нагреться до установившейся температуры. В). S3 - режим, который характеризуется неизменными потерями в течение всего времени работы машины.	0,5
5. Почему трансформатор нельзя отнести к классической электрической машине?	А). В трансформаторе отсутствует электромеханическое преобразование энергии Б). В трансформаторе отсутствуют вращающиеся (перемещающиеся) конструктивные элементы. В). В трансформаторе отсутствует рабочий воздушный зазор.	1,0
6. Какую формулу применяют для определения КПД электродвигателей и почему?	А). $\eta = 1 - \Sigma \Delta P / P_1$, потому что в формуле для расчета КПД желательно использовать данные лишь электрических измерений. Б). $\eta = 1 - \Sigma \Delta P / (P_2 + \Sigma \Delta P)$, потому что данная формула обеспечивает максимальную точность. В). $\eta = P_2 / P_1$ для упрощения вычислений.	1.0
Блок № 2		13
7. Как можно изменить значение коэффициента трансформации трансформатора?	А). Путем изменения соотношения между числами витков первичной и вторичной обмоток. Б). Путем увеличения площади сечения магнитопровода. В). Путем подмагничивания магнитопровода постоянным током.	3,5
8. Какой фазовый сдвиг имеют синусоиды ЭДС первичной и	А). ЭДС первичной и вторичной обмоток совпадают между собой по фазе и отстают от	3,0

вторичной обмоток между собой и относительно синусоиды основного магнитного потока?	магнитного потока на четверть периода. Б). ЭДС первичной обмотки отстаёт от магнитного потока на четверть периода, а ЭДС вторичной обмотки на четверть периода опережает магнитный поток. В). ЭДС первичной и вторичной обмоток совпадают между собой по фазе и опережают магнитный поток на четверть периода.	
9. Какие схемы соединения фазных обмоток трехфазного трансформатора являются наиболее благоприятными, с точки зрения вредных последствий несинусоидальности и намагничивающего тока?	А). Y/Δ или Δ/Y . Б). Y/Y , Y/Y_H . В). Y/Y .	2,0
10. Какие условия должны быть выполнены для безаварийного включения и нормальной работы параллельно работающих трансформаторов?	А). 1 - равенство коэффициентов трансформации; 2 - тождественность групп соединений; 3 - равенство между собой активных и реактивных составляющих напряжения короткого замыкания. Б). 1 - равенство первичных и вторичных напряжений; 2 - равенство параметров схем замещения; 3 - идентичность схем соединений обмоток. В). 1 - равенство коэффициентов трансформации; 3 - равенство внутренних сопротивлений; 3 - равенство номинальных мощностей.	3,0
11. Какова принципиальная особенность измерительного трансформатора тока по сравнению с классическим силовым трансформатором?	А). Трансформатор тока не обладает свойством саморегулирования. Б). У трансформатора тока отсутствует первичная обмотка. В). МДС трансформатора тока не зависит от режима работы вторичной цепи.	1,5
Блок № 3		18
12. Каким образом можно изменить направление вращения (перемещения) магнитного поля в рабочем зазоре трёхфазной электрической машины?	А). Необходимо поменять местами две любые фазы питающего напряжения, подаваемого на зажимы трехфазной обмотки статора. Б). Необходимо поменять местами все три фазы питающего напряжения, подаваемого на зажимы трехфазной обмотки статора. В). Необходимо изменить схему соединения обмотки ротора.	3,0
13. Перечислите принципиальные конструктивные особенности АМ с фазным ротором, отличающие его от АМ с	А). В АМ с фазным ротором имеется возможность включать цепь обмотки ротора через контактные кольца и электрические щетки дополнительные сопротивления или другие регулировочные устройства и внешние цепи.	2,5

короткозамкнутым ротором?	<p>Б). Обмотка фазного ротора изготавливается также, как и обмотка статора.</p> <p>В). У АМ с фазным ротором имеет лучшие регулировочные свойства.</p>	
14. Назовите одну из важнейших особенностей короткозамкнутой АМ (по сравнению с АМ с фазным ротором), которую нужно учитывать при приведении параметров схемы замещения.	<p>А). Неравенство между собой коэффициента трансформации ЭДС и коэффициента трансформации тока.</p> <p>Б). Меньшее значение индуктивного сопротивления контура намагничивания.</p> <p>В). Повышенное значение тока холостого хода.</p>	4,0
15. Дайте сравнительную оценку асинхронных двигателей (АД) с точки зрения их чувствительности к колебаниям напряжения сети?	<p>А). АД наиболее чувствительны к колебаниям напряжения сети, по сравнению с другими типами электродвигателей.</p> <p>Б). АД наименее чувствительны к колебаниям напряжения сети, по сравнению с другими типами электродвигателей.</p> <p>В). Чувствительность АД к колебаниям напряжения сети не отличается от других типов электродвигателей.</p>	2,0
16. На какие две принципиально отличающиеся друг от друга группы можно разделить все возможные способы регулирования выходной скорости АД?	<p>А). <u>1 группа</u>: способы регулирования, основанные на изменении угловой скорости магнитного поля; <u>2 группа</u>: способы регулирования, основанные на изменении скольжения.</p> <p>Б). <u>1 группа</u>: способы регулирования, основанные на изменении угловой скорости магнитного поля; <u>2 группа</u>: способы регулирования, основанные на изменении частоты питающего напряжения.</p> <p>В). <u>1 группа</u>: способы регулирования, основанные на изменении величины или частоты питающего напряжения; <u>2 группа</u>: способы регулирования, основанные на изменении сопротивлений цепи статора или ротора.</p>	2,5
17. Каким основным общим недостатком с точки зрения пусковых свойств обладают АД?	<p>А). Большой пусковой ток при незначительном пусковом моменте на валу.</p> <p>Б). Возможность перегрева при частых пусках.</p> <p>В). При пуске АД может произойти глубокий провал напряжения в сети и опрокидывание других работающих от данной сети двигателей.</p>	2,0
18. Перечислите достоинства конденсаторных двигателей по сравнению с двигателями с экранированными полюсами.	<p>А). Более высокие $\cos\phi$, КПД и пусковой момент.</p> <p>Б). Большая простота конструкции и вследствие этого более высокая надежность в эксплуатации.</p> <p>В). Меньшие габариты и масса.</p>	2,0

Блок № 4		15
19. Какая связь существует между пространственным (геометрическим) углом сдвига осей фазных обмоток статора синхронной машины и электрическими углами сдвига фазных ЭДС E_1 , E_2 и E_3 , наводимых полем индуктора в якорной обмотке статора?	А). $\alpha_{эл} = \rho \alpha_{геом}$ Б). $\alpha_{эл} = \alpha_{геом}$ В). $\alpha_{геом} = \rho \alpha_{эл}$	2,0
20. Как сдвинута ось вращающейся МДС якорной обмотки (статора) по отношению к оси МДС вращающегося индуктора (ротора) в генераторном режиме синхронной машины?	А). Против вращения. Б). В сторону вращения. В). Оси совпадают.	3,0
21. Чем отличается реакция якоря СМ при различном характере якорного тока?	А). При емкостном характере якорного тока реакция якоря СМ является подмагничивающей, а при индуктивном – размагничивающей. Б). При емкостном характере якорного тока реакция якоря СМ является размагничивающей, а при индуктивном – подмагничивающей. В). Ничем не отличается.	3,0
22. В каких случаях бросок тока при включении СГ на параллельную работу приводит к механическому удару на валу приводного двигателя?	А). Если вектор ЭДС якоря включаемого генератора не совпадает по фазе с вектором напряжения сети. Б). При недовозбуждении генератора. В). При перевозбуждении генератора.	4,0
23. Какие из перечисленных параметров характеризуют неустановившиеся процессы синхронной машины (СМ), связанные с колебаниями ротора?	А). Коэффициент демпфирования. Б). Продольное переходное индуктивное сопротивление обмотки якоря. В). Поперечное сверхпереходное сопротивление обмотки якоря.	1,5
24. Какие достоинства имеют реактивные шаговые двигатели (ШД) по сравнению с ШД с активным ротором?	А). Более низкая стоимость, более высокая надежность, меньший шаг. Б). Большой синхронизирующий момент, лучшая устойчивость в переходных режимах, большая рабочая частота вращения.. В). Более простая система управления.	1,5
Блок № 5		9
25. Где конструктивно располагаются обмотки возбуждения машины постоянного тока?	А). На сердечниках главных полюсов. Б). На сердечниках главных и добавочных полюсов. В). В зависимости от типа на сердечниках якоря,	2,5

	главных и добавочных полюсов.	
26. Как изменяется жесткость механической характеристики (МХ) двигателя постоянного тока (ДПТ) при сдвиге щеток в сторону вращения?	А). Жесткость МХ уменьшается. Б). Жесткость МХ увеличивается. В). Жесткость МХ не изменяется.	2,0
27. Как можно изменить полярность выходного напряжения генератора параллельного возбуждения без переключений в силовых цепях и без изменения его характеристик?	А). Необходимо перемагнитить магнитопровод генератора за счет кратковременного подключения обмотки возбуждения к постороннему источнику тока и снова возбудить его, выполнив все условия самовозбуждения. Б). Необходимо поменять местами провода на зажимах обмотки параллельного возбуждения. В). Необходимо изменить направление вращения якоря генератора.	2,0
28. При каком типе возбуждения ДПТ может развить наибольший пусковой момент (относительно номинального)?	А). При последовательном. Б). При параллельном. В). При смешанном согласном. Г). При смешанном встречном.	2,5

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

1. Информация о дисциплине	3
2. Рабочие учебные материалы	5
2.1. Рабочая программа	5
2.2. Тематические планы дисциплины	11
2.3. Структурно-логическая схема дисциплины «электрические машины»	21
2.4. Временной график изучения дисциплины при использовании информационно-коммуникационных технологий	22
2.5. Практический блок	22
2.6. Балльно-рейтинговая система оценки знаний	23
3 Информационные ресурсы дисциплины	26
3.1. Библиографический список	26
3.2. Опорный конспект	27
3.2.1. Общие пояснения	27
3.2.2. Базовый (опорный) учебный материал и перечень контрольных вопросов по дисциплине «электрические машины»	28
Введение	28
Раздел 1. Общие основы функционирования и устройства электрических машин	31
Тема 1.1. Физические основы электромагнитного и электромеханического преобразования энергии в электрических машинах	31
Тема 1.2. Термины и определения, характеризующие режимы работы электрических машин	33
Тема 1.3. Основы классификации электрических машин	36
Тема 1.4. Потери и КПД электрических машин	37
Тема 1.5. Нагрев и охлаждение электрических машин	37
Тема 1.6. Общие требования к электрическим машинам и тенденции развития электромашиностроения	38
Раздел 2. Трансформаторы	38
Тема 2.1. Общие сведения об устройстве, назначении и принципе действия трансформаторов	38
Тема 2.2. Конструктивные особенности трансформаторов	43
Тема 2.3. Математическое описание физических процессов трансформатора	44
Тема 2.4. Особенности устройства и работы трехфазных трансформаторов	53
Тема 2.5. Эксплуатационные режимы работы и характеристики трансформаторов	57
Тема 2.6. Автотрансформаторы и специальные трансформаторы	63
Раздел 3. Общие основы теории и устройства синхронных и асинхронных машин	64
Тема 3.1. Фазные обмотки реальных трехфазных асинхронных и синхронных машин	64
Тема 3.2. Способы подавления высших гармоник в кривых МДС и ЭДС	

синхронных и асинхронных электрических машин	68
Раздел 4. Асинхронные машины	70
Тема 4.1. Устройство и физические основы функционирования асинхронной машины в двигательном и тормозных режимах	70
Тема 4.2. Математическое описание установившихся процессов в электрических цепях асинхронной машины.....	85
Тема 4.3. Уравнение механической характеристики асинхронной машины.....	93
Тема 4.4. Регулирование выходной скорости асинхронных двигателей ..95	
Тема 4.5. Способы пуска асинхронных двигателей. АД с улучшенными пусковыми свойствами	97
Тема 4.6. Общие сведения о специальных конструкциях и специальных режимах работы асинхронных машин	101
Раздел 5. Синхронные машины	102
Тема 5.1. Устройство и физические основы функционирования синхронной машины в генераторном и двигательном режимах	102
Тема 5.2. Математическое описание установившихся процессов в электрических цепях синхронной машины	110
Тема 5.3. Эксплуатационные режимы и характеристики синхронных машин.....	117
Тема 5.4. Специальные конструкции синхронных машин	125
Тема 5.5. Неустановившиеся и переходные процессы синхронных машин	127
Раздел 6. Машины постоянного тока.....	127
Тема 6.1. Устройство и физические основы функционирования машины постоянного тока в двигательном и тормозных режимах.....	127
Тема 6.2. Реакция якоря машины постоянного тока. Особенности работы щеточно-коллекторного узла (коммутация)	134
Тема 6.3. Эксплуатационные режимы работы и характеристики генераторов постоянного тока.....	136
Тема 6.4. Эксплуатационные режимы работы и характеристики двигателей постоянного тока	144
3.3. Учебное пособие.....	149
3.4. Глоссарий	149
Технические средства обеспечения дисциплины.....	159
Методические указания к выполнению лабораторных работ	160
Методические указания к проведению практических занятий	179
4. Блок контроля освоения дисциплины.....	197
Общие пояснения	197
Задания на контрольные работы и методические указания по их выполнению	198
Текущий контроль	206
Образцы тренировочных тестов	206
Таблица правильных ответов	215
Образец теста рубежного контроля	216

Итоговый контроль	218
Организация итогового контроля по варианту «А» (итоговый экзамен)	218
Вопросы теоретической части итогового экзамена	219
Исходные данные для практической части итогового экзамена ...	224
Организация итогового экзамена по варианту «Б» (итоговое тестирование)	229
Образец теста итогового контроля	230