

Федеральное агентство по образованию
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГОУВПО «АмГУ»

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой АПП и Э

_____ А.Н. Рыбалев

« ____ » _____ 2007 г.

Электромеханика
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

для специальностей 14.02.03 – «Релейная защита и
автоматизация электроэнергетических систем»

14.02.04 – «Электрические станции»

14.02.05 – «Электроэнергетические системы и сети»

14.02.11 – «Электроснабжение»

Составитель: В.И. Усенко, доцент кафедры автоматизации
производственных процессов и электротехники АмГУ

Благовещенск

2007 г.

Печатается по решению
редакционно-издательского совета
энергетического факультета
Амурского государственного
университета.

В.И. Усенко

Учебно-методический комплекс по дисциплине «Электромеханика» для студентов очной формы обучения специальностей 14.02.03 – «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», 14.02.04 – «Электрические станции», 14.02.05 – «Электроэнергетические системы и сети», 14.02.11 – «Электроснабжение». –

Благовещенск. Амурский государственный университет, 2007.

Учебно-методические рекомендации ориентированы на оказание помощи студентам энергетического факультета очной и заочной форм обучения для формирования знаний по теории электромагнитных процессов и электромеханического преобразования энергии, для овладения методами анализа и расчета электромеханических преобразователей, для приобретения студентами навыков самостоятельного исследования путем закрепления теоретического материала в ходе выполнения лабораторных работ, на практических занятиях и в процессе курсового проектирования.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----|
| 1. Рабочая программа..... | 4 |
| 2. План – конспект лекций по дисциплине..... | 21 |
| 3. Конспект лекций по МПТ и трансформаторам ДВГУПС | 29 |
| 4. Практические занятия | 129 |
| 5. Лабораторные работы | 130 |
| 6. Курсовое проектирование..... | 130 |
| 7. Самостоятельная работа | 131 |
| 8. Вопросы к экзаменам и образцы экзаменационные билетов..... | 167 |
| 9. Контроль знаний..... | 173 |

1. Рабочая программа
Федеральное агентство по образованию Российской Федерации
Амурский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

Е.С. Астапова

личная подпись, И.О.Ф

«__» _____ 200__ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по дисциплине

«ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА»

для специальностей:

14.02.03 – «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»

14.02.04 – «Электрические станции»

14.02.05 – «Электроэнергетические системы и сети» 14.02.11 –
«Электроснабжение»

курс 3

лекции 90 ч.

практические 18 ч.

лабораторные 36 ч.

самостоятельная работа 146 ч.

ВСЕГО ЧАСОВ: 290

семестр 5,6

экзамен 5,6 семестр

Составитель В. И. Усенко, доц., к.т.н.

Факультет энергетический

Кафедра АППиЭ

2006 г.

Рабочая программа составлена на основании Государственного образовательного стандарта ВПО специальностей: 14.02.03 – «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», 14.02.04 – «Электрические станции», 14.02.05 – «Электроэнергетические системы и сети», 14.02.11 – «Электроснабжение»

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры АППиЭ
«___» _____ 200 ___ г., протокол №

Зав. кафедрой

А. Н. Рыбалёв

Рабочая программа одобрена на заседании УМС специальностей
14.02.03, 14.02.04, 14.02.05, 14.02.11
«___» _____ 200 ___ г., протокол №

Председатель УМС

Н. В. Савина

СОГЛАСОВАНО

СОГЛАСОВАНО

Начальник УМУ
_____ Г. Н. Торопчина

Председатель УМС факультета
_____ Ю. В. Мясоедов

«___» _____ 200 ___ г.

«___» _____ 200 ___ г.

СОГЛАСОВАНО

Зав. выпускающей кафедрой
_____ Н. В. Савина

«___» _____ 200 ___ г.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ, ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Предметом изучения дисциплины "Электромеханика" являются трансформаторы и электрические машины, представляющие собой главные звенья в современных энергетических установках и системах и являющиеся основными элементами автоматизации. Знание теории и работы трансформаторов и электрических машин имеет большое значение для студентов, специализирующихся в области электроэнергетики. Поэтому целью изучения дисциплины "Электромеханика" является освоение основ теории электромагнитных процессов и электромеханического преобразования энергии, овладение методами анализа и расчета электромеханических преобразователей, приобретение студентами навыков самостоятельного исследования путем закрепления теоретического материала в ходе выполнения лабораторных работ, на практических занятиях и в процессе курсового проектирования.

В процессе всех видов занятий по изучению дисциплины "Электромеханика" студенты должны выполнить следующие задачи:

- изучить устройство и принцип действия различных типов электрических машин и трансформаторов на основе физических явлений и законов, связанных с их работой и усвоенных в курсах физики и теоретической электротехники;

- научиться составлять математические модели и схемы замещения электрических машин и трансформаторов и описывать переходные процессы в них;

- изучить основные характеристики, методы исследования и основы проектирования, усвоить вопросы испытания и эксплуатации электрических машин и трансформаторов.

В результате изучения дисциплины студенты должны приобрести следующие навыки и умения:

- уметь выбирать трансформаторы или электрические машины для конкретных условий;

- уметь определять параметры и выполнять расчеты основных типов трансформаторов и электрических машин;

- уметь проводить испытания, наладку и техническое обслуживание электрических машин и трансформаторов.

Теоретической базой дисциплины "Электромеханика" являются высшая математика, физика, теоретическая и прикладная механика и теоретические основы электротехники. На основе известных законов электромагнетизма создана собственная теория электрических машин и трансформаторов. В свою очередь, изучаемая дисциплина является базой для изучения всех последующих дисциплин энергетики.

СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

1. ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К МИНИМУМУ СОДЕРЖАНИЯ И УРОВНЮ ПОДГОТОВКИ ВЫПУСКНИКОВ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

ОПД 03. Электромеханика: 240 ч.

Электромеханическое преобразование энергии в индуктивных преобразователях; принцип преобразования энергии в электрических машинах; типы электрических машин и других электромеханических преобразователей; трансформаторы; автотрансформаторы; специальные типы трансформаторов; режимы работы трансформаторов; принцип, режимы работы, конструкции и характеристики синхронных и асинхронных машин и машин постоянного тока.

2. ЛЕКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ (90 часов)

5-й семестр (54 час.)

2.1. ВВЕДЕНИЕ - 2 час.

Основные определения. Преобразование эл/энергии в трансформаторе. Электромеханическое преобразование энергии в эл/машине.

2.2. ТРАНСФОРМАТОРЫ - 24 час.

2.2.1. Назначение, область применения и конструкция трансф-ров. –2 ч.

2.2.2. Электромагнитные процессы в тр-ре при холостом ходе.–2 ч.

2.2.3. Работа тр-ра при нагрузке. Приведенный тр-р: схема замещения и векторная диаграмма. –2 ч.

2.2.4. Изменение и регулирование напряжения тр-ра, КПД. – 2 ч.

2.2.5. Трехфазные тр-ры. Схемы и группы соединения. – 2 ч.

2.2.6. Расчет параметров и экспериментальное определение параметров и потерь тр-ра. – 2 ч.

2.2.7. Многообмоточные трансформаторы. – 2 ч.

2.2.8. Автотрансформаторы. – 2 ч.

2.2.9. Параллельное включение тр-ров. – 2 ч.

2.2.10. Несимметричная нагрузка трехфазных тр-ров. – 2 ч.

2.2.11. Переходные процессы при включении тр-ра в сеть и коротком замыкании на выводах его вторичной обмотки. – 2 ч.

2.2.12. Трансформаторы специального назначения. – 2 ч.

2.3. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА - 6 час.

2.3.1. Основные виды машин переменного тока. Вращающееся магнитное поле. Принцип действия асинхронной и синхронной машины. – 2 ч.

2.3.2. Обмотки переменного тока. Эл/движущие силы обмоток. – 2 ч.

3.3. МДС обмоток переменного тока. Магнитные поля и индуктивные сопротивления обмоток. – 2 ч.

2.4. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ. РАБОТА СГ НА АВТОНОМНУЮ СИММЕТРИЧНУЮ НАГРУЗКУ - 12 час.

2.4.1. Общие сведения о СМ. Системы возбуждения. – 2 ч.

2.4.2. Электромагнитные процессы в СМ при холостом ходе. – 2 ч.

2.4.3. Эл/магнитные процессы в СМ без учета насыщения. – 2 ч.

2.4.4. Эл/магнитные процессы в СМ с учетом насыщения. – 2 ч.

2.4.5. Характеристики СГ при автономной нагрузке. – 2 ч.

2.4.6. Эл/магнитное преобразование энергии в СМ. – 2 ч.

2.5. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СГ - 6 час.

2.5.1. Особенности параллельной работы генераторов в эл/системе. Условия и способы включения на параллельную работу. – 2 ч.

2.5.2. Активная и реактивная мощности СМ, включенной в систему. Угловые и U - образные характеристики. – 2 ч.

2.5.3. Колебания СМ при параллельной работе. – 2 ч.

2.6. СД, КОМПЕНСАТОРЫ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ СМ - 4 час.

2.6.1. СД и компенсаторы. – 2 ч.

2.6.2. Одноякорные преобразователи, шаговые СД, индукторные СМ. – 2 ч.

6 семестр (36 час.)

2.7. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ - 18 час.

2.7.1. Принцип действия и конструкция АМ. Эл/магнитные процессы в цепях АМ при ХХ. – 2 ч.

2.7.2. Эл/магнитные процессы в АМ при нагрузке. Потери. КПД. – 2 ч.

2.7.3. Приведение электромагнитных процессов в АМ к трансформатору. Схема замещения АМ. – 2 ч.

2.7.4. Аналитическое и графическое определение электромеханических характеристик асинхронных машин. – 2 ч.

2.7.5. Круговая диаграмма асинхронной машины. – 2 ч.

2.7.6. Пуск и регулирование частоты вращения АД. – 2 ч.

2.7.7. Несимметричные режимы работы асинхронных машин. – 2 ч.

2.7.8. Однофазные АД. – 2 ч.

2.7.9. Специальные исполнения АМ. – 2 ч.

2.8. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ -8 час.

2.8.1. Математическое описание переходных процессов в синхронных машинах. – 2 ч.

2.8.2. Переходные процессы в синхронных машинах при изменении возбуждения и при гашении поля. – 2 ч.

2.8.3. Переходный процесс при симметричном коротком замыкании обмотки статора синхронной машины. – 2 ч.

- 2.8.4. Переходные процессы в асинхронных машинах. – 2 ч.
- 2.9. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА - 10 час.
- 2.9.1. Устройство и принцип действия электрических машин постоянного тока. Расчёт магнитной цепи при холостом ходе. – 2 ч.
- 2.9.2. Схемы обмоток якоря. Электродвижущая сила якоря. Электромагнитный момент. Основные электромагнитные соотношения. –2 ч.
- 2.9.3. Генераторы ПТ. – 2 ч.
- 2.9.4. Двигатели постоянного тока (ДПТ). Характеристики ДПТ в установившемся режиме. – 2 ч.
- 2.9.5. Коллекторные машины переменного тока. – 2 ч.

3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ (5 семестр, 18 час.)

- 3.1. Электромагнитные процессы в трансформаторе при холостом ходе. – 2 ч.
- 3.2. Работа трансформатора при нагрузке. Приведенный трансформатор: схема замещения и векторная диаграмма. Экспериментальное определение параметров. – 2 ч.
- 3.3. Потери и КПД трансформатора. Изменение напряжения. – 2 ч.
- 3.4. Трехфазные трансформаторы. Схемы и группы соединения. – 2 ч.
- 3.5. Основные этапы проектирования трансформатора. – 2 ч.
- 3.6. Электромагнитные процессы в СМ при нагрузке. – 2 ч.
- 3.7. Анализ рабочих характеристик СГ. – 2 ч.
- 3.8. Параллельная работа СГ. – 2 ч.
- 3.9. СД и синхронные компенсаторы – 2 ч.

4. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ - 36 час.

5 семестр (18 час.)

- 4.1. Исследование однофазного трансформатора – 4 ч.
- 4.2. Исследование трехфазного трансформатора – 6 ч.
- 4.3. Опытное определение группы соединения трехфазных трансформаторов – 4 ч.
- 4.4. Исследование однофазного автотрансформатора – 4 ч.

6 семестр (18 час.)

- 4.5. Исследование трехфазного СГ – 6 ч.
- 4.6. Исследование трехфазного СД – 4 ч.
- 4.7. Исследование трехфазного АД – 4 ч.
- 4.8. Исследование генератора ПТ параллельного возбуждения –4 ч.

5. КУРСОВОЙ ПРОЕКТ (40 часов):

1-я часть «Проектирование трансформатора» – 5 семестр

2-я часть «Проектирование гидрогенератора» – 6 семестр

Проект выполняется с использованием пособий:

Усенко В.И., Серов А.Е., Русинов В.Л. Расчет трансформаторов: Учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос. Ун-т, 2002, 113 с.

Усенко В.И., Русинов В.Л. Расчет гидрогенераторов: Учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос. Ун-т, 2004, 113 с.

Критерии оценки курсового проекта на защите:

Оценка «удовлетворительно» ставится, если студент изучил основные положения теории проектирования трансформаторов и гидрогенераторов, особенности их конструкции, методику определения основных размеров и построения эксплуатационных характеристик.

Оценка «хорошо» ставится, если студент изучил основные положения теории проектирования трансформаторов и гидрогенераторов, особенности их конструкции, методику определения основных размеров и построения эксплуатационных характеристик, выбор типа обмоток и их расчет.

Оценка «отлично» ставится, если студент изучил основные положения теории проектирования трансформаторов и гидрогенераторов, особенности их конструкции, методику определения основных размеров и построения эксплуатационных характеристик, выбор типа обмоток и их расчет, методику расчета магнитной цепи трансформаторов и выбор размеров и основных параметров обмотки возбуждения гидрогенераторов.

6. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА (146 час.)

Самостоятельная работа студентов по дисциплине предусматривается в следующих формах:

– выполнение расчетно-графической работы «Расчет параметров и построение характеристик асинхронного двигателя с помощью круговой диаграммы» (6 семестр) и курсового проекта (5 и 6 семестры) – всего 56 часа;

– выполнения заданий по темам практических занятий, подготовка отчетов по ним – 18 часов;

– предварительная подготовка к лабораторным занятиям и составление отчетов по ним – 72 часа.

7. ПЕРЕЧЕНЬ И ТЕМЫ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ФОРМ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

Промежуточный контроль знаний студентов по дисциплине предусматривает две контрольные точки в 5 и 6 семестрах, оценки по которым выставляются на основе информации о выполнении лабораторных работ, РГР, а также на основе тестирования теоретических знаний, полученных за прошедший период обучения. Предусмотрено тестирование по темам:

1. Схемы замещения трансформаторов – 5 семестр, 1-я контрольная точка.
2. Векторные диаграммы синхронных машин – 5 семестр, 2-я контрольная точка.
3. Схемы замещения асинхронных машин – 6 семестр, 1-я контрольная точка.
4. Генераторы постоянного тока – 7 семестр, 2-я контрольная точка.

8. ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНАМ

РАЗДЕЛ: ТРАНСФОРМАТОРЫ

1. Назначение и область применения трансформаторов.
2. Принцип действия и основные элементы конструкции трансформаторов.
3. Холостой ход идеализированного и реального трансформатора (уравнения электродвижущих сил, векторные диаграммы).
4. Намагничивающий ток и ток ХХ трансформатора.
5. Работа трансформатора под нагрузкой. Комплексные уравнения магнитодвижущих сил и токов, уравнения электродвижущих сил.
6. Приведенный трансформатор. Приведение параметров вторичной обмотки трансформатора.
7. Полная векторная диаграмма трансформатора под нагрузкой при активной, активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузках.
8. Схема замещения трансформатора.
9. Опытное определение параметров схемы замещения.
10. Характеристики ХХ КЗ трансформатора.
11. Упрощенная векторная диаграмма трансформатора.
12. Внешние характеристики трансформатора и изменение вторичного напряжения трансформатора.
13. Потери и КПД трансформатора.
14. Трехфазный трансформатор. Схемы и группы соединения.
15. Автотрансформатор.
15. Параллельная работа трансформаторов. Условия включения на параллельную работу. Распределение нагрузок.

16. Трехобмоточные трансформаторы.

17. Автотрансформаторы.

18. Принципы регулирования напряжения в трансформаторах.

19. Переходный процесс при включении трансформатора в сеть.

20. Переходный процесс при коротком замыкании вторичной обмотки.

РАЗДЕЛ: ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Основные принципы выполнения многофазных обмоток.

2. МДС и ЭДС обмоток переменного тока. Обмоточный коэффициент.

3. Создание вращающегося магнитного поля.

РАЗДЕЛ: СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

1. Принцип действия и основные элементы конструкции СГ.

2. Способы возбуждения СМ.

3. Работа СГ при ХХ.
4. СГ под нагрузкой. Реакция якоря.
5. Уравнения ЭДС и векторные диаграммы СГ (диаграмма Blondеля).

Определение индуктивных сопротивлений СГ.

6. Практическая диаграмма ЭДС (диаграмма Потье).
7. Рабочие характеристики СГ.
8. Потери и КПД СМ.
9. Параллельная работа СМ с сетью. Способы синхронизации.

10. Регулирование активной и реактивной нагрузки СГ, включенного на параллельную работу.

11. Электромагнитная мощность (момент) СМ.
12. Статическая устойчивость.
13. Режим угловой характеристики.
14. Режим U - обратной характеристики.

РАЗДЕЛ: АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

1. Принцип действия и конструктивные основные типы АМ.

2. Магнитные поля и ЭДС АМ.

3. Основные уравнения (МДС, ЭДС и токов). Коэффициенты приведения по ЭДС, по току, приведение сопротивлений обмотки ротора. Векторная диаграмма АД.

4. Схема замещения. Ток ротора.

5. Основные энергетические соотношения. Энергетическая диаграмма АД.

6. Электромагнитный момент АМ (вывод формулы).

7. Механическая характеристика АМ. Возможные режимы работы. Механическая характеристика АД. Критическое скольжение. Максимальный и пусковой моменты. Перегрузочная способность, кратность пускового момента.

9. Искусственные характеристики АД.

10. Рабочие характеристики трехфазных АД.

11. Регулирование частоты вращения АД.

12. Способы пуска АД.

РАЗДЕЛ: МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Принцип действия генератора ПТ и двигателя ПТ.

2. Устройство электрической машины ПТ.

3. Способы возбуждения.

4. Электродвижущая сила обмотки якоря (вывод формулы).

5. Электромагнитный момент машины ПТ (вывод формулы).

6. Магнитная цепь электрической машины ПТ.

7. Реакция якоря машины ПТ.

8. Потери и КПД электрических машин ПТ.

9. Уравнения ЭДС, тока, момента двигателя ПТ. Частота вращения ДПТ.

10. Пуск двигателей ПТ.

11. Механические и эл.мех. (скоростные) характеристики ДПТ независимого (параллельного возбуждения).

12. Регулирование частоты вращения ДПТ.

13. Условия самовозбуждения генераторов ПТ параллельного возбуждения и их основные характеристики.

14. Коллекторные машины переменного тока.

Критерий экзаменационной оценки:

Для допуска к экзамену достаточными основаниями являются выполнение и защита РГР и всех лабораторных работ. Студент, не защитивший несколько лабораторных работ и (или) РГР, допускается к экзамену, но перед получением экзаменационного билета он должен ответить на вопросы, относящиеся к незащищенным лабораторным работам и РГР.

Для подготовки ответа студенту отводится 60 мин. Каждый билет содержит два теоретических вопроса, сопровождаемых задачами. Для получения студентом оценки «удовлетворительно» необходимо полностью решить обе задачи без теоретических выкладок по вопросам билета и иметь конспект разделов, предназначенных для самостоятельного изучения (по темам практических занятий). При этом результаты проверки текущей успеваемости и посещаемости (контрольные точки) должны быть положительными. Оценка «хорошо» выставляется студенту, правильно решившему обе задачи и полностью ответившему на один из теоретических вопросов, имеющему конспект самостоятельно проработанного материала (по темам практических занятий) и оценки «хорошо» и (или) «отлично» в контрольных точках аттестации. Оценка «отлично» выставляется студенту, выполнившему все задания билета, имеющему конспект самостоятельно проработанного материала (по темам практических занятий) и оценки «хорошо» и (или) «отлично» в контрольных точках аттестации. При устной форме экзамена экзаменатору предоставляется право задавать студенту дополнительные вопросы, а также, помимо теоретических вопросов, давать практические задания по программе данного курса, включающего проработанный и законспектированный студентом материал. При этом неправильные ответы на дополнительные вопросы могут служить основанием для снижения оценки. При невыполнении указанных выше требований студент получает оценку «неудовлетворительно». Порядок ликвидации студентами академической задолженности определяется положением о курсовых экзаменах и зачетах, принятом на заседании Ученого совета от 24.06.2004г., протокол № 15.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. ПЕРЕЧЕНЬ ОБЯЗАТЕЛЬНОЙ (ОСНОВНОЙ) ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2004-607 с.
2. Кацман М.М. Электрические машины. Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2001– 463 с.
3. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. Учебник для вузов.-М.: Высшая школа, 2000.-255

4. Абрамов А.И., Иванов-Смоленский А.В. Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. Уч. пособие для вузов – М.:Высшая школа, 2001.

5. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования. Учебное пособие для втузов. /О.Д. Гольдберг, О.Б. Буль, Я.С. Свириденко. – М.:Высшая школа, 2001.-512 с.

6. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов.– М.: Энергия, 1986.

7. Усенко В.И., Русинов В.Л. Расчет гидрогенераторов: Учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос. Ун-т, 2004, 113 с.

8. Усенко В.И., Серов А.Е., Русинов В.Л. Расчет трансформаторов: Учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос. Ун-т, 2002, 113 с.

2. ПЕРЕЧЕНЬ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины.– М.:Энергия, 1980.

2. Брускин А.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины. – М.:Высшая школа, 1990.

3. Вольдек А.И. Электрические машины.– Л.: Энергия, 1974.

4. Токарев Б.Ф. Электрические машины.– М.:Энергоатомиздат, 1990.

5. Читечян В.И. Электрические машины. Сборник задач.– М.: Высшая школа, 1988.

6. Автоматизированное проектирование электрических машин / Под редакцией проф. Бородулина.– М.: Высшая школа, 1989.

3. ПЕРЕЧЕНЬ НАГЛЯДНЫХ И ДРУГИХ ПОСОБИЙ

1. Видеоматериалы и плакаты по трансформаторам и электрическим машинам.

2. Трансформатор, асинхронный двигатель и трансформатор в разобранном виде в качестве наглядных пособий.

3. Карточки к лабораторным работам для проведения тестирования.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ (ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ) КАРТА ДИСЦИПЛИНЫ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА,
1 часть (5 семестр)**

| Номер недели | Номер темы | Вопросы, изучаемые на лекции | Занятия (номера) | | Используемые наглядные и методические пособия | Самостоятельная работа студентов | | Формы контроля |
|--------------|------------|--|--------------------|----------|---|---|------|--|
| | | | практич. (семина.) | лаборат. | | содержание | час. | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 1. | Введение. Основные определения. Преобразование электроэнергии в трансформаторе. Электромеханическое преобразование энергии в эл. Машине. | | 1 | Учебное пособие к лабораторным работам. | Подготовка к выполнению лабораторной работы. | 4 | Тестирование по карточкам и компьютерной программе, экзамен |
| 2 | 2. | Назначение, область применения и конструкция трансформаторов. | | | | Выполнение курсового проекта | 1 | Проверка первой части КП, экзамен |
| 2 | 3. | Электромагнитные процессы в трансформаторе при холостом ходе. | №1 | | | Выполнение задания по теме практической работы | 2 | Контроль выполнения индивидуального задания, экзамен |
| 3 | 4. | Работа трансформатор при нагрузке. Приведенный трансформатор: схема замещения и векторная диаграмма. | | №1 | Учебное пособие к лабораторным работам. | Подготовка к защите лабораторной работы. Выполнение курсового проекта | 6 | Прием лабораторных работ с оценкой по четырех бальной системе. Проверка первой части КП, экзамен |
| 4 | 5. | Изменение и регулирование напряжения трансформатора, КПД. | | | | Выполнение курсового проекта | 1 | Проверка первой части КП, экзамен |
| 4 | 6. | Трехфазные трансформаторы. Схемы и группы соединения. | №2 | | | Выполнение задания по теме практической работы | 2 | Контроль выполнения индивидуального задания, экзамен |
| 5 | 7. | Расчет и экспериментальное определение параметров и потерь трансформатора. | | №2 | Учебное пособие к лабораторным работам. | Подготовка к выполнению лабораторной работы. Выполнение курсового проекта | 6 | Тестирование по карточкам и компьютерной программе. Проверка первой части КП, экзамен |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|----|-----|---|----|----|---|---|---|--|
| 6 | 8. | Многообмоточные трансформаторы. | | | | Выполнение курсового проекта | 1 | Проверка первой части КП . Экзамен |
| 6 | 9. | Автотрансформаторы. | №3 | | | Выполнение задания по теме практической работы | 2 | Контроль выполнения индивидуального задания, экзамен |
| 7 | 10. | Параллельное включение трансформаторов. | | №2 | Учебное пособие к лабораторным работам. | Подготовка к выполнению лабораторной работы. Выполнение курсового проекта | 6 | Тестирование по карточкам и компьютерной программе. Проверка первой части КП, экзамен. |
| 8 | 11. | Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов. | | | | Выполнение курсового проекта | 1 | Проверка выполнения первого этапа КП, экзамен |
| 8 | 12. | Переходные процессы при включении трансформатора в сеть и коротком замыкании на выводах его вторичной обмотки. | №4 | | | Выполнение задания по теме практической работы | 2 | Контроль выполнения индивидуального задания, тестирование по карточкам и компьютерной программе, экзамен |
| 9 | 13. | Трансформаторы специального назначения. | | №2 | Учебное пособие к лабораторным работам. | Подготовка к защите лабораторной работы. Выполнение курсового проекта | 6 | Тестирование по карточкам и компьютерной программе. Проверка первой части КП, экзамен |
| 10 | 14. | Основные виды машин переменного тока. Вращающееся магнитное поле. Принцип действия асинхронной и синхронной машины. | | | | Выполнение курсового проекта | 1 | Проверка выполнения первого этапа КП, экзамен. |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |

| | | | | | | | | |
|----|-----|---|----|----|---|--|---|--|
| 10 | 15. | Обмотки переменного тока. Электродвижущие силы обмоток. | №5 | | | Выполнение задания по теме практической работы | 2 | Контроль выполнения индивидуального задания, экзамен |
| 11 | 16. | МДС обмоток переменного тока. Магнитные поля и индуктивные сопротивления обмоток. | | №3 | Учебное пособие к лабораторным работам. | Подготовка к выполнению лабораторной работы. Выполнение курсового проекта | 6 | Тестирование по карточкам и компьютерной программе. Проверка первой части КП, экзамен |
| 12 | 17. | Общие сведения о синхронных машинах (СМ). Системы возбуждения | | | | Выполнение курсового проекта | 1 | Проверка выполнения первого этапа КП, экзамен |
| 12 | 18. | Электромагнитные процессы в СМ при холостом ходе. | №6 | | | Выполнение задания по теме практической работы | 2 | Контроль выполнения индивидуального задания, тестирование по карточкам и компьютерной программе, экзамен |
| 13 | 19. | Электромагнитные процессы в СМ без учета насыщения. | | №3 | Учебное пособие к лабораторным работам. | Подготовка к защите и защите лабораторной работы. Выполнение курсового проекта | 6 | Тестирование по карточкам и компьютерной программе. Проверка первой части КП, экзамен |
| 14 | 20. | Электромагнитные процессы в СМ с учетом насыщения | | | | Выполнение курсового проекта | 1 | Проверка выполнения первого этапа КП, экзамен |
| 14 | 21. | Характеристики СГ при автономной нагрузке. | №7 | | | Выполнение задания по теме практической работы | 2 | Контроль выполнения индивидуального задания, экзамен |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 15 | 22. | Электромагнитное преобразование энергии в СМ. | | №4 | Учебное пособие к | Подготовка к выполнению | 6 | Тестирование по карточкам и |

| | | | | | | | | |
|----|-----|--|----|----|---|---|---|--|
| | | | | | лабораторным работам. | лабораторной работы. Выполнение курсового проекта | | компьютерной программе. Проверка первой части КП, экзамен |
| 16 | 23. | Особенности параллельной работы генераторов в электрической системе. Условия и способы включения на параллельную работу. | | | | Выполнение курсового проекта | 1 | Проверка выполнения первого этапа КП, экзамен |
| 16 | 24. | Активная и реактивная мощности СМ, включенной в систему. Угловые и U - образные характеристики. | №8 | | | Выполнение задания по теме практической работы | 2 | Контроль выполнения индивидуального задания, экзамен |
| 17 | 25. | Колебания СМ при параллельной работе. | | №4 | Учебное пособие к лабораторным работам. | Подготовка к защите лабораторной работы. Выполнение курсового проекта | 6 | Прием лабораторных работ с оценкой по четырех бальной системе, проверка первой части КП, экзамен |
| 18 | 26. | СД и компенсаторы. | | | | Выполнение курсового проекта | 1 | Проверка первой части КП, экзамен |
| 18 | 27. | Одноякорные преобразователи, шаговые СД, индукторные СМ. | №9 | | | Выполнение задания по теме практической работы | 2 | Контроль выполнения индивидуального задания, экзамен |

2 часть (6 семестр)

| | | | | | | | | |
|---|----|---|---|---|---|--|---|---|
| 1 | 1. | Принцип действия и конструкция АМ. Эл/магнитные процессы в цепях АМ при ХХ. | | 5 | Учебное пособие к лабораторным работам. | Подготовка к выполнению лабораторной работы. | 4 | Тестирование по карточкам и компьютерной программе, экзамен |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 2 | 2. | Эл/магнитные процессы в АМ при нагрузке. Потери. КПД. | | | | Выполнение курсового проекта | 2 | Проверка второй части и защита КП, экзамен |

| | | | | | | | | |
|----|-----|---|---|----|---|---|---|---|
| 3 | 3. | Приведение электромагнитных процессов в АМ к трансформатору. Схема замещения АМ. | | №5 | Карточки, плакаты и уч. пособие | Подготовка к выполнению лабораторной работы. Выполнение РГР | 6 | Тестирование по карточкам и компьютерной программе, проверка РГР, экзамен |
| 4 | 4. | Аналитическое и графическое определение электромеханических характеристик асинхронных машин | | | | Выполнение курсового проекта | 2 | Проверка второй части и защита КП, экзамен |
| 5 | 5. | Круговая диаграмма асинхронной машины. | | №5 | Учебное пособие к лабораторным | Подготовка к защите лабораторной работы. Выполнение курсового проекта | 6 | Прием лабораторных работ с оценкой по четырех бальной системе, проверка РГР, Проверка второй части и защита КП, экзамен |
| 6 | 6. | Пуск и регулирование частоты вращения АД. | | | | Выполнение курсового проекта | 2 | Проверка второй части и защита КП, экзамен |
| 7 | 7. | Несимметричные режимы работы асинхронных машин. | | №6 | Учебное пособие к лабораторным работам. | Подготовка к выполнению лабораторной работы. Выполнение РГР | 6 | Тестирование по карточкам и компьютерной программе, проверка РГР, экзамен |
| 8 | 8. | Однофазные АД. | | | | Выполнение курсового проекта | 2 | Проверка второй части и защита КП, экзамен |
| 9 | 9. | Специальные исполнения АМ. | | №6 | Карточки, плакаты и уч. пособие | Подготовка к защите лабораторной работы. Выполнение РГР | 8 | Прием лабораторных работ с оценкой по четырех бальной системе, проверка РГР, экзамен |
| 10 | 10. | Математическое описание переходных процессов в синхронных машинах. | | | | Выполнение курсового проекта | 2 | Проверка второй части и защита КП, экзамен |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 11 | 11. | Переходные процессы в синхронных машинах при изменении возбуждения и при гашении поля. | | №7 | Учебное пособие к лабораторным работам. | Подготовка к выполнению лабораторной работы. Выполнение РГР | 8 | Тестирование по карточкам и компьютерной программе, проверка РГР, экзамен |

| | | | | | | | | |
|----|-----|--|--|----|---|--|---|--|
| 12 | 12. | Переходный процесс при симметричном коротком замыкании обмотки статора синхронной машины. | | | | Выполнение курсового проекта | 2 | Проверка второй части и защита КП, экзамен |
| 13 | 13. | Переходные процессы в асинхронных машинах. | | №7 | Карточки, плакаты и уч. пособие | Подготовка к защите лабораторной работы. Выполнение РГР | 6 | Прием лабораторных работ с оценкой по четырех бальной системе, проверка РГР, экзамен |
| 14 | 14. | Устройство и принцип действия электрических машин постоянного тока. Расчёт магнитной цепи при холостом ходе. | | | | Выполнение курсового проекта | 2 | Проверка второй части и защита КП, экзамен |
| 15 | 15. | Схемы обмоток якоря. Электродвижущая сила якоря. Электромагнитный момент. Основные электромагнитные соотношения. | | №8 | Учебное пособие к лабораторным работам. | Подготовка к выполнению лабораторной работы. | 4 | Тестирование по карточкам и компьютерной программе, экзамен |
| 16 | 16. | Генераторы постоянного тока. | | | | Выполнение курсового проекта | 1 | Экзамен |
| 17 | 17. | Двигатели постоянного тока (ДПТ). Характеристики ДПТ в установившемся режиме. | | №8 | Карточки, плакаты и уч. пособие | Подготовка к защите лабораторной работы. | 4 | Прием лабораторных работ с оценкой по четырех бальной системе, проверка РГР, экзамен |
| 18 | 18. | Коллекторные машины переменного тока. | | | | | | Экзамен |

2. План-конспект лекций по дисциплине

I часть

Лекция 1

Введение.

1). Основные определения. Возникновение и развитие электрических машин.

- 2). Преобразование электрической энергии в трансформаторе. Уравнение МДС.
- 3). Электромеханическое преобразование энергии в электрической машине. Двигательный и генераторный режимы работы электрических машин.

Лекция 2

Трансформаторы.

- 1). Назначение, области применения и номинальные данные трансформаторов.
- 2). Краткие исторические сведения о трансформаторах.
- 3). Конструкция трансформаторов: активные части.

Лекция 3

Трансформаторы.

- 1). Режим холостого хода. Уравнения напряжений. Формулы для ЭДС.
- 2). Характеристика намагничивания и форма кривой тока холостого хода трансформатора. Потери при холостом ходе.
- 3). Схема замещения и векторная диаграмма трансформатора при холостом ходе.

Лекция 4

Трансформаторы.

- 1). Магнитное поле в трансформаторе при нагрузке. Уравнение МДС. Индуктивности рассеяния обмоток. Уравнения напряжений обмоток.
- 2). Приведение вторичных величин к первичной обмотке.
- 3). Схема замещения и векторная диаграмма трансформатора при нагрузке.

Лекция 5

Трансформаторы.

- 1). Преобразование энергии в трансформаторе при нагрузке.
- 2). Изменение и регулирование напряжения тр-ра при нагрузке.
- 3). Изменение КПД трансформатора при нагрузке.

Лекция 6

Трансформаторы.

- 1). Трансформация трехфазных токов.*
- 2). Схемы и группы соединения трехфазных трансформаторов.*
- 3). Явления, возникающие в трансформаторах при образовании магнитного поля.*

Лекция 7

Трансформаторы.

- 1). Определение потерь и параметров из опыта холостого хода.*
- 2). Определение потерь и параметров из опыта короткого замыкания.*

Лекция 8

Трансформаторы.

- 1). Трехобмоточные трансформаторы.*
- 2). Двухобмоточные трансформаторы с расщепленной обмоткой.*

Лекция 9

Трансформаторы.

- 1). Автотрансформаторы. Схемы и группы соединения.*
- 2). Векторные диаграммы автотрансформатора.*

Лекция 10

Трансформаторы.

- 1). Применение параллельного включения трансформаторов.*
- 2). Условия включения на параллельную работу.*

- 3). Уравнительные токи при неодинаковых коэффициентах трансформации.
- 4). Распределение нагрузки между параллельно включенными трансформаторами.

Лекция 11

Трансформаторы.

- 1). Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов. Причины появления несимметричной нагрузки.
- 2). Трансформация несимметричных токов.
- 3). Однофазные и двухфазные несимметричные режимы.

Лекция 12

Трансформаторы.

- 1). Переходный процесс при включении трансформатора в сеть.
- 2). Переходный процесс при коротком замыкании на выводах вторичной обмотки трансформатора.
- 3). Переходные процессы в трансформаторах при перенапряжениях.

Лекция 13

Трансформаторы.

- 1). Трансформаторы для преобразования частоты.
- 2). Измерительные трансформаторы.

Лекция 14

Общие вопросы теории машин переменного тока.

- 1). Основные виды машин переменного тока.
- 2). Вращающееся магнитное поле. Условия получения.
- 3). Принцип действия асинхронной и синхронной машины.

Лекция 15

Общие вопросы теории машин переменного тока.

- 1). Обмотки переменного тока. Выполнение обмоток.*
- 2). ЭДС обмоток переменного тока. Улучшение формы кривой ЭДС.*

Лекция 16

Общие вопросы теории машин переменного тока.

- 1). Намагничивающие силы обмоток переменного тока.*
- 2). Магнитные поля и индуктивные сопротивления обмоток переменного тока.*

Лекция 17

Синхронные машины.

- 1). Назначение и области применения синхронных машин. Конструкция гидрогенераторов и турбогенераторов.*
- 2). Системы возбуждения синхронных машин. Гашение поля возбуждения и форсировка возбуждения.*

Лекция 18

Синхронные машины.

- 1). Форма напряжения и магнитного поля синхронной машины при холостом ходе. Система коэффициентов формы поля возбуждения.*
- 2). Расчет магнитной цепи явнополюсной машины при холостом ходе.*

Лекция 19

Синхронные машины.

- 1). МДС якоря и ее составляющие по продольной и поперечной осям.*

- 2). *Параметры обмотки якоря для токов прямой последовательности.*
- 3). *Электромагнитные процессы в неявнополюсной машине без учета насыщения.*
- 4). *Электромагнитные процессы в явнополюсной машине без учета насыщения.*

Лекция 20

Синхронные машины.

- 1). *Электромагнитные процессы в неявнополюсной машине с учетом насыщения.*
- 2). *Электромагнитные процессы в явнополюсной машине с учетом насыщения.*

Лекция 21

Синхронные машины.

- 1). *Особенности работы СГ при автономной нагрузке. Регулировочные характеристики. Внешние характеристики.*
- 2). *Характеристики холостого хода и короткого замыкания. ОКЗ. Треугольник короткого замыкания.*
- 3). *Построение векторных диаграмм напряжений СГ с учетом насыщения. Диаграмма Потье.*

Лекция 22

Синхронные машины.

- 1). *Особенности преобразования энергии в генераторном режиме синхронной машины. Потери. КПД.*
- 2). *Электромагнитная мощность и электромагнитный момент.*

Лекция 23

Параллельная работа СГ.

- 1). *Особенности параллельной работы генераторов в электрической системе.*
- 2). *Условия и способы включения на параллельную работу.*

Лекция 24

Параллельна работа СГ.

- 1). Особенности параллельной работы генераторов в электрической системе.*
- 2). Условия и способы включения на параллельную работу.*

Лекция 25

Параллельна работа СГ.

- 1). Активная и реактивная мощности СМ, включенной в систему. Угловые и U - образные характеристики.*
- 2). Колебания СМ при параллельной работе. Свободные колебания ротора после внезапного изменения внешнего момента.*

Лекция 26

Синхронные двигатели, компенсаторы и специальные синхронные машины.

- 1). Применение синхронных двигателей. Уравнения напряжений и векторные диаграммы неявнополюсных и явнополюсных СД. U - образные характеристики синхронных двигателей.*
- 2). Синхронные компенсаторы и их применение.*

Лекция 27

Синхронные двигатели, компенсаторы и специальные синхронные машины.

- 1). Одноякорные преобразователи постоянного тока.*
- 2). Одноякорные преобразователи переменного тока в постоянный.*
- 3). Тихоходные и шаговые синхронные двигатели.*
- 4). Индукторные синхронные машины.*

II часть

Лекция 1

Асинхронные машины (АМ).

- 1). Принцип действия и конструкция АМ с короткозамкнутым и фазным ротором.*
- 2). Режим идеального холостого хода АМ. Расчет главного сопротивления обмотки статора.*

Лекция 2

Асинхронные машины.

- 1). Электромагнитные процессы в АМ при нагрузке. Уравнения напряжений обмотки статора. МДС ротора. Диаграмма токов и напряжений АМ.*
- 2). Электромеханическое преобразование энергии в АМ. Потери. КПД.*

Лекция 3

Асинхронные машины.

- 1). Замещение вращающегося ротора АМ неподвижным ротором. Приведение роторных величин к обмотке статора. Основные уравнения АМ.*
- 2). Схемы замещения АМ.*

Лекция 4

Асинхронные машины.

- 1). Режимы работы АМ. Токи в обмотках статора и ротора.*
- 2). Электромагнитный момент АМ. Активные и реактивные мощности.*

Лекция 5

Асинхронные машины.

- 1). Круговая диаграмма АМ. Обоснование и порядок построения.*
- 2). Определение с помощью круговой диаграммы токов, мощностей, потерь других величин.*

Лекция 6

Асинхронные машины.

- 1). Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.*
- 2). Пуск асинхронных двигателей с фазным ротором.*
- 3). Асинхронные короткозамкнутые двигатели с улучшенными пусковыми свойствами.*
- 4). Способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей.*

Лекция 7

Асинхронные машины.

- 1). Работа АМ при несимметрии первичных напряжений.*
- 2). Работа асинхронного двигателя при несимметрии сопротивлений в фазах обмотки ротора.*

Лекция 8

Асинхронные машины.

- 1). Однофазные асинхронные двигатели с пусковой обмоткой.*
- 2). Асинхронный конденсаторный двигатель.*

Лекция 9

Асинхронные машины.

- 1). Асинхронные генераторы.
- 2). Асинхронные микромашины автоматических устройств: асинхронные управляемые двигатели и тахогенераторы, однофазные сельсины.

Лекция 10

Переходные процессы в машинах переменного тока.

- 1). Математическое описание переходных процессов в синхронных машинах.
- 2). Активные и индуктивные параметры явнополюсной синхронной машины с приведенными роторными контурами.
- 3). Электромагнитный момент и уравнение движения ротора.

Лекция 11

Переходные процессы в машинах переменного тока.

- 1). Переходные процессы в синхронной машин без демпферной обмотки.
- 2). Переходные процессы в синхронной машин с демпферной обмоткой.

Лекция 12

Переходные процессы в машинах переменного тока.

- 1). Симметричное короткое замыкание обмотки статора синхронной машины. Начальные и конечные условия.
- 2). Симметричное короткое замыкание обмотки статора синхронной машины. Периодические и аperiodические составляющие токов.

Лекция 13

Переходные процессы в машинах переменного тока.

- 1) . Математическое описание переходных процессов в асинхронных машинах.*
- 2). Уравнения трехфазной АМ в установившемся симметричном режиме.*

Лекция 14

Электрические машины постоянного тока.

- 1) . Устройство и принцип действия электрических машин постоянного тока.*
- 2). Расчёт магнитной цепи при холостом ходе*

Лекция 15

Электрические машины постоянного тока.

- 1) . Схемы обмоток якоря. Электродвижущая сила якоря.*
- 2). Электромагнитный момент. Основные электромагнитные соотношения.*

Лекция 16

Электрические машины постоянного тока.

- 1) . Генераторы постоянного тока. Внешние характеристики генераторов.*
- 2). Параллельная работа генераторов.*

Лекция 17

Электрические машины постоянного тока.

- 1) . Двигатели постоянного тока. Механические и рабочие характеристики.*

2). Пуск и регулирование скорости двигателей.

Лекция 18

Коллекторные машины переменного тока.

1) Однофазные коллекторные двигатели.

2). Трехфазные коллекторные двигатели.

3. Конспект лекций по МПТ и трансформаторам ДВГУПС

Министерство путей сообщения Российской Федерации
Дальневосточный государственный университет путей сообщения

Кафедра «Электромеханика
и электропривод»

Л.В. Ющенко

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Часть 1

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ТРАНСФОРМАТОРЫ

Конспекты лекций

Рекомендовано
Редакционно-издательским советом ДВГУПС
в качестве учебного пособия

Хабаровск
2002

УДК 621.313(075.8)
ББК 3261я73
Ю 985

Рецензенты:
Кафедра «Электромеханика»
Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета
(заведующий кафедрой, кандидат технических наук, доцент
В.В. Пыхтин)

Кандидат физико-математических наук, директор
Хабаровского филиала Новосибирской государственной
академии водного транспорта, доцент
Л.А. Катрушева

Ющенко, Л.В.

Ю 985 Электрические машины: Конспекты лекций: В 2-х ч. Часть
1: Машины постоянного тока и трансформаторы / Л.В.
Ющенко. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2002. – 95 с.

Конспекты лекций соответствуют государственному образовательному
стандарту направления 657600 «Подвижной состав железных дорог»
специальности 181400 «Электрический транспорт железных дорог», 150700
«Локомотивы».

В первой части конспектов лекций рассмотрены вопросы теории машин
постоянного тока и трансформаторов (16 лекций); во второй части –
асинхронных и синхронных машин (18 лекций).

Конспекты лекций предназначены для студентов всех форм обучения
специальностей 181400 «Электрический транспорт железных дорог»,
150700 «Локомотивы», изучающих курс электрических машин, и может
быть использован при подготовке к занятиям студентами
специальностей 100400 «Электроснабжение», 100200 «Электроэнергетические системы и сети», 180400 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов».

УДК 621.313(075.8)
ББК 3261я73

ведение

Роль электрических машин в промышленности и на транспорте.

Электрические машины неотъемлемо связаны с электрической энергией.

Ее преимущества перед другими видами энергии:

–наиболее универсальная энергия, легко преобразуется в другие виды: механическую, тепловую, химическую, лучистую энергию;

–возможность передавать ее на большие расстояния с малыми потерями;

–возможность доставлять электрическую энергию в любую точку на Земле.

Электрическую энергию вырабатывают на электростанциях, где механическая энергия пара, воды преобразуется в электрическую с помощью электрогенераторов (везде переменного тока). Обратное преобразование энергии – с помощью электродвигателей (электромоторов).

Трансформаторы – статические машины, но электромагнитные законы те же, что и у вращающихся машин.

Классификация электрических машин:

1) в зависимости от рода тока вращающиеся электрические машины делятся на машины постоянного и переменного тока;

2) в зависимости от мощности машины бывают:

–микромашин – до 0,5 кВт;

–малой мощности – 0,5–20 кВт;

–средней мощности – 20–250 кВт;

–большой мощности – более 250 кВт.

На железнодорожном транспорте электрические машины используются как тяговые электрические двигатели на подвижном составе, в автоматике, телемеханике и в других службах.

Краткая история развития электрических машин.

Электромашиностроение началось чуть более 150 лет назад. В основу работы электрических машин заложены два физических явления: магнетизм и электричество.

В 1820 г. Эрстед показал связь между магнитным полем и током.

В 1822 г. английский физик Майкл Фарадей впервые ввел принцип преобразования электрической энергии в механическую энергию (принцип вращения).

В 1824 г. Барлоу создал первую принципиальную модель электродвигателя (униполярного) (рисунок), а также сформулировал так называемое «правило левой руки».

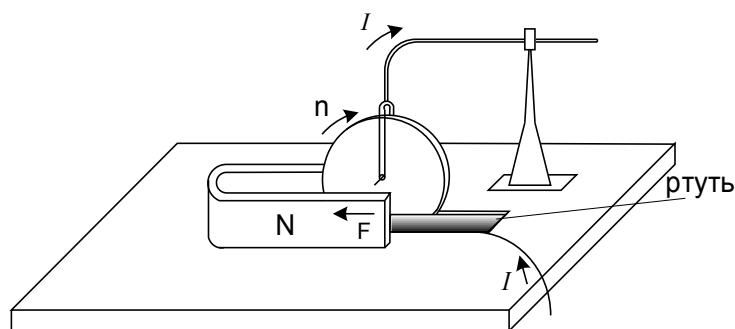


Рисунок. Модель униполярного двигателя

В 1831 г. М. Фарадей открыл закон электромагнитной индукции – получение электрического напряжения на концах проводника, перемещаемого в магнитном поле (модель генератора).

После чего русские физики Э.Х. Ленц и Б.С. Якоби в 1833 г. сформулировали принцип обратимости электрических машин.

Генераторостроение. Первыми источниками электрической энергии были гальванические элементы постоянного тока, поэтому и электрические машины стремились выполнить на постоянном токе.

В период 1831–1886 гг. генератор приобрел все основные черты современной машины. Этот период проходил в четыре этапа.

1.Создание магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами с выпрямлением переменного тока в пульсирующий, “коромысло” Ампера, вывернутый коллектор (1831–1851 гг.).

2.Применение электрических магнитов с независимым возбуждением (1851–1867 гг.), кольцевого якоря.

3.Применение электрических магнитов с самовозбуждением и кольцевым якорем (1867–1871 гг.).

4.Электрические машины с барабанными якорями и многополюсной магнитной системой (1871–1886 гг.). 1876 г. – генератор переменного тока: однофазный синхронный генератор П.Н. Яблочкова для питания электрических свечей переменного тока. Далее переход к трехфазному генератору переменного тока в 1890 г.

Электромоторостроение. Параллельно с разработкой генераторов (1822–1834 гг.) ведется создание физических моделей двигателей. Наряду с униполярной электрической машиной создавались электрические машины, повторяющие схему работы паровой машины с возвратно-поступательным движением (втягивание железного стержня вовнутрь соленоида).

Одну из таких машин в 1851 г. установили на локомотив и развили скорость до 30 км/ч используя батарею. Это дало начало развитию

электрической тяги. Но русский физик Б.С. Якоби еще в 1834 г. создал электрический двигатель с вращательным движением якоря мощностью $P = 500$ Вт, который был установлен на катере в 1838 г.

В 1888 г. югославский изобретатель Тесла создал асинхронный двухфазный двигатель переменного тока.

В 1889 г. русский электротехник М.С. Доливо-Добровольский создал трехфазную систему и трехфазный асинхронный двигатель.

В 1910 г. немецкие ученые Шраге и Рихтер создали шунтовой трехфазный коллекторный двигатель.

В 1930 г. – электромашинный усилитель с поперечным полем.

Разработаны линейные, дугостаторные и другие электрические машины. В настоящее время электрические машины в основном приобрели окончательную форму. Проводится большая работа по увеличению мощности в единице объема.

Номинальные данные электрических машин. Номинальными, определяющими параметрами электрических машин, называют ток, напряжение, мощность и кпд, соответствующие определенному режиму работы, установленному стандартом. Для тяговых двигателей, например, установлены два таких режима: часовой и продолжительный.

Часовой режим определяется наибольшим током, который при работе тягового двигателя на испытательном стенде в течение одного часа с возбуждением, предусмотренным для этого режима, и нормально действующей вентиляцией не вызывает превышения температуры его частей над температурой окружающего воздуха выше норм, установленных для изоляции соответствующего класса. Напряжение на зажимах двигателя при таких испытаниях должно быть номинальным, а температура его частей перед испытаниями – практически равной температуре окружающего воздуха.

Продолжительный режим определяется так же наибольшим током, как и часовой, но при работе двигателя на испытательном стенде в течение неограниченного времени. Температура частей двигателя перед испытаниями в этом случае может быть любой, но в пределах допустимых норм.

Значения тока, мощности, частоты вращения и кпд двигателя, соответствующие часовому режиму, называют часовыми и обозначают их соответственно $I_{ч}$, $P_{ч}$, $n_{ч}$, $\eta_{ч}$, а значения этих величин, относящиеся к продолжительному режиму, называют продолжительными и обозначают их I_{∞} , P_{∞} , n_{∞} , η_{∞} .

Номинальные (часовой и продолжительный) токи обычно ограничены нагреванием обмоток якоря и катушек полюсов, а иногда и нагреванием коллектора. Часовой ток двигателя зависит от теплоемкости его частей и отдачи тепла с его поверхности (теплоотдающей способности), а продолжительный ток зависит только от теплорассеивающей способности машины, и поэтому он меньше часового.

Номинальное напряжение электрической машины – это напряжение, на которое она рассчитана, и которому соответствуют ее типовые характеристики.

Номинальные данные электрических машин приводят на специальных табличках, которые укрепляют на видном месте их несъемной части. В этих табличках указывают: товарный знак предприятия – изготовителя; род (двигатель, генератор) и тип машины; род тока; номинальные режимы работы, наибольшую рабочую (допустимую в эксплуатации) частоту вращения, номинальную степень возбуждения (постоянную шунтировку обмоток возбуждения, когда она предусмотрена); массу машины (без зубчатой передачи); год выпуска машины; обозначение стандарта, которому соответствует машина; класс изоляции.

Лекция 1

Область применения машин постоянного тока.

Принцип действия, основные уравнения

План лекции

1.1. Область применения машин постоянного тока.

1.2. Принцип действия генератора постоянного тока, основное уравнение эдс и напряжения.

1.3. Принцип действия двигателя постоянного тока, основное уравнение напряжения и эдс.

1.1. Область применения машин ПОСТОЯННОГО ТОКА

Машина постоянного тока как и любая электрическая машина обратима: может работать как генератор и как двигатель. Причем двигатели нашли большее применение, чем генераторы.

В табл. 1.1 приведены характеристики некоторых электрических машин постоянного тока.

Таблица 1.1

Характеристики электрических машин постоянного тока

| | Используй- вание | P, кВт | I, А | U, В | Примечан ие |
|----------------------|-------------------------|---------|---------|------|---|
| Двига- тели | Трамвай | 40÷50 | 75÷100 | 550 | Имеют преимущества перед двигателями переменного тока: 1) широкое регулирование частоты вращения; 2) развивают большой пусковой момент |
| | Электровоз | 600÷900 | 400÷600 | 1500 | |
| | Прокатный стан | 11500 | 11500 | 1000 | |
| | Атомоход «Ленин» | 18000 | 18000 | 1000 | |
| Гене- рато- ры | Для Электро- лиза | 60÷120 | 10000 | 6÷12 | |
| | Тепловоз | 2700 | 3600 | 750 | |

1.2. Принцип действия генератора постоянного тока, основное уравнение ЭДС и напряжения

Возможность построения механического генератора появилась после открытия Фарадеем закона электромагнитной индукции в 1831 г.

Если проводник перемещать в магнитном поле так, чтобы он пересекал магнитные линии, то на концах проводника появится разность потенциалов – ЭДС (электродвижущая сила).

Простейшим генератором является рамка на оси, помещенная в магнитном поле (рис. 1.1), которую вращают.

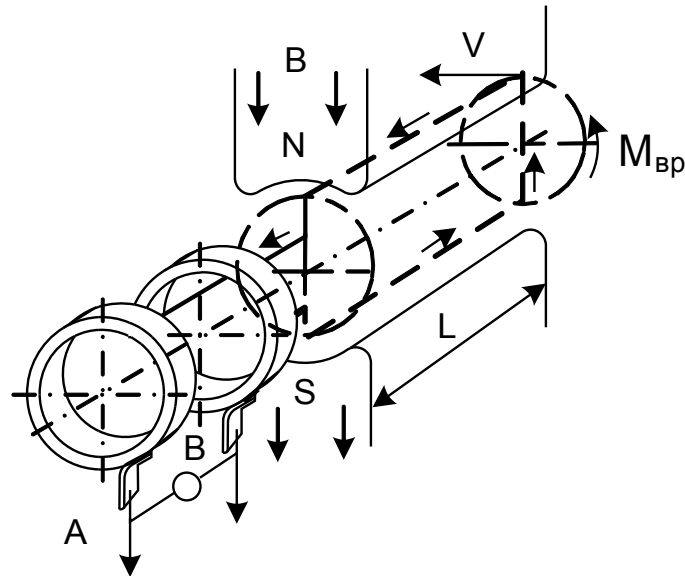


Рис. 1.1. Схема работы машины переменного тока

Концы проводников соединены с кольцами, которые вращаются вместе с рамкой. На кольцах помещены неподвижные щетки. Присоединенный к щеткам вольтметр покажет разность потенциалов, т.е. ЭДС рамки, которая будет изменяться как по величине, так и по направлению. Направление ЭДС определяется по правилу правой ладони, состоящему в следующем.

Ладонь правой руки располагают в магнитном поле так, чтобы линии магнитной индукции были направлены в ладонь, а большой палец отводят относительно других пальцев в плоскости ладони на 90 градусов и направляют по движению проводника; тогда остальные пальцы руки покажут направление наведенной в проводнике ЭДС.

В общем случае $e = Blv$, если $lv = \text{const}t$, то $e \equiv B$. С некоторым приближением допускаем, что индукция под полюсами изменяется по синусоидальному закону, тогда

$$e = Blv \sin \alpha = E_{\max} \sin \omega t,$$

где α – угол поворота, так как $\alpha = \omega t$, то при $\omega = \text{const}$ вместо α можно горизонтальную ось обозначать осью времени t .

Частота наводимой переменной эдс

$$f = \frac{1}{T},$$

где T – период полного цикла изменения эдс (рис. 1.2).

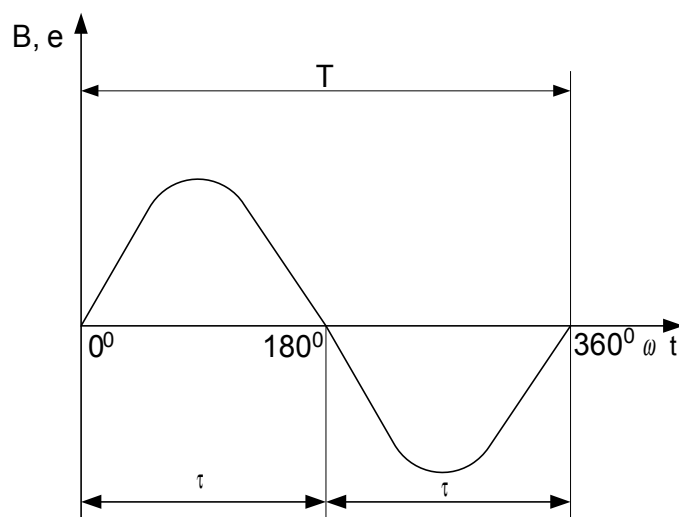


Рис. 1.2. Синусоида индукции или эдс

Для преобразования переменного тока в постоянный применяют коллектор. Для этого проводники простейшего генератора соединяют с двумя медными полукольцами, названными коллекторными пластинами (рис. 1.3).

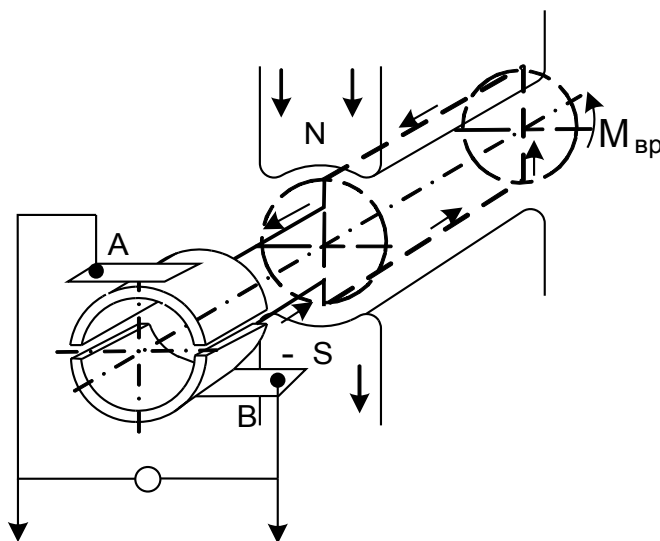


Рис. 1.3. Схема работы машины постоянного тока

Пластины жестко связаны с валом рамки, но изолированы друг от друга. Щетки на коллекторных пластинах устанавливаются так, чтобы

они переходили с одной коллекторной пластины на другую в тот момент, когда эдс равна нулю. Таким образом, щетка контактирует с полукольцом одного направления эдс. В этом случае ток на щетках и по внешнему участку цепи, через потребитель, протекает в одном направлении, но величина его изменяется с течением времени; эдс и ток имеют пульсирующую форму (рис. 1.4). Если взять n рамок (обмотка якоря) и $2n$ коллекторных пластин (коллектор), то увеличится и число пульсирующих эдс за период времени T (рис. 1.5). Если пульсаций менее 2 %, то ток считается постоянным.

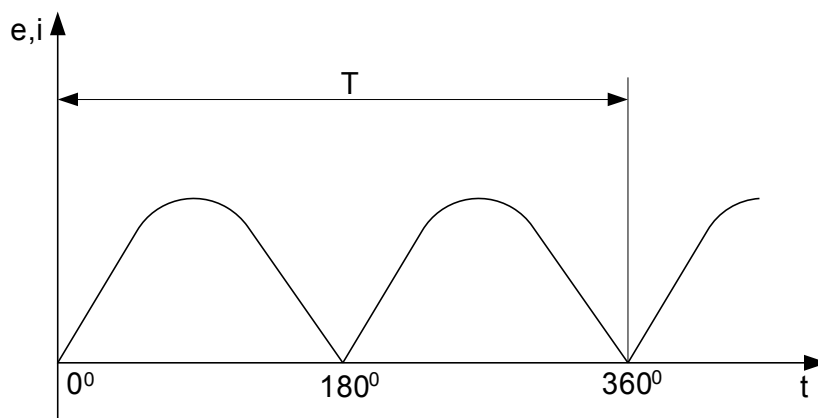


Рис. 1.4. Выпрямленная эдс и ток

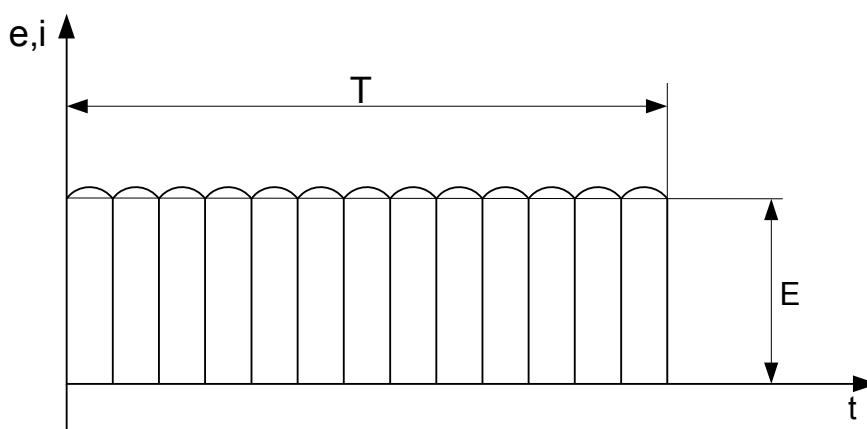


Рис. 1.5. Выпрямленная эдс и ток в реальном генераторе

Таким образом, в генераторе коллектор является механическим выпрямителем, который преобразовывает переменную эдс витков якоря в постоянную эдс на щетках и цепи. Совокупность витков составляет обмотку якоря.

Если к щеткам подсоединить потребитель электрической энергии, то потечет электрический ток, который в обмотке якоря будет создавать падение напряжения. Вследствие этого напряжение на зажимах генератора будет меньше эдс на величину падения напряжения в сопротивлении обмотки якоря

$$U = E_a - I_a r_a, \quad (1.1)$$

где a – индекс параметров якорной обмотки.

Формула (1.1) является основным уравнением эдс и напряжения генератора. Но на проводник с током в магнитном поле действует выталкивающая сила F , направленная навстречу вращению. Ток в обмотке якоря будет создавать противодействующий вращению момент $M_{пр}$. Чем больше I_a , тем больше необходимо усилий для преодоления противодействующего момента

$$M_{пр} = F \frac{D_a}{2}, \quad (1.2)$$

где D_a – диаметр якоря;

$$F = B I I_a. \quad (1.3)$$

1.3. Принцип действия двигателя постоянного тока,

основное уравнение напряжения и ЭДС

В силу обратимости электрических машин принцип действия электрического двигателя можно рассмотреть по рис. 1.3, только к щеткам необходимо подвести напряжение сети.

На проводник с током, помещенный в магнитное поле действует выталкивающая сила, определяемая правилом левой руки (см. рис. 1.3)

$$F = B I I_a,$$

Это действие можно проследить по рис. 1.6.

С правой стороны магнитные линии складываются (поле усиливается), с левой – наоборот, появляется сила F согласно правилу левой руки.

Если поместить рамку с током в магнитное поле, то появляется вращающий электромагнитный момент (рис. 1.7)

$$M_{эм} = F \frac{D_a}{2}.$$

Рамка повернется только до горизонтального положения. Чтобы направление вращения было в одну сторону, необходимо периодически менять направление тока.

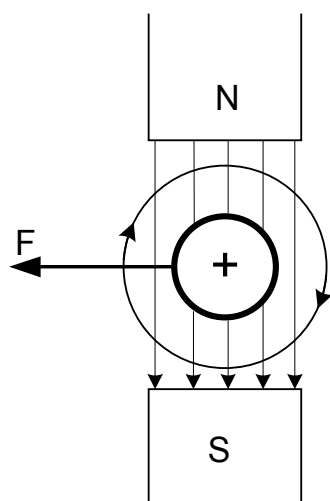


Рис. 1.6.

Выталкивающая сила, действующая на проводник с током

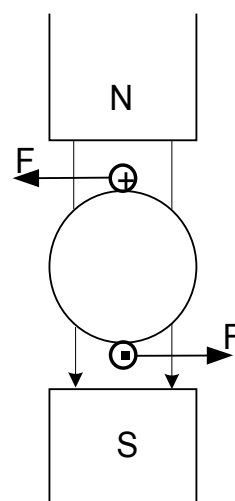


Рис. 1.7

Вращающий момент, действующий на рамку с током

В режиме двигателя коллектор превращает потребляемый из внешней цепи постоянный ток в переменный в обмотке якоря и работает таким образом в качестве механического инвертора.

Так как проводники все время пересекают магнитное поле, то в них наводится эдс, величина которой определяется равенством $e = B l v$ и которая направлена встречно подводимому напряжению, поэтому эту эдс еще называют противоэлектродвижущей силой (противоэдс) в двигателе.

Основное уравнение эдс и напряжения двигателя

$$U = E_a + I_a r_a. \quad (1.4)$$

Лекция 2 Обмотки якорей

План лекции

- 2.1. Обмотки кольцевого якоря и их недостатки.
- 2.2. Якорные обмотки барабанного типа.
- 2.3. Простая петлевая обмотка.
- 2.4. Простая волновая обмотка.

2.1. Обмотки кольцевого якоря и их недостатки

На начальном этапе электромашиностроения использовался кольцевой якорь. Это полый цилиндр, по внешней и внутренней поверхности которого наматываются витки обмотки; каждый виток соединен с коллекторной пластиной.

Недостатки такого якоря:

- а) плохое использование меди, ибо активной частью витка является та часть его, которая расположена на внешней поверхности якоря;
- б) невозможно механизировать процесс намотки;
- в) завышенные габариты (внутренние слои в несколько витков).

2.2. Якорные обмотки барабанного типа

Якорные обмотки барабанного типа отличаются от кольцевого тем, что обе стороны одного витка располагаются на его внешней поверхности; увеличивается использование меди обмотки; механизмуется процесс намотки.

Витки заготавливаются заранее на шаблонах, и обмотчик не обматывает якорь машины, а укладывает готовые элементы обмотки в пазы.

В витке индуцированные эдс должны действовать согласовано, а для этого активные стороны витка должны находиться под полюсами разной полярности. Необходимо чтобы ширина витка составляла

$$y_1 \cong \tau ,$$

где τ – полюсное деление;

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p} .$$

(2.1)

Полюсное деление – это часть длины поверхности якоря, приходящаяся на один полюс (рис. 2.1).

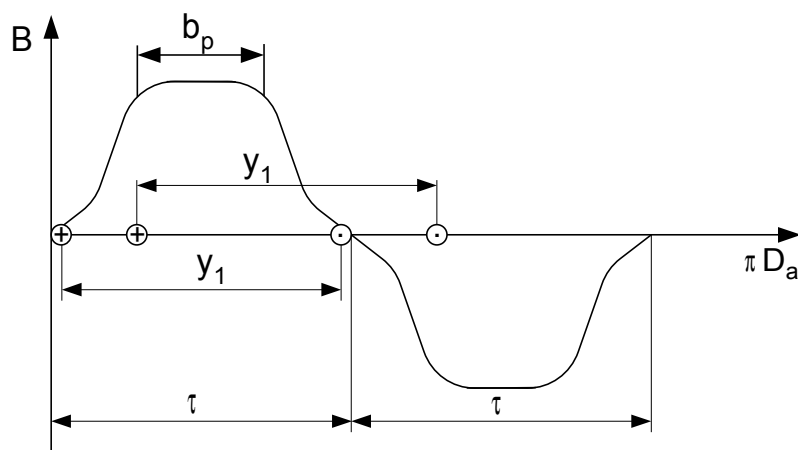


Рис. 2.1. Секции барабанного якоря

Но лучше чтобы $y_1 \leq \tau$ (экономия меди).

Коэффициент полюсного перекрытия

$$\alpha_\delta = \frac{b_p}{\tau}, \quad (2.2)$$

$$\alpha_\delta = 0,7 \div 0,75,$$

где b_p – ширина полюсного наконечника.

Нельзя чтобы наконечники полюсов соприкасались.

Секция обмотки – часть обмотки, находящаяся между двумя следующими друг за другом при обходе обмотки коллекторными пластинами. Секция может состоять из одного витка и множества витков.

Обмотки барабанного типа в основном – двухслойные. В пазу может располагаться несколько активных сторон секций (рис. 2.2). Одна сторона секции располагается в верхней части, другая – в нижней части другого паза (двухслойная обмотка). Здесь обмотки расположены в два слоя, но в одном реальном пазу (рис. 2.2, в) располагаются три элементарных паза ($1Z = 3Z_3$)

$$Z_3 = u Z, \quad (2.3)$$

где u – количество элементарных пазов в одном реальном.

Элементарный паз включает одну верхнюю и одну нижнюю стороны секции.

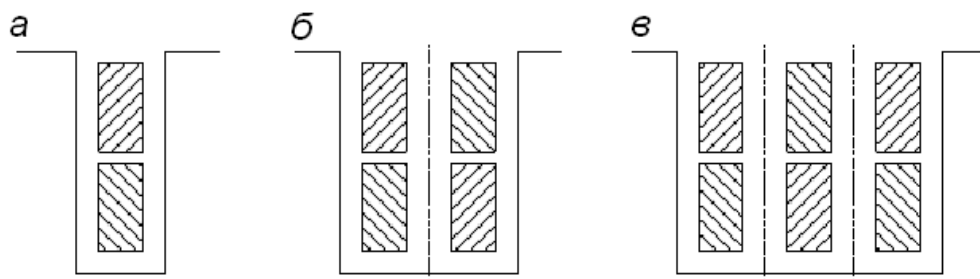


Рис. 2.2. Пазы якоря, состоящие из элементарных пазов:
а – одного; *б* – двух; *в* – трех

Если все стороны секции одного слоя переходят вместе из одного реального паза в другой, их объединяют общей изоляцией и называют катушкой обмотки.

Обмотки якорей подразделяются на петлевые и волновые (рис. 2.3). Существуют так же обмотки, которые представляют собой сочетание этих двух обмоток.

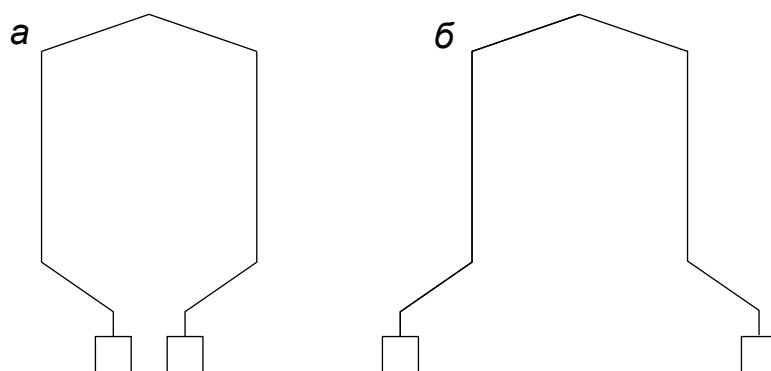


Рис. 2.3. Одновитковая секция: *а* – петлевой обмотки; *б* – волновой обмотки

Если число активных проводников обмотки N , то витков всего $N/2$, а если в секции ω витков, то число секций

$$N/2\omega = S. \quad (2.4)$$

Число секций в машине должно быть равно числу коллекторных пластин K и числу элементарных пазов Z_p :

$$S = K = Z_p. \quad (2.5)$$

2.3. Простая петлевая обмотка

Чтобы эдс второй секции действовала согласно с эдс первой секции, надо чтобы начальные стороны обеих секций находились под полюсом одинаковой полярности. При петлевой обмотке начальные стороны обеих секций находятся под одним полюсом (рис. 2.4).

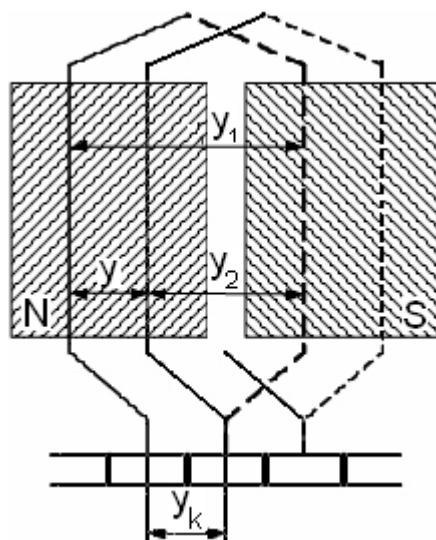


Рис. 2.4. Простая петлевая обмотка

Ширина секции, выраженная в элементарных пазах, называется первым частичным шагом – y_1 , т.е. это расстояние между начальной и конечной сторонами секции; y_2 – второй частичный шаг, расстояние между конечной стороной одной секции и начальной следующей секции; y_k – шаг по коллектору измеряется в коллекторных (пластинах) делениях, показывает смещение мест отпаек секций

$$y = y_k = y_1 - y_2, \quad (2.6)$$

где y – результирующий шаг, показывает смещение следующих друг за другом секций в пазах.

При $y_k = 1$ – обмотка простая. При $y_1 > y_2$ – обмотка получается правой неперегибающейся. При $y_1 < y_2$ – обмотка получается левой перегибающейся

$$y_1 = \frac{Z_{\text{э}}}{2P}.$$

В случае, если первый частичный шаг y_1 равен целому числу, то $y_1 = \tau$ и если же y_1 не равен целому числу, то его округляют до ближайшего целого числа, лучше в сторону уменьшения, так как тогда обмотка получается укороченной

$$y_1 = \frac{Z_{\text{э}}}{2P} \pm \xi = \text{целое число}.$$

Реальные обмотки могут быть представлены в виде схем: радиальные, плоские развернутые.

2.4. Простая волновая обмотка

Волновые обмотки это такие обмотки, у которых начальная сторона второго витка помещена под следующий полюс той же полярности (рис. 2.5).

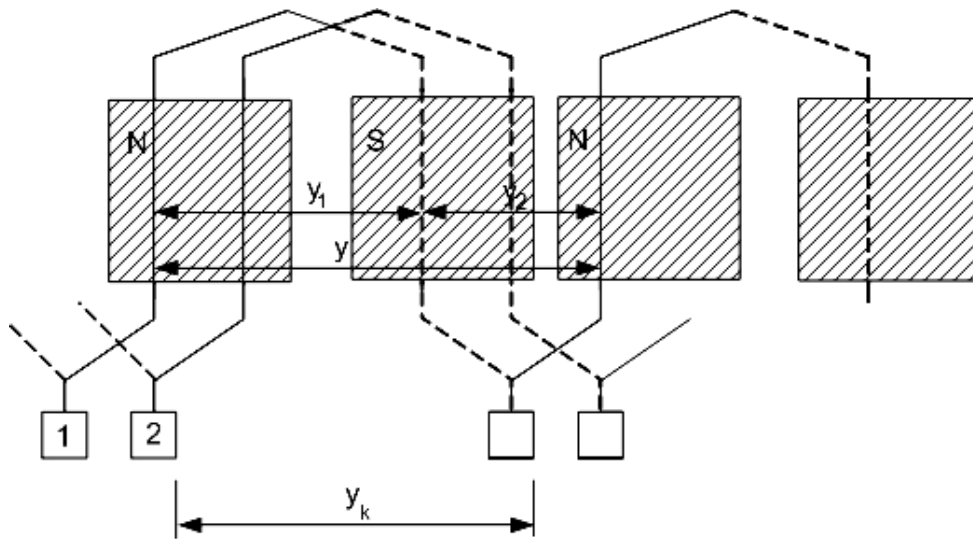


Рис. 2.5. Простая волновая обмотка

В результате за один обход по якору укладывается P секций с результирующим шагом y

$$y_1 + y_2 = y = y_k. \quad (2.7)$$

Результирующий шаг не должен быть равным 2τ , ибо за P результирующих шагов происходит один обход всей окружности якоря, и если $y = 2\tau$, то обмотка замкнется сама на себя, а остальные секции останутся вне ее. Поэтому надо, чтобы конец первого обхода не совпадал с ее началом, и происходило смещение хотя бы на один элементарный паз и коллекторное деление

$$yP \pm 1 = Z_{\text{я}},$$

где «+» – перекрещивающаяся правоходовая; «-» – неперекрещивающаяся левоходовая обмотка.

Откуда результирующий шаг

$$y = \frac{Z_{\text{я}} \mp 1}{P}. \quad (2.8)$$

Первый частичный шаг определяется так же, как и y простой петлевой обмотки:

$$y_1 = \frac{Z_{\text{я}}}{2P} \pm \xi. \quad (2.9)$$

Если смещение за один обход составляет $x = 1$, то она носит название простой волновой обмотки, а число пар параллельных ветвей $a = 1$, тогда выражение (2.8) заменяем:

$$y = \frac{Z_{\vartheta} \pm a}{P}. \quad (2.10)$$

Таким образом, результирующий шаг должен соответствовать двум полюсным делениям.

Лекция 3

Примеры выполнения простых якорных обмоток

План лекции

3.1. Пример выполнения простой петлевой обмотки.

3.2. Пример выполнения простой волновой обмотки.

3.1. Пример выполнения простой петлевой обмотки

Дано: число активных проводников $N = 48$. Число витков в секции обмотки $\omega = 2$. Элементарных пазов в одном реальном $u = 1$ (рис. 3.1).

Число полюсов $2p = 4$. Обмотка – простая петлевая $y_k = 1 = y$;

число секций: $S = N/2\omega = 48/2 \cdot 2 = 12$;

число элементарных пазов: $Z_{\vartheta} = S = 12$;

число коллекторных пластин: $K = Z_{\vartheta} = S = 12$;

число реальных пазов: $Z = Z_{\vartheta}/u = 12/1 = 12$.

Первый частичный шаг

$$y_1 = \frac{Z_{\vartheta} \pm \xi}{2P} = \frac{12 \pm \xi}{4} = 3,$$

где $\xi = 0$;

$$y_2 = y_1 - y = y_1 - y_k = 3 - 1 = 2.$$

Так как $y_1 > y_2$, то обмотка правая неперекрещивающаяся.

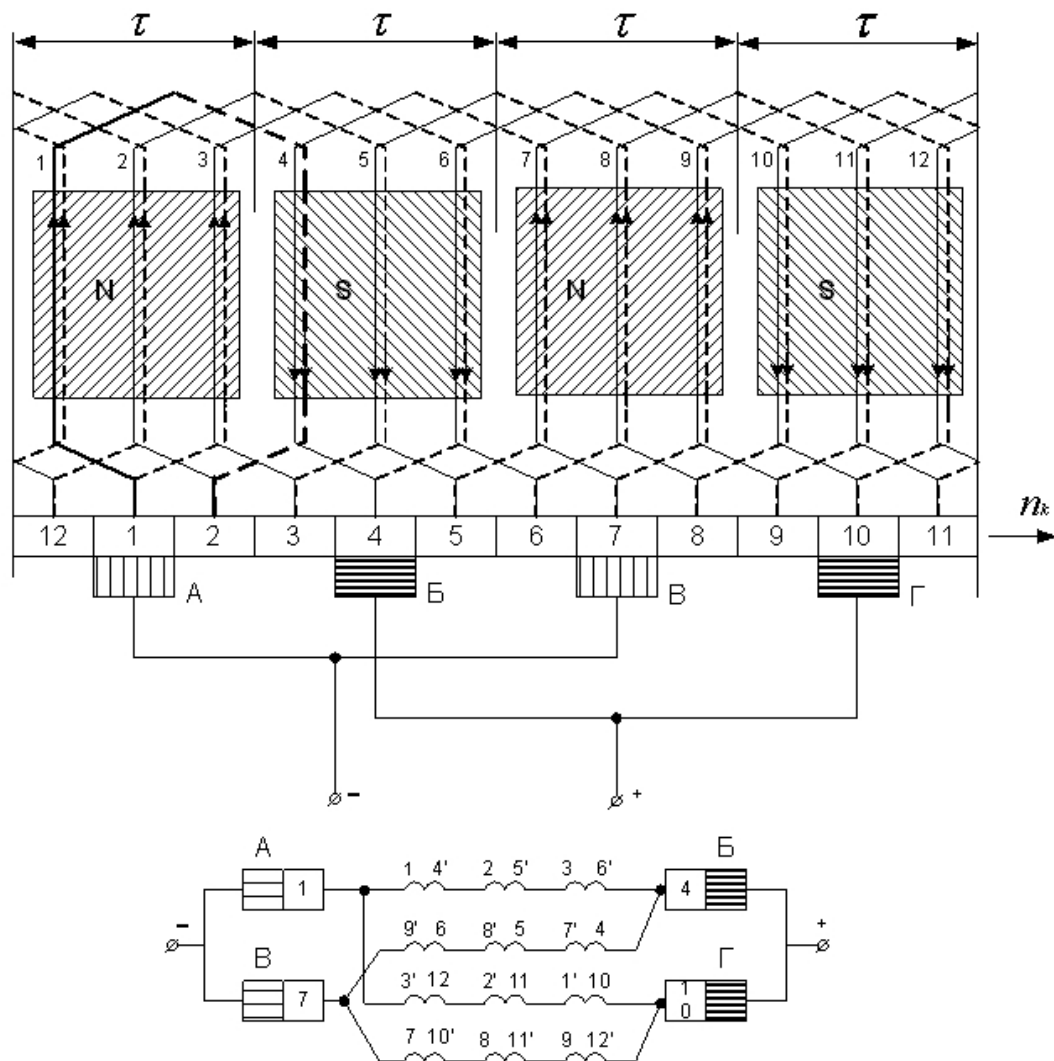


Рис. 3.1 Схема простой петлевой обмотки: а – плоская развернутая схема; б – схема параллельных ветвей

Схемы обмоток бывают:

- 1) радиальные (вид с торца со стороны коллектора);
- 2) плоские развернутые.

Рассмотрим построение схемы обмотки плоской развернутой.

Производим разрез якоря и коллектора по аксиальной оси и разворачиваем в плоскость. Имеем 12 пазов, в каждом верхний (—) и нижний (- - -) слой обмотки и 12 коллекторных пластин (рис. 3.1).

Порядок выполнения плоской развернутой обмотки при условии, что на схеме $\omega = 1$: первую коллекторную пластину соединяем с верхним слоем паза 1; с 1-го паза в 4-й (нижний слой, так как $y_1 = 3$) и на 2-ю коллекторную пластину (так как $y_k = 1$); с коллекторной пластины 2 в паз 2 (верхний слой), (так как $y_2 = 2$); затем в паз 5` (нижний слой) и на 3-ю коллекторную пластину; далее процесс выполнения обмотки аналогичен.

Расстановку щеток выполняем из условий:

- 1) щетка должна собирать эдс или ток;

- 2) щетка ставится там, где секция переходит в другую полярность магнитного потока, когда стороны секций находятся на геометрической нейтрали.

3.2. Пример выполнения простой волновой обмотки

Дано: $Z = 15$; $u = 1$; $2P = 4$.

Построить схему-развертку простой волновой обмотки (рис. 3.2).

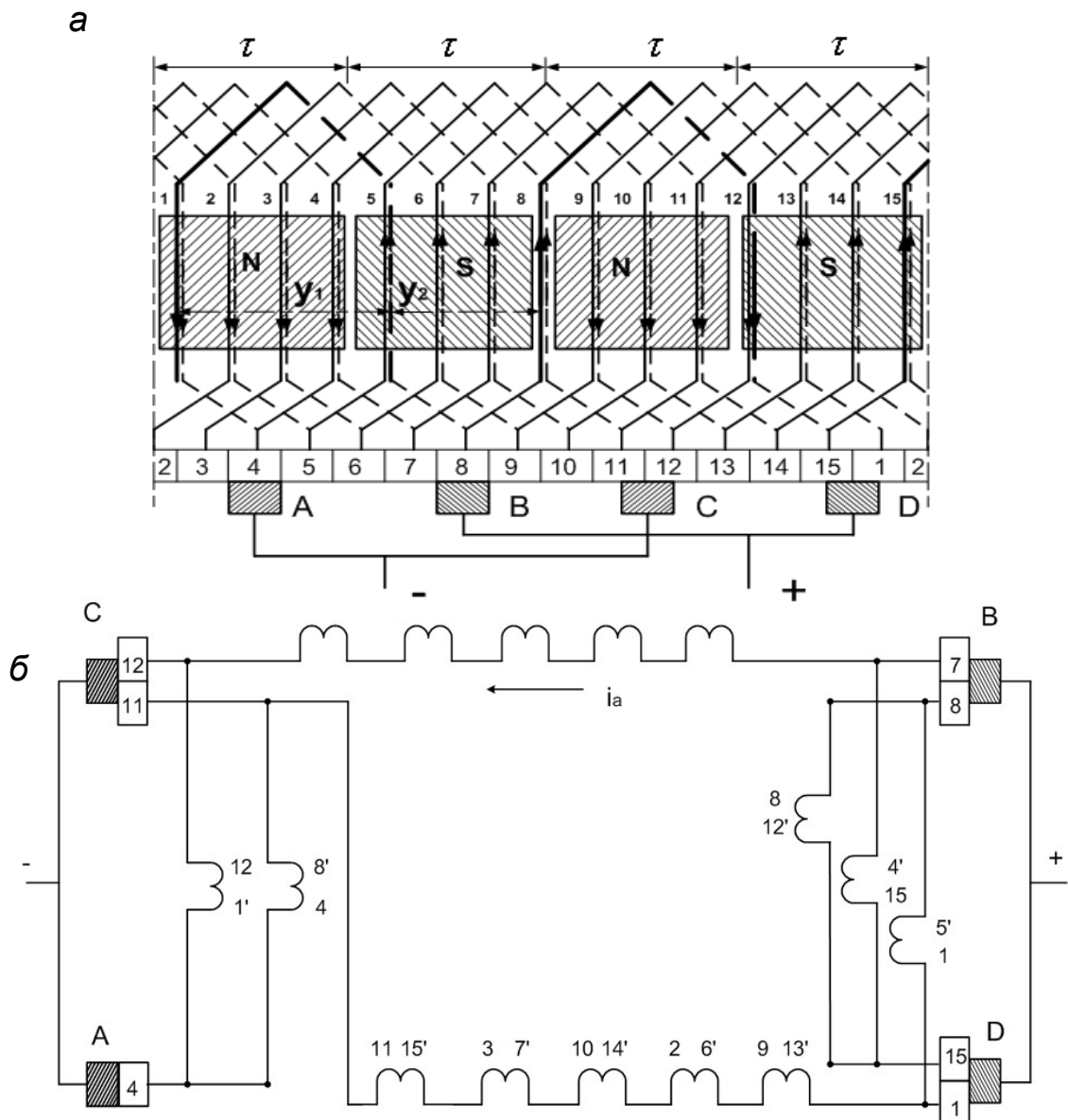


Рис. 3.2. Схема простой волновой обмотки: а – плоская развернутая схема; б – схема параллельных ветвей

Решение:

$$Z_{\text{э}} = Z_{\text{и}} = 15 \cdot 1 = 15;$$

$$S = K = Z_{\text{э}} = 15.$$

$$\text{Первый частичный шаг } y_1 = \frac{Z_{\text{э}} \pm \xi}{2P} = \frac{15}{4} + \frac{1}{4} = 4 \text{ паз.}$$

$$\text{Результирующий шаг } y = \frac{Z_{\text{э}} \pm 1}{P} = \frac{15 \mp 1}{2} = 8 \div 7 \text{ пазов.}$$

Принимаем $y = 7$ пазам.

Второй частичный шаг $y_2 = y - y_1 = 7 - 4 = 3$ паз.

На плоскости показываем 15 пазов с расположенными в пазах верхним (-----) и нижним (-----) слоями обмотки. Верхний слой обмотки первого паза соединяется с первой коллекторной пластиной. Нижний слой этой секции расположен в ($y = 1$ паз + $y_1 = 1 + 4$) пятом пазу и присоединяется к восьмой коллекторной пластине. Так как результирующий шаг $y = 7$ пазам, то восьмая коллекторная пластина соединяется с верхним слоем восьмого паза; далее нижний слой 12-го паза, 15-я коллекторная пластина и т.д. пока обмотка не замкнется нижним слоем на 1-ю коллекторную пластину.

Определяем полюсное деление в пазах

$$\tau = \frac{Z_{\text{э}}}{2P} = \frac{15}{2 \cdot 2} = 3,75 \text{ паз}$$

и показываем на схеме. В пределах τ располагаем очертания полюсов N–S–N–S, шириной $b_p = \alpha_{\delta} \tau$, где α_{δ} – коэффициент полюсного перекрытия, дается в задании. В зоне одного полюсного деления токи протекают в обмотках одного направления, которое определяется для двигателя правилом левой ладони, согласно принятому направлению вращения. Как устанавливаются щетки см. подразд. 3.1. Выполняем обозначение полярности щеток.

Далее выполняем схему параллельных ветвей (см. рис. 3.2) и определяем направление токов в ветвях.

В простой волновой обмотке при любом $2P$ получается только пара параллельных ветвей $a = 1$, ($2a = 2$). В тех случаях, когда $y = \frac{Z_{\text{э}} \pm 1}{P}$ дает не целое число, и при этом $\frac{Z_{\text{э}}}{P} \neq$ целому числу, то принимают $k = Z_{\text{э}} - 1$, тогда одна секция не присоединяется к коллектору и называется «мертвой» [1, 2].

Случается, что при $y = \frac{Z_{\text{э}} \pm 1}{P} \neq$ целому числу, а $\frac{Z_{\text{э}}}{P} \neq$ целое число, тогда одна секция выполняется короткозамкнутой [1, 2].

Лекция 4

Комбинированные и сложные обмотки.

Условия симметрии. Уравнительные соединения

План лекции

4.1. Понятие о комбинированной обмотке.

4.2. Сложные обмотки.

4.3. Условия симметрии обмоток.

4.4. Уравнительные соединения.

4.1. Понятие о комбинированной обмотке (лягушачья)

Комбинированная обмотка – это сочетание двух обмоток петлевой и волновой, расположенных в одних и тех же пазах и присоединенных к одному коллектору. Здесь уравнительным соединением первого рода для петлевой обмотки является волновая, а для волновой второго рода – петлевая (рис. 4.1).

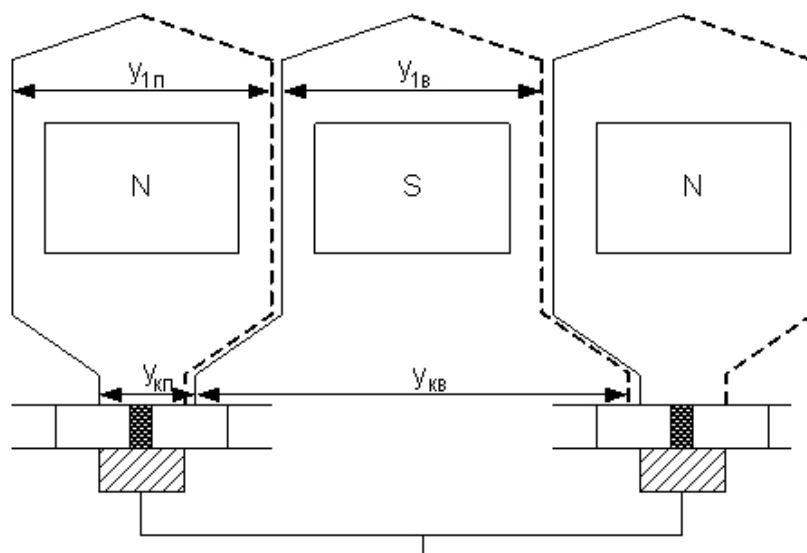


Рис. 4.1. Комбинированная обмотка

4.2. Сложные обмотки

Сложную обмотку рассмотрим на примере петлевой обмотки (рис. 4.2).

Ток в параллельной ветви:

$$i_a = \frac{I}{2a} = 250 \dots 350 \text{ A}.$$

При $U = \text{const}$ увеличение мощности возможно за счет увеличения числа пар полюсов. В петлевых обмотках за счет увеличения числа $2P$ увеличивается $2a$, но иногда это выполнять нежелательно, поэтому переходят к сложным петлевым обмоткам, у которых $u_k > 1$, как правило, $u_k = 2 = u$.

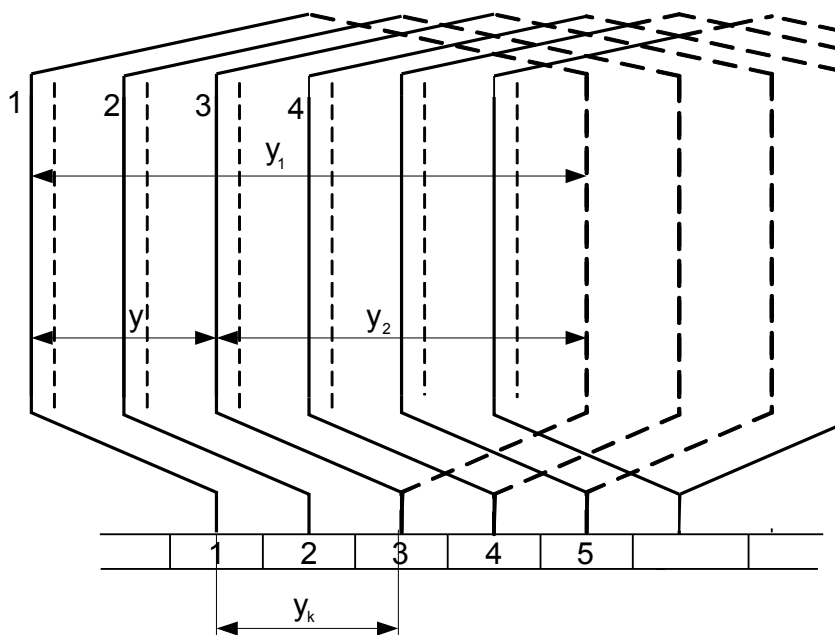


Рис. 4.2. Сложная петлевая обмотка

Сложные обмотки выполняются как две простые, смещенные относительно друг друга. При этом нечетные коллекторные пластины и элементарные пазы принадлежат одной обмотке, а четные – другой (см. рис. 4.2):

$$y = y_k = m,$$

где m – кратность обмотки;

$$y_1 = \frac{Z_{\Theta}}{2P} \pm \xi,$$

$$y = y_1 - y_2 = \pm m.$$

Так как соседние коллекторные пластины принадлежат разным обмоткам, то ширина щетки должна быть такой, чтобы она перекрывала не менее m пластин

$$2a = 2Pm,$$

то есть в m раз больше, чем в простой обмотке.

4.3. Условия симметрии обмоток

Во всякой обмотке есть несколько параллельных ветвей.

Чтобы эдс каждой ветви были одинаковы, ветви должны быть симметричны. А для этого следует выполнить три условия.

1. Число активных сторон по параллельным ветвям должно быть одинаково, то есть

$$\frac{2S}{2a} = \frac{S}{a} = \frac{Z_{\Theta}}{a} = \frac{K}{a} \text{ – целое число.}$$

2. Число реальных пазов, приходящихся на пару параллельных ветвей, должно быть одинаковым, то есть

$$\frac{Z}{a} = \text{целое число.}$$

3. Каждая сторона секции одной параллельной ветви, находящаяся в определенном месте под каким-либо полюсом, должна соответствовать стороне секции другой параллельной ветви, расположенной в том же месте под другим полюсом той же полярности

$$\frac{2P}{a} = \text{целое число.}$$

4.4. Уравнительные соединения

Ввиду того, что машины имеют магнитную несимметрию, распределение потенциала вдоль параллельных ветвей неодинаковое. Например, воздушные зазоры под нижними полюсами меньше чем под верхними, следовательно, магнитный поток под верхними полюсами будет меньше чем под нижними. А следовательно, и эдс в верхних обмотках якоря будет меньше чем в нижних. Это приводит к появлению уравнительных токов, которые будут замыкаться через щетки, загружая при этом одну щетку и разгружая другую.

Для устранения этого явления применяют уравнительные соединения первого рода – это проводники, соединяющие между собой точки нормально одинакового потенциала параллельных ветвей. Конструктивно это выполняется двумя способами:

- 1) припаивают проводники в шлицы коллектора;
- 2) припаивают проводники с противоположной стороны к головкам секций.

В простых петлевых обмотках применяются уравнители первого рода, а в волновых – уравнители второго рода.

Лекция 5

Основные электромагнитные соотношения в машинах постоянного тока

План лекции

- 5.1. Эдс обмотки якоря.
- 5.2. Электромагнитный момент.
- 5.3. Линейная нагрузка якоря.
- 5.4. Плотность тока.
- 5.5. Реакция якоря.
- 5.6. Влияние реакции якоря на распределение напряжения между коллекторными пластинами.

5.7. Меры борьбы с влиянием поперечной реакции якоря.

5.1. ЭДС реакции якоря

ЭДС якоря машины определяется алгебраической суммой мгновенных значений ЭДС проводников одной параллельной ветви:

$$E = \sum_{i=1}^{\frac{N}{2a}} e_i = \sum_{i=1}^{\frac{N}{2a}} B_i l_a V_a = \sum_{i=1}^{\frac{N}{2a}} B_i l_a V_a = \frac{N}{2a} B_{cp} l_a V_a, \quad (5.1)$$

где $\frac{N}{2a}$ – число проводников в одной параллельной ветви; e_i – мгновенное значение эдс i -го проводника; l_a – активная длина проводника; V_a – линейная скорость вращения.

Исходя из

$$\sum_{i=1}^{\frac{N}{2a}} B_i = \frac{N}{2a} B_{cp},$$

$$B_{cp} = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{\tau l_a} = \frac{\Phi}{\frac{\pi D_a l_a}{2P}}, \quad (5.2)$$

$$V_a = \frac{\pi D_a n}{60},$$

где n – число оборотов в минуту.

Получаем

$$E = \frac{N}{2a} \frac{\Phi}{\frac{\pi D_a l_a}{2P}} \frac{\pi D_a n}{60} l_a = \frac{NP}{60a} \Phi n, \quad (5.3)$$

$$E = C_e \Phi n, \quad (5.4)$$

где $\frac{NP}{60a} = C_e = \text{const.}$

5.2. Электромагнитный момент

Уравнение ЭДС и напряжений для двигателя:

$$U = E + I_a R_a. \quad (5.5)$$

Если левую и правую части уравнения умножить на одну и ту же величину I_a , то

$U I_a = E I_a + I_a^2 R_a$ – уравнение электрических мощностей

$$P_1 = P_{эм} + \Delta P,$$

где P_1 – подведенная мощность; ΔP – потери мощности; $P_{эм}$ – электромагнитная мощность (полезная).

Электромагнитная мощность преобразуется в мощность вращения якоря, то есть в механическую мощность вращения

$$\begin{aligned} P_{эм} &= P_{мех}, \\ EI_a &= M\omega, \end{aligned} \quad (5.6)$$

где M – электромагнитный момент; ω – угловая частота вращения;

$$\omega = \frac{2\pi n}{60},$$

$$M = \frac{EI_a}{\omega} = \frac{Np}{60a} \frac{\Phi n I_a}{2\pi n} = \frac{NP}{2\pi a} \Phi I, \quad (5.7)$$

$$M = C_M \Phi I.$$

Для перевода M в килограмм-метры выражение (5.7) делят на 9,8 м²/с.

Здесь $C_M = \frac{NP}{2\pi a}$ – постоянная машины по моменту.

5.3. Линейная нагрузка якоря

Линейная нагрузка якоря – это величина тока, приходящаяся на единицу длины окружности якоря, $\frac{A}{м}$,

$$A = \frac{N i_a}{\pi D_a}. \quad (5.8)$$

5.4. Плотность тока

Величина тока, приходящаяся на сечение проводника в один квадратный миллиметр, называется плотностью тока, $\frac{A}{мм^2}$

$$J_{доп} = \frac{I}{S}. \quad (5.9)$$

Допустимая плотность тока – это такая плотность, при которой проводник нагревается, не превышая допустимых пределов, например:

$$j_{\text{доп}} = 10 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{М}^2} \text{ – для машин с } D_a = 10 \text{ см, тогда } A = (100 \div 150) \text{ А/м;}$$

$$j_{\text{доп}} = 5 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{М}^2} \text{ – для машин с } D_a = 30 \text{ см, тогда } A = (450 \div 500) \text{ А/м.}$$

5.5. Реакция якоря

Кроме основного магнитного потока, в машинах постоянного тока еще наводится поток от тока, протекающего по обмотке якоря. Рассмотрим картину их распределения (рис. 5.1).

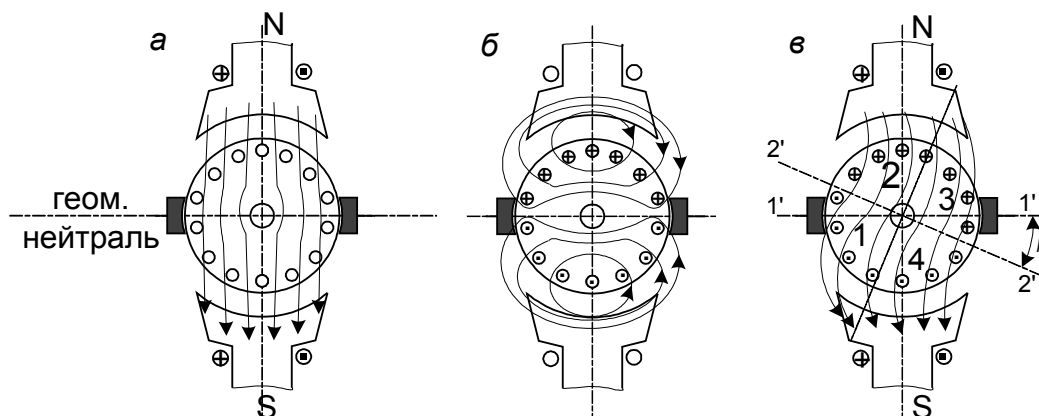


Рис. 5.1. Магнитное поле машины: а – при $I_a = 0$, $\Phi_0 \neq 0(x.x)$; б – при $I_a \neq 0$, $\Phi_0 = 0(x.x)$; в – результирующее

На рис. 5.1, а показана картина распределения только основного магнитного потока от главных полюсов, ток в обмотке якоря при этом отсутствует.

При отсутствии поля главных полюсов, токи в обмотке якоря распределяются по положению щеток, то есть выше линии геометрической нейтрали имеют одно направление, а ниже – другое (рис. 5.1, б). Это позволяет рассматривать обмотку якоря, как некоторую катушку, ось которой совпадает с геометрической нейтралью. Магнитные линии рисуем по правилу “буравчика”. Хотя якорь и вращается, магнитное поле якоря остается неподвижным в пространстве.

Если ось поля якоря перпендикулярна к оси полюсов, то оно носит название поперечного поля реакции якоря.

Для определения результирующего потока воспользуемся методом наложения полей.

Нейтральными точками на якоре являются те, нормальная составляющая индукции в которых равно нулю; то есть действительно

нейтральная (физическая 2'-2') ось теперь не совпадает с геометрической (1'-1'):

–у генератора (согласно правилу правой руки) смещается по вращению;

–у двигателя – против вращения;

Физическая нейтраль разбивает катушку на четыре части.

В частях 1 и 3 идет подмагничивание основного магнитного потока, а в частях 2 и 4 – размагничивание, поэтому такое явление называют продольной подмагничивающей реакцией якоря и продольной размагничивающей. Если машина не насыщена, то размагничивающее действие под одной половиной полюса и подмагничивающее под другой взаимно компенсируются, и магнитный поток в машине остается неизменным. А если машина достаточно насыщена, то подмагничивание не компенсирует размагничивание, и общий поток в машине уменьшается.

Итак, влияние магнитного потока обмотки якоря на основной магнитный поток полюсов называется реакцией якоря.

При расположении щеток на геометрической нейтрали вся намагничивающая сила якоря будет поперечной.

При смещении щеток с геометрической нейтрали на физическую появится и продольная реакция при уменьшении поперечной.

5.6. Влияние реакции якоря на распределение напряжения между коллекторными пластинами

При движении секции в магнитном поле в ней индуцируется эдс. Концы секции присоединены к коллекторным пластинам (ламелям), поэтому напряжение между этими пластинами называется межламельным и определяется:

$$U_i = e_i = V_i l V.$$

Очевидно, где больше V_i там и больше величина U_i , которая имеет важное значение в работе щеточно-коллекторного узла.

При образовании “проводящих мостиков” между коллекторными пластинами, последние могут выгорать, что может привести к мощной дуге и “круговому огню”.

Среднее межламельное напряжение может быть определено по формуле

$$U_{\text{ср}} = \frac{U}{\frac{k}{2P}} = \frac{2U_p}{K}.$$

Отношение $\frac{U_{\max}}{U_{\text{ср}}}$ может достигать $1,8 \div 1,85$, что следует учитывать при проектировании машин.

5.7. Меры борьбы с влиянием поперечной реакции якоря

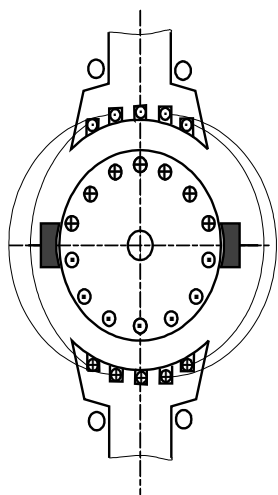


Рис. 5.2.

Компенсационная

1. Компенсационная обмотка – зеркальное отображение якорной обмотки.

То есть магнитный поток от компенсационной обмотки должен быть зеркальным отображением потока реакции якоря, для этого в пазы главного полюса укладывают обмотку с $A_{\text{ко}} = A_a$; электрически компенсационная обмотка включается последовательно с якорной обмоткой (рис. 5.2).

2. Выбор величины воздушного зазора. Реакция якоря тем больше, чем меньше величина зазора, но увеличение зазора требует увеличения намагничивающей силы (н.с.) обмоток главных полюсов.

3. Форма наконечника главного полюса.

4. Установка добавочных полюсов, которые компенсируют реакцию якоря в зоне коммутации.

Лекция 6

Коммутация в машинах постоянного тока

План лекции

6.1. Степени искрения.

6.2. Причины искрения.

6.3. Классическая теория коммутации (теория Арнольда).

6.4. Реактивная эдс в коммутируемой секции.

6.5. Уменьшение реактивной эдс.

Коммутацией называется процесс переключения секций обмотки из одной параллельной ветви в другую с изменением направления тока в них на обратное.

Коммутация считается хорошей, когда процесс изменения тока в секциях не сопровождается искрообразованием между щетками и

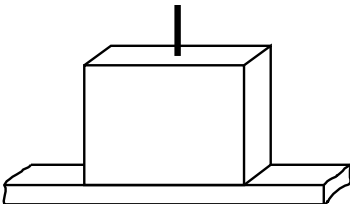
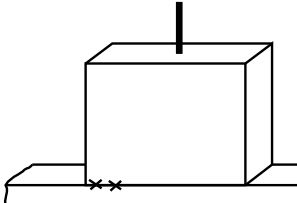
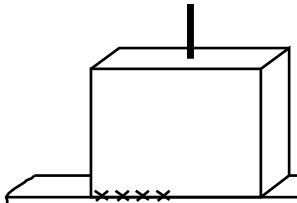
коллектором и поверхность коллектора остается чистой, не поврежденной при длительной работе машины.

6.1. Степени искрения

На основании ГОСТ 183–74 состояние коммутации оценивается по степени искрения под сбегающим краем щетки, различается пять классов коммутации (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Классы коммутации

| Класс коммутации | Степень искрения | Состояние коллектора и щеток |
|--|--|---|
| <p>1</p>  | Отсутствие искрения (темная коммутация) | Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках |
| <p>1 ¼</p>  | Слабое точечное искрение, примерно на ¼ поверхности щетки | Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках |
| <p>1 ½</p>  | Искрение примерно на половине и более поверхности щетки | Появление следов почернения на коллекторе, но легко устранимых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках |
| <p>2</p> | Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки | Появление следов почернения на коллекторе, не устранимых протиранием |

| | | |
|--|--|--|
|  | и перегрузки | коллектора бензином, а также следов нагара на щетках |
| <p>3</p>  | Значительное искрение с наличием вылетающих крупных искр. Допускается при прямом безреостатном пуске | Значительное почернение на коллекторе, не устраняемое протиранием поверхности коллектора бензином, а также подгар и разрушение щеток |

Если степень искрения не указана в стандартах на отдельные виды машин, то при номинальном режиме работы должна быть не выше 1 ½.

6.2. Причины искрения

Искрение может быть вызвано:

- а) механическими причинами;
- б) электрическими причинами.

К *механическим* причинам можно отнести геометрическое несовершенство выполнения коллектора и щеточного аппарата:

- эллиптическая форма коллектора;
- выступание отдельных коллекторных пластин;
- недостаточная балансировка коллектора;
- вибрация щеток и другие причины.

К *электрическим* причинам можно отнести:

- повышение напряжения между коллекторными пластинами выше допустимого предела, когда искрение перерастает в круговой огонь;
- повышение напряжения и плотности тока в момент разрыва контура между щеткой и коллекторной пластиной.

Анализ электрических причин искрения представляет наиболее трудную задачу при изучении процессов коммутации.

Коммутация – это весьма сложный процесс, зависящий от большого количества факторов, поэтому точный и строгий анализ этого явления представляет чрезвычайно трудную задачу. Следовательно, существующие

теории коммутации имеют ряд условных допущений, позволяющих дать основу некоторой математической модели.

6.3. Классическая теория коммутации (теория Арнольда)

В основу классической теории Арнольда заложены следующие допущения.

1. Полное механическое совершенство коллектора и щеток при любых скоростях вращения.
2. Постоянство удельного сопротивления контакта между щеткой и коллектором, а также независимость его от плотности тока в контакте и величины контактной поверхности.

Обычно анализ коммутации начинают с простейшего случая:

– ширина щетки равна ширине коллекторной пластины;

– сумма эдс в коммутирующем контуре равна нулю.

Коммутируемая секция находится между второй и третьей коллекторными пластинами (рис. 6.1).

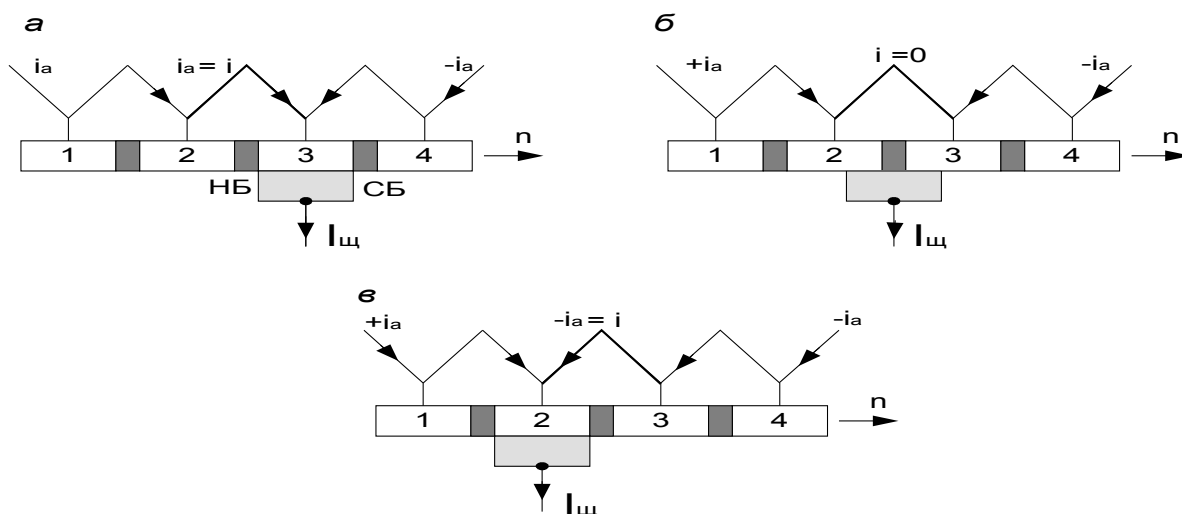


Рис. 6.1. Анализ коммутации: $\pm i_a$ – ток в одной и другой параллельных ветвях; НБ и СБ – набегающий и сбегающий края

щетки; i – ток, который протекает в коммутируемой секции; T – период коммутации; а – $i = +i_a$, при $t = 0$; б – $i = 0$, при $t = \frac{1}{2}T$; в – $i = -i_a$, при $t = T$

Если считать что в коммутируемой секции за время изменения тока с $+i_a$ на $-i_a$ не возникает никакой эдс (то есть $\sum e = 0$), то тогда ток будет изменяться по уравнению

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

а диаграмма изменения тока i согласно уравнения может быть представлена рис. 6.2. При такой коммутации плотность тока под щеткой получается везде одинаковой

$$j_{щ} = \frac{I_{щ}}{S_{щ}},$$

а коммутация называется прямолинейной.

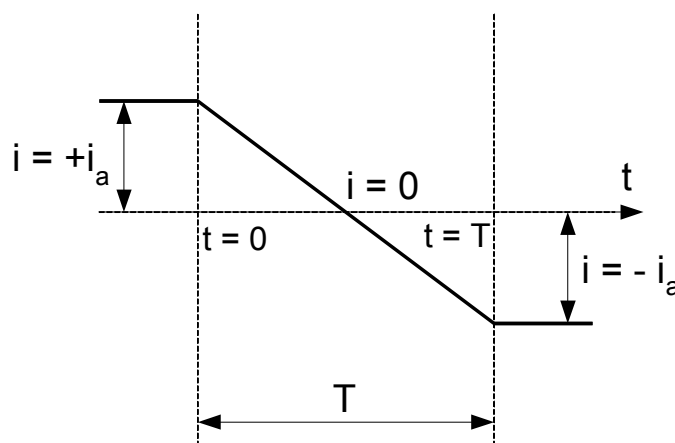


Рис. 6.2. Прямолинейная коммутация

6.4. Реактивная ЭДС в коммутируемой секции

Величина периода коммутации очень мала, так как $b_{щ} = b_{л}$, а $b_{л} = 4 \div 5$ мм и если линейная скорость коллектора 20 м/с, то процесс коммутации будет длиться всего

$$T = \frac{4 \text{ мм}}{20000 \text{ мм/с}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с} = 0,0002 \text{ с}.$$

Следовательно, ток будет изменяться весьма быстро.

По законам электротехники всякому изменению тока в обмотке препятствует ЭДС самоиндукции

$$e_L = -L_c \frac{di}{dt},$$

где L_c – индукция секции, при прямолинейной коммутации – величина постоянная

$$e_L = -L_c \frac{2i_a}{T} = -L_c \frac{I_{щ}}{T}.$$

В результате, под влиянием ЭДС самоиндукции, прямолинейная коммутация замедляется (рис. 6.3). В начальный момент протекает тока меньше через набегающий край, плотность тока под набегающим краем уменьшается, а под сбегающим – наоборот возрастает по сравнению с плотностью тока при прямолинейной коммутации.

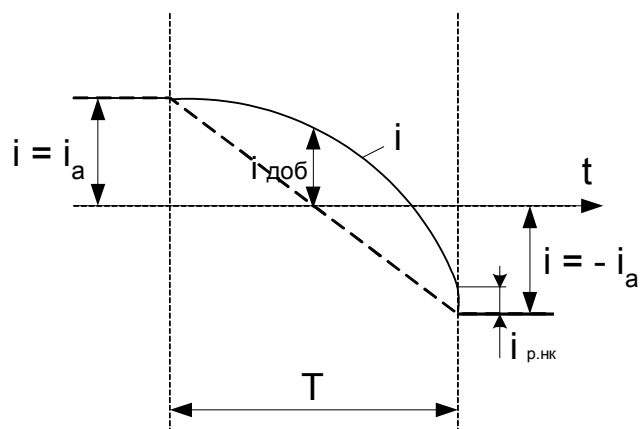


Рис. 6.3. Замедленная коммутация

Теперь уже и эдс e_L не будет постоянной величиной. На сбегающем крае создается условие для повышенного искрообразования:

$$i = i_{\text{пр}} + i_{\text{доб}},$$

$$i_{\text{доб}} = \frac{\sum e}{r_k},$$

где r_k – сопротивление коммутируемого контура; $i_{\text{р.нк}}$ – ток разрыва при замедленной коммутации (от недокоммутации).

Основной причиной искрения является добавочный ток.

Если же щетка перекрывает не одну, а несколько коллекторных пластин, ток одновременно коммутируется в нескольких рядом лежащих секциях, поэтому в коммутируемых секциях наводится еще и эдс взаимной индукции e_m , которая также замедляет изменение тока в секции. Кроме этих двух видов эдс могут возникать и другие эдс, вызываемые пульсациями результирующего поля в зоне коммутации.

Сумма всех эдс, способствующих замедлению изменения тока в секции, называется реактивной эдс:

$$e_r = e_L + e_m,$$

$$i_{\text{доб}} = \frac{\sum e}{r_k} = \frac{e_r}{r_k}.$$

Для уменьшения добавочного тока следует уменьшить реактивную эдс e_r или же увеличить сопротивление цепи коммутируемого контура, второе делается подбором щетки с большим сопротивлением.

6.5. Уменьшение реактивной ЭДС

1. Конструктивные мероприятия.

Так как реактивная эдс определяется формулой

$$e_r = 2\omega_c V_a I_a \xi_r,$$

где ω_c – число витков в секции; V_a – линейная скорость якоря; I_a – линейная нагрузка; I_a – длина активного проводника; ξ_r – проводимость магнитному потоку, уменьшить e_r можно за счет уменьшения проводимости ξ_r , ибо другие параметры имеют ограничения.

Для уменьшения проводимости в некоторых машинах ставят пазовые глушители в виде медных экранов, в экранах во время коммутации возникают дополнительные токи, которые уменьшают эдс e_r , но увеличивают потери в машине. Дрейфус предложил глушители, которые работают в период коммутации, но все равно они усложняют конструкцию машины; можно уменьшить или увеличить высоту паза – это так же уменьшит ξ_r .

2. Уменьшить эдс e_r можно за счет создания в зоне коммутации такого коммутирующего магнитного поля, чтобы оно наводило коммутирующую эдс e_k , которая была бы направлена встречно e_r . Такую коммутирующую эдс можно создать посредством добавочных полюсов (рис. 6.4)

$$e_k = \omega_c V_a I_{дп} B_k,$$

где B_k – индукция под дополнительными полюсами.

Добавочные полюса располагаются по линии геометрической нейтрали, т.е. на линии тех секций, которые контактируют со щетками. Количество добавочных полюсов обычно равно количеству главных полюсов $N_{дп} = N_{гл}$, но может быть $N_{дп} = N_{гл}/2$ в машинах малой мощности.

Полярность добавочных полюсов (ДП) выбирают такой, чтобы в коммутируемой секции наводилась эдс e_k , направленная навстречу эдс e_r .

Исходя из условия, что $e_r = e_k$

$$\omega_c V_a I_a \xi_r = \omega_c V_a I_{дп} B_k,$$

$$B_k = \frac{I_a}{I_{дп}} \xi A = kA.$$

Линейная нагрузка характеризуется током якоря. Поэтому чтобы сохранялась пропорциональность между индукцией под ДП и током якоря, очевидно, обмотку ДП нужно соединить последовательно с обмоткой якоря.

Следует ДП выбирать с такими размерами, чтобы не наблюдалось их насыщение, иначе нарушится пропорциональность между I и B_k .

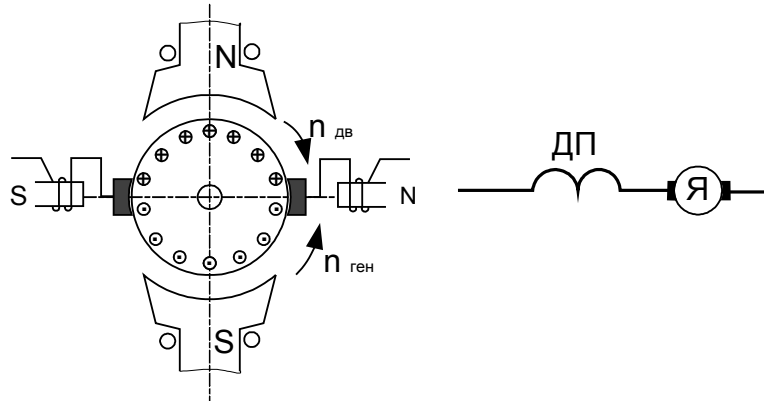


Рис. 6.4. Расположение добавочных полюсов

Если в коммутирующей секции $e_k = e_r$, то коммутация будет прямолинейной, если же добиться условия $e_k > e_r$, то коммутация будет ускоренной, появится добавочный ток другого знака. Лучшей из двух ускоренных коммутаций будет коммутация по кривой 1 (рис. 6.5). На

конечной стадии здесь $\frac{di}{dt} \approx 0$.

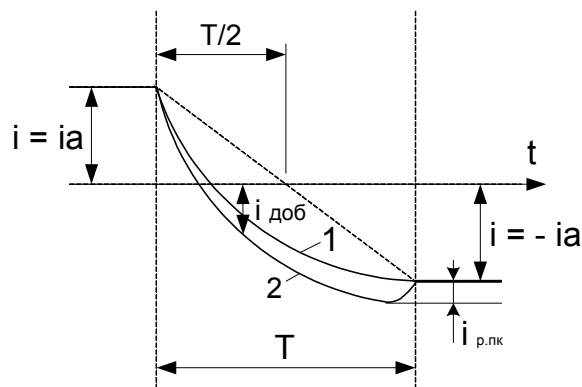


Рис. 6.5. Коммутация: 1 – нормально ускоренная; 2 – сильно ускоренная

При кривой 2 возможно искрение от перекоммутации (т.е. очень сильных ДП), ток разрыва уже будет другого знака, нежели при искрении

от недокоммутации (т.е. очень слабых ДП), здесь $I_{р.пк.}$ – ток разрыва от ускоренной коммутации.

Лекция 7

Коэффициент полезного действия.

способы возбуждения машин постоянного тока.

Характеристики генератора независимого возбуждения

План лекции

7.1. Потери мощности в машине постоянного тока.

7.2. Коэффициент полезного действия.

7.3. Способы возбуждения машин постоянного тока.

7.4. Генераторы постоянного тока.

7.5. Генератор независимого возбуждения и его характеристики.

7.1. Потери мощности в машине ПОСТОЯННОГО ТОКА

Классификация потерь мощности:

а) переменные – зависящие от тока нагрузки и постоянные – независимые от тока нагрузки.

б) основные – механические, потери в стали, меди обмотки, контактирующем слое щеток и добавочные.

◆ *Механические потери:*

– в подшипниках

$$P_{пш} = K_{тр} \frac{F}{D_{щ}} V_{ц},$$

где $K_{тр}$ – коэффициент трения качения; F – сила давления; $D_{щ}$ – диаметр окружности по центру ролика или шарика; $V_{ц}$ – линейная скорость цапфы.

– трение в щетках

$$P_{трщ} = K_{трщ} f_{щ} S_{щ} V_k,$$

где $f_{щ}$ – удельное нажатие щетки; $S_{щ}$ – сечение щетки; V_k – окружная скорость коллектора;

– от вентиляции

$$P_{вн} = k V_B V^2,$$

где V_B – объем воздуха.

В итоге получаем, механические потери мощности равны:

$$P_{МЕХ} = P_{пш} + P_{трщ} + P_{вн}.$$

◆ *Потери в стали (магнитные):*

– за счет перемагничивания железа якоря магнитным полем;

– за счет пульсации магнитного потока вследствие зубчатого строения якоря.

Потери наблюдаются в железе якоря, зубцовой зоне, наконечнике главных полюсов:

$$P_{ст} = P_{пг} = P_{г} + P_{вх} = P_{1,0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} B^2 G_{ст},$$

где $P_{г}$ – потери мощности на гистерезис; $P_{вх}$ – потери мощности на вихревые токи; $P_{1,0/50}$ – удельные потери в ваттах на 1 кг стали при $B = 1$ Тл, $f = 50$ Гц; f – действительная частота; B – действительная индукция; $G_{ст}$ – вес стали; β – величина, зависящая от марки стали.

◆ *Потери в меди (электрические):*

– в обмотке якоря

$$P_{МА} = I_a^2 r_a,$$

$$r_a = r_{дн} + r_{ко} + r_{якор.},$$

$$r_a = \rho_{15} \frac{Nl}{S_{пр}} [1 + \alpha (\theta_a - \theta_0)],$$

где ρ_{15} – удельное сопротивление медного провода при 15 °С; N – число проводников; l , $S_{пр}$ – длина, сечение проводника; α – температурный коэффициент; θ_a – измеренная температура; θ_0 – начальная температура 15 °С.

По-другому можно записать:

$$P_{МА} = 2,4 i_a G_M,$$

где G_M – масса медной обмотки, кг; i_a – плотность тока.

– в обмотке возбуждения

$$P_B = U_B i_B;$$

– в контакте “щетка–коллектор”

$$P_{щ} = \Delta U_{щ} I_a,$$

где $\Delta U_{щ}$ – двойное падение напряжения между щеткой и коллектором, $\Delta U_{щ} = 2$ В.

Тогда

$$P_M = P_{эл} = P_{МА} + P_B + P_{щ}.$$

- ◆ *Добавочные потери* обусловлены вторичными факторами, от перемагничивания в обмотках наводится ЭДС и протекают токи

$$P_{\text{доб}} = (0,005 \div 0,01) P_2,$$

где P_2 – полезная мощность.

7.2. Коэффициент полезного действия

Суммарные потери в машине

$$\sum P = P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{СТ}} + P_{\text{М}} + P + P_{\text{доб}};$$

– для генератора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1},$$

$$P_1 = P_2 + \sum P,$$

$$P_2 = U_c I_c,$$

$$\eta_{\Gamma} = 1 - \frac{\sum P}{U_c I_c + \sum P};$$

– для двигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P}{P_1},$$

$$P_1 = U_c I_c,$$

$$\eta_{\text{Д}} = \frac{U_c I_c - \sum P}{U_c I_c} = 1 - \frac{\sum P}{U_c I_c}.$$

При $P_2 = 0$ кпд = 0. Чтобы узнать, где кпд максимальный, требуется взять производную потерь по току (рис. 7.1).

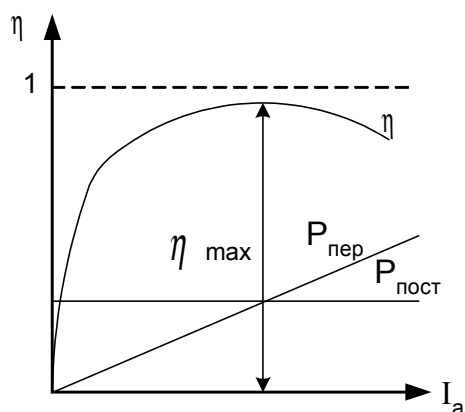


Рис. 7.1. Кривая кпд: $P_{\text{пер}}$ – переменные потери мощности; $P_{\text{пост}}$ – постоянные потери мощности

Кпд достигает максимума, когда потери от тока становятся равными потерям, не зависящим от тока.

7.3. Способы возбуждения машин ПОСТОЯННОГО ТОКА

Постоянные магниты могут создавать магнитный поток в машинах постоянного тока (МПТ). Их недостатки:

- 1) малая величина индукции;
- 2) не регулируют величину магнитного потока.

Есть другой способ возбуждения магнитного потока – при помощи электромагнитов.

Обмоткой возбуждения называется электрическая цепь, состоящая из последовательно соединенных электромагнитных полюсов, при которых происходит чередование полюсов разной полярности (рис. 7.2).

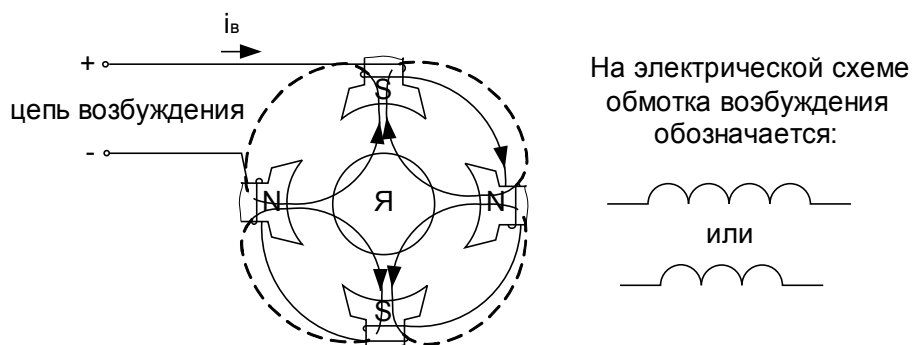


Рис. 7.2. Схема обмотки возбуждения

Если цепь возбуждения включена на напряжение постороннего источника (аккумулятора, батареи), то такая машина называется МПТ с независимым возбуждением (рис. 7.3, 7.4).

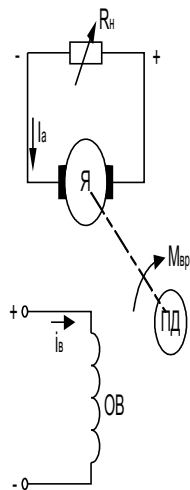


Рис. 7.3. Схема генератора с независимым возбуждением: ПД – первичный двигатель

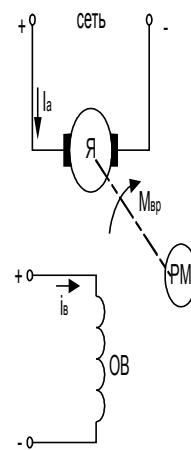


Рис. 7.4. Схема двигателя с независимым возбуждением: ПМ – рабочий механизм

Ток, протекающий по обмотке возбуждения, называется током возбуждения. Ток, протекающий по обмотке якоря, называется током якоря.

Если энергия, необходимая для возбуждения полюсов, поступает от якоря этого же генератора, то такие машины называются генераторами с самовозбуждением.

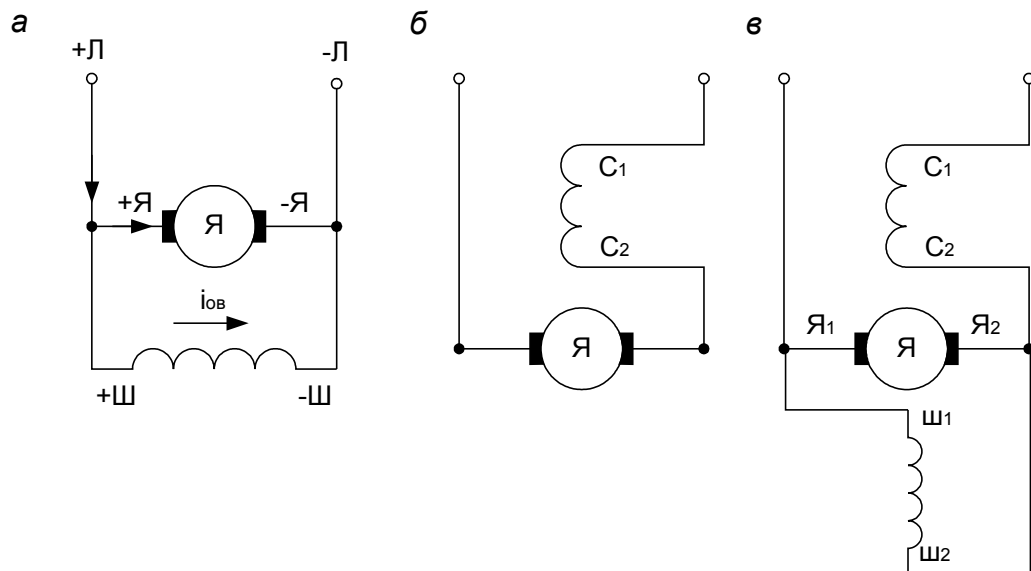


Рис. 7.5. Способы возбуждения магнитного потока: а – параллельное; б – последовательное; в – смешанное возбуждения

По способу электрического соединения обмотки возбуждения и обмотки якоря МПТ подразделяются на следующие:

- параллельного соединения (шунтовые) (рис. 7.5, а);
- последовательного соединения (сериесные) (рис. 7.5, б);
- смешанного соединения (компаундные) (рис. 7.5, в).

У современных двигателей при любом включении обмоток электрическая энергия поступает на ОВ из сети.

7.4. Генераторы постоянного тока

Работа генераторов характеризуется четырьмя основными величинами:

- током возбуждения i_b ;
- напряжением на зажимах генератора U ;
- током якоря I_a ;
- частотой вращения n . Обычно n неизменна, так как она задается первичным двигателем: турбиной, дизелем и т.п.

Изменение или зависимость величин друг от друга удобно анализировать с помощью графиков, которые называют характеристиками. Свойства МПТ изучаются по характеристикам.

7.5. Генератор независимого возбуждения и его характеристики

1. Характеристика холостого хода $E = f(i_b)$, $I_a = 0$, $n = \text{const}$.

Ранее мы получили выражение

$$E = C_e \Phi n,$$

$E = f(\Phi)$, а $\Phi = f(i_b)$, следовательно, при $n = \text{const}$ $E \equiv f(i_b)$.

Плавно изменяем i_b от 0 до $i_{b\text{max}}$ и обратно до $i_b = 0$, а затем меняем полярность тока возбуждения переключателем П (рис. 7.6).

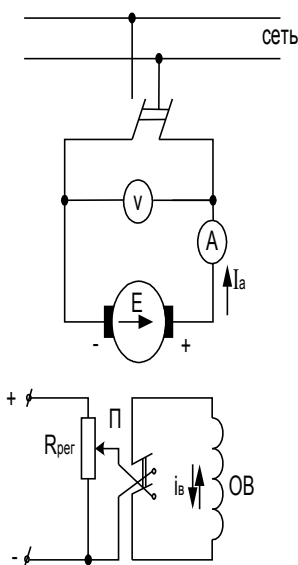


Рис. 7.6. Схема генератора с независимым возбуждением

При токе возбуждения $I_B = 0$ в сердечнике полюсов имеется наличие остаточного магнитного потока $\Phi_{ост}$, и поэтому в обмотке якоря наводится $E_{ост}$ (рис. 7.7).

Полученную зависимость также называют характеристикой магнитной цепи машины $\Phi = f(i_B)$.

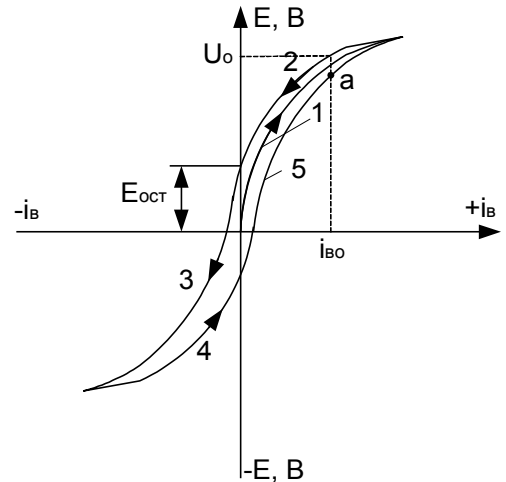


Рис. 7.7. Характеристика холостого хода генератора с независимым возбуждением

2. Внешняя характеристика представляет зависимость $U = f(I_a)$ при $n = \text{const}$, $i_B = \text{const}$.

С увеличением I_a напряжение падает. Объясняется это следующим:
– согласно основного уравнения

$$U = E - I_a R_a \text{ или } U = C_e \Phi n - I_a R_a.$$

– с увеличением I_a увеличивается $I_a R_a$, но уменьшается U (рис. 7.8, кривая 1);

– реакция якоря влияет на магнитный поток Φ , а $E = C_e \Phi n$, $U = E - \Delta U$ (рис. 7.8, кривая 2).

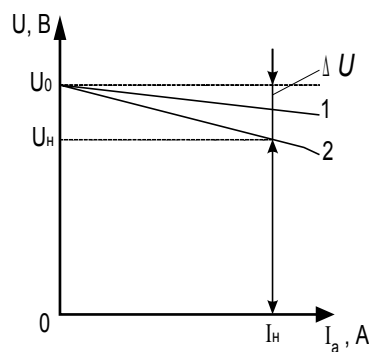


Рис. 7.8. Внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением

3. Регулировочная характеристика.

Для поддержания $U = \text{const}$ с изменением I_a необходимо регулировать ток возбуждения.

Зависимость i_B от I_a при сохранении напряжения неизменным называется регулировочной характеристикой; $i_B = f(I_a)$ при $U = \text{const}$, $n = \text{const}$ (рис. 7.9).

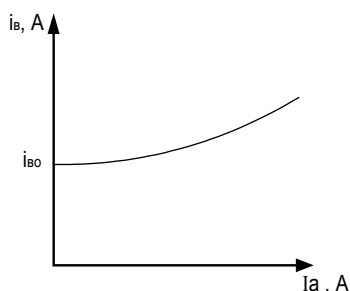


Рис. 7.9. Регулировочная характеристика генератора с независимым возбуждением

Необходимость отдельного источника питания обмотки возбуждения в ряде случаев является недостатком таких генераторов.

4. Нагрузочная характеристика $U = f(I_B)$ при $I_a \neq 0 = \text{const}$.

Эта характеристика имеет вид аналогичной характеристики холостого хода $E = f(i_B)$, но проходит ниже (рис. 7.10).

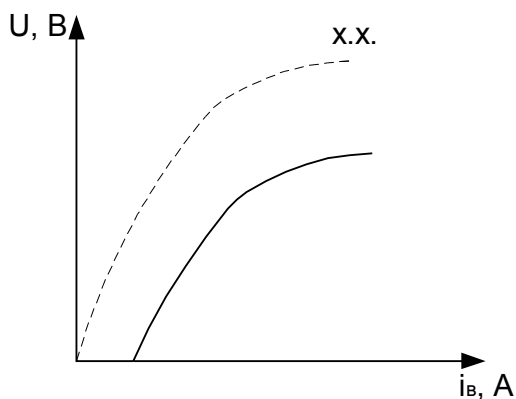


Рис. 7.10. Нагрузочная характеристика генератора с независимым возбуждением

5. Характеристика короткого замыкания $I_a = f(i_B)$ снимается по схеме (рис. 7.11) при замкнутой через амперметр обмотке якоря.

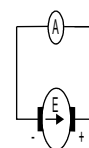


Рис. 7.11. Схема снятия характеристики короткого замыкания

Ток I_B должен быть очень мал и не превышать тока номинального

Лекция 8

Генераторы параллельного, последовательного смешанного возбуждения и их характеристики

План лекции

8.1. Принцип самовозбуждения в генераторе параллельного возбуждения.

8.2. Характеристики генератора параллельного возбуждения.

8.3. Генератор последовательного возбуждения.

8.4. Генератор смешанного возбуждения.

8.1. Принцип самовозбуждения в генераторе параллельного возбуждения

Характеристики генератора параллельного возбуждения можно снять по схеме (рис. 8.1).

Ток в обмотке возбуждения генератора возникает в процессе самовозбуждения, основанном на использовании существующего в машине небольшого остаточного магнитного потока $\Phi_{ост}$ – первое условие принципа самовозбуждения.

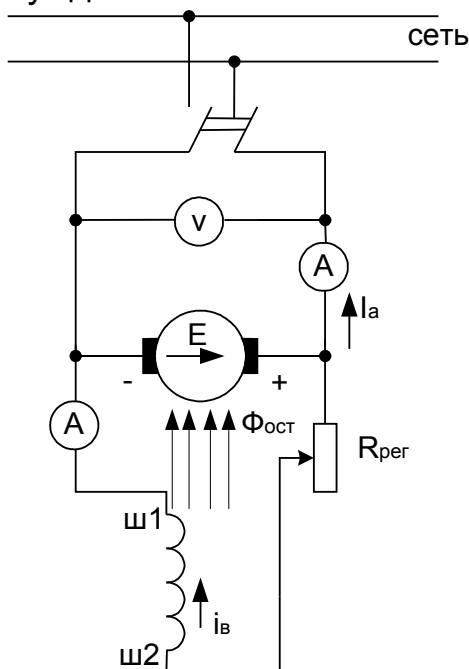


Рис. 8.1. Схема включения генератора с параллельным возбуждением

При вращении якоря от магнитного остаточного потока возникает эдс $E_{ост}$. эдс $E_{ост}$ вызывает ток возбуждения, который вызывает приращение магнитного потока и т.д.:

$$\Phi_{ост} \rightarrow E_{ост} \rightarrow I_B, \text{ от } E_{ост} \rightarrow \Delta\Phi,$$

$$\Phi_{ост} + \Delta\Phi \rightarrow E_{ост} + \Delta E.$$

Процесс самовозбуждения возможен при согласном направлении остаточного потока и потока приращения ($\Phi_{ост}$ и $\Delta\Phi$) – второе условие принципа самовозбуждения.

Увеличение I_B вызывает появление в обмотке возбуждения эдс самоиндукции

$$e_L = -L_B \frac{di_B}{dt}.$$

По второму закону Кирхгофа:

$$E + e_L = i_B R_B,$$

$$E = i_B R_B + L_B \frac{di_B}{dt}.$$

В режиме холостого хода $E = f(I_B)$ – кривая 1 (рис. 8.2).

При $R'_B = \text{const}$ падение напряжения $i_B R'_B = f(I_B)$ – прямая 2 (рис. 8.2).

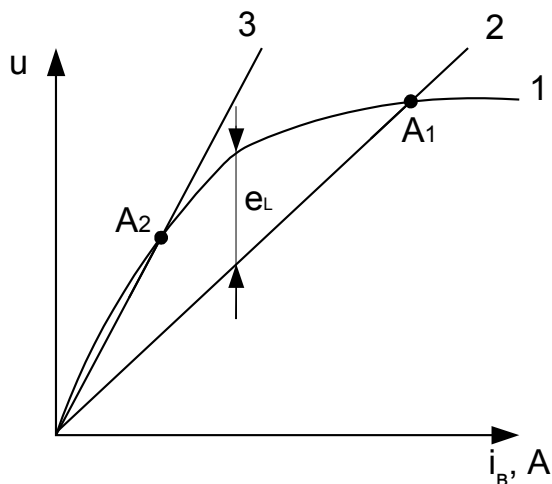


Рис. 8.2. Влияние R_B на процесс самовозбуждения

В точке A_1 процесс самовозбуждения заканчивается. При увеличении $R_B > R'_B$ при том же токе возбуждения $i_B R'_B$ увеличится (рис. 8.2, кривая 3), процесс заканчивается в точке A_2 .

При сопротивлении в цепи возбуждения выше некоторого критического $(R_{пер} + R_B) > r_{кр}$ процесс самовозбуждения может не произойти.

8.2. Характеристика генератора параллельного возбуждения

Характеристика холостого хода может быть получена только в одном квадранте, иначе остаточный магнитный поток будет размагничен.

Внешняя характеристика пройдет ниже внешней характеристики генератора с независимым возбуждением (рис. 8.3).

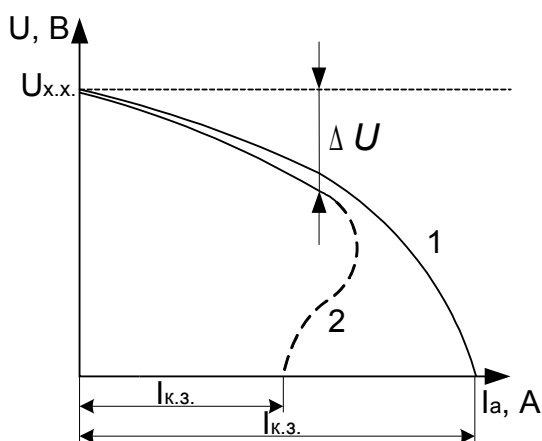


Рис. 8.3. Внешняя характеристика: 1 – генератора с независимым возбуждением; 2 – генератора с параллельным возбуждением

Падение напряжения ΔU обусловлено тремя условиями.

1. С увеличением тока якоря I_a увеличивается $I_a R_a$, но уменьшается U .
2. Реакция якоря уменьшает эдс E и, следовательно, U .
3. Уменьшение U ведет к уменьшению I_b , а следовательно, эдс E и напряжения U и т.д.

Физический смысл регулировочной характеристики такой же как и у генератора с независимым возбуждением.

8.3. Генератор последовательного возбуждения

В генераторе последовательного возбуждения $I_b = I_a = I$, следовательно, характеристики холостого хода короткого замыкания и нагрузочную можно снять только по схеме независимого возбуждения. Эти характеристики имеют вид обычный для генератора независимого возбуждения.

Если $n = \text{const}$, то переменных остаются две: U и I . Поэтому генератор имеет, по существу, одну характеристику – внешнюю $U = f(I)$.

Так как напряжение генератора последовательного возбуждения резко изменяется с нагрузкой, то практически эти генераторы не применяются (рис. 8.4, 8.5).

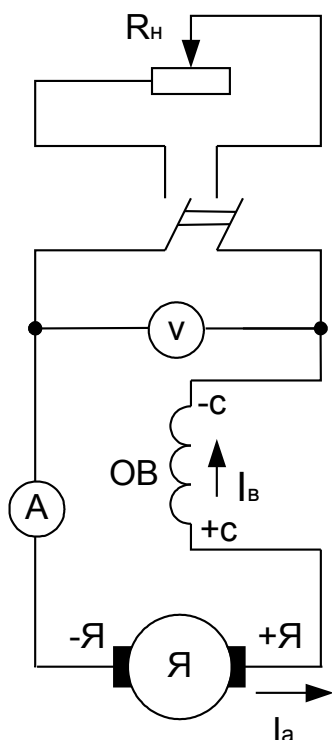


Рис. 8.4. Схема включения генератора с последовательным возбуждением

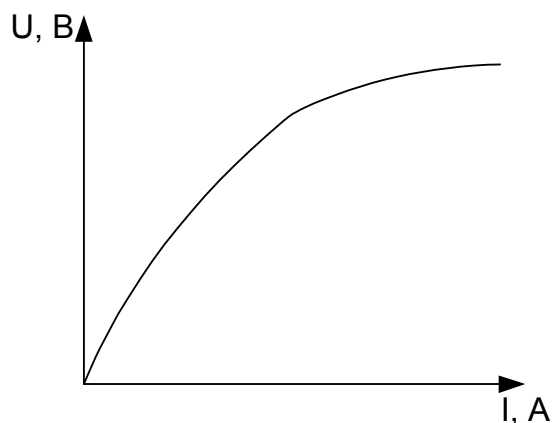


Рис. 8.5. Внешняя характеристика генератора с последовательным возбуждением

8.4. Генератор смешанного возбуждения

Генератор смешанного возбуждения имеет две обмотки возбуждения и совмещает свойства двух генераторов (параллельного и последовательного возбуждения, рис. 8.6):

- 1) характеристика холостого хода $E = f(I_B)$ при $I = 0$, $n = \text{const}$ не отличается от характеристики холостого хода генератора параллельного возбуждения;
- 2) при внешней характеристике обмотки включают: согласно (магнитодвижущие силы от обеих обмоток складываются) и встречно (магнитодвижущие силы вычитаются).

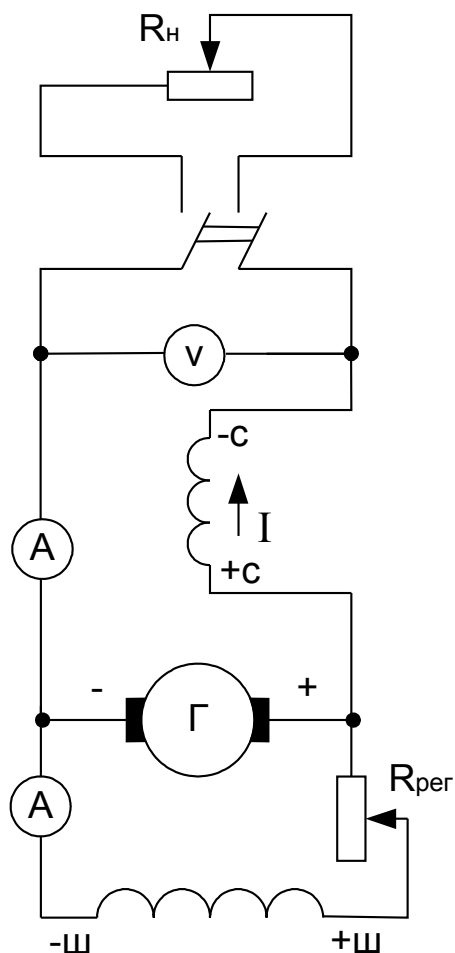


Рис. 8.6. Схема включения генератора смешанного возбуждения

При согласном включении главную роль играет параллельная обмотка, а последовательная – компенсирует размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в цепи якоря. Этим достигается автоматическое регулирование напряжения в определенных пределах нагрузки (рис. 8.7).

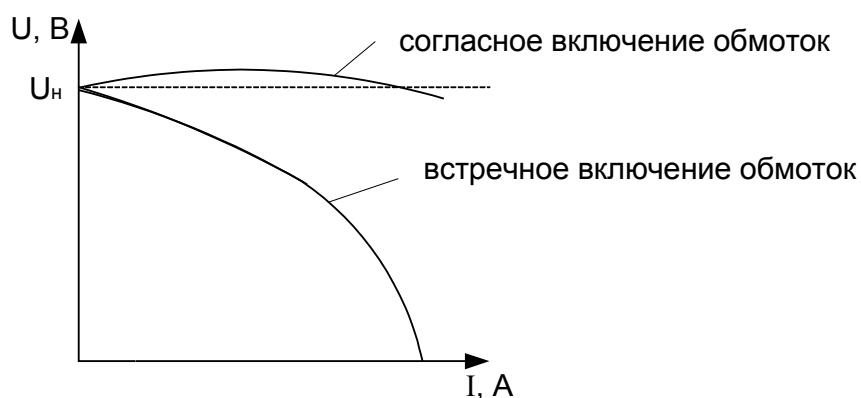


Рис. 8.7. Внешняя характеристика генератора смешанного возбуждения

Встречное включение обмоток применяется в некоторых типах сварочных генераторов, где нужна крутопадающая характеристика.

Лекция 9

Двигатели постоянного тока

План лекции

9.1. Основные уравнения двигателей постоянного тока.

9.2. Пуск в ход двигателей постоянного тока.

9.3. Регулирование частоты вращения.

9.4. Условия устойчивой работы двигателей.

9.1. Основные уравнения двигателей постоянного тока

Основное уравнение выражает, что напряжение сети U уравновешивается падением напряжения в обмотке якоря и противоэдс

$$U = I_a R_a + E, \quad (9.1)$$

где $E = C_e n \Phi$; $C_e = \frac{P N}{60 a}$ – постоянная машины по эдс.

Уравнения (9.1) умножим на I_a

$$U I_a = I_a^2 R_a + E I_a,$$

$$P_1 = P_{эл} + P_{Э},$$

где $P_{эл}$ – электрические потери мощности; $P_{Э}$ – электромагнитная мощность двигателя.

Электромагнитной мощностью называется та часть мощности на входе P_1 , которая в процессе работы преобразуется в механическую мощность вращения якоря

$$P_{Э} = P_2 + P_{мех} + P_{мг},$$

где P_2 – механическая полезная мощность на валу; $P_{мех}$ – механические потери мощности; $P_{мг}$ – магнитные потери мощности.

$$P_{Э} = E I_a = \omega M_{Э},$$

$$M_{Э} = \frac{E I_a}{\omega 2 \pi} = \frac{C_e n \Phi I_a}{2 \pi \frac{n}{60}} = \frac{30 C_e}{\pi} \Phi I_a.$$

Таким образом, машина развивает электромагнитный момент

$$M_{\text{Э}} = (M) = C_M I_a \Phi, \quad (9.2)$$

в то же время

$$M_{\text{Э}} = M_2 + M_0 + M_j, \quad (9.3)$$

где M_2 – полезный момент на валу двигателя, определяется моментом сопротивления рабочего механизма; M_0 – момент холостого хода, идущий на преодоление сил трения в самом двигателе; M_j – динамический момент, возникающий при изменении скорости вращения,

$$M_j = J \frac{d\omega}{dt},$$

где J – момент инерции.

Если $\frac{d\omega}{dt} > 0$ – ускорение двигателя;

$\frac{d\omega}{dt} < 0$ – замедление двигателя;

$\frac{d\omega}{dt} = 0$, то и $M_j = 0$, тогда $M_{\text{Э}} = M_c$,

где M_c – момент сопротивления рабочего механизма, Н·м. Тогда электромагнитный момент определится по формуле:

$$M = \frac{P_{\text{Э}}}{\omega} = \frac{P_{\text{Э}} 30}{\pi n} = 9,55 \frac{P_{\text{Э}}}{n},$$

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega}.$$

Анализ выражений (9.2) и (9.3) показывает, что с увеличением момента на валу M_2 , возрастает электромагнитный момент $M_{\text{Э}}$ и электромагнитная мощность $P_{\text{Э}}$, а также входная мощность $P_1 = U I_a$. Но так как $U = \text{const}$, то увеличение нагрузки двигателя сопровождается ростом тока в обмотке якоря I_a .

9.2. Пуск в ход двигателей постоянного тока

Из уравнения (9.1) получим выражение для тока якоря:

$$I_a = \frac{U - E}{R_a} = \frac{U - C_e n \Phi}{R_a}.$$

При пуске двигателя $n = 0$, следовательно, $E = 0$, тогда $I_{\text{пуск}} = \frac{U}{R_a}$.

Пример: $P_{1н} = 10$ кВт; $U_{\text{сети}} = 110$ В; $R_a = 0,08$ Ом.

Определить величину $I_{\text{пуск}}$ при прямом пуске:

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{сети}}}{R_a} = \frac{110}{0,08} = 1375 \text{ А}.$$

А номинальный ток:

$$I_n = \frac{P_{1н}}{U} = \frac{10000}{110} = 91 \text{ А},$$

$$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_n} = \frac{1375}{91} = 15 \text{ раз}.$$

Такой пусковой ток весьма опасен для двигателя, так как создает:

- ударный момент;
- искрение на коллекторе;
- падение напряжения в сети;
- нагрев двигателя.

Для ограничения пускового тока на время пуска вводят сопротивление $R_{\text{пуск}}$ такой величины, чтобы ток якоря составлял $(1,5 \div 2) I_{a \text{ ном}}$:

$$I_a = \frac{U}{R_a + R_{\text{пуск}}} = (1,5 \div 2) I_{a \text{ ном}}.$$

По мере разгона двигателя появляется и увеличивается эдс E , следовательно, ток I_a и момент $M = C_M \Phi I_a$ уменьшаются, поэтому $R_{\text{пуск}}$ надо выводить из цепи якоря:

$$I_a = \frac{U - E}{R_a + R_{\text{пуск}}}.$$

Устройство реостатов рассмотреть самостоятельно.

9.3. Регулирование частоты вращения

Из уравнения (9.1)

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}.$$

Из формулы видно, что регулировать частоту вращения можно:

- напряжением;
- магнитным потоком i_b и w .

Частота вращения также зависит от тока I_a , но регулировать им не представляется возможным. Физически это объясняется тем, что увеличение U и уменьшение Φ ведет к увеличению разности $(U-E)$, тока I_a , момента вращения и частоты вращения n .

Для того чтобы осуществить **реверсирование**, т.е. изменить направление вращения, нужно либо изменить направление i_b , либо поменять направление I_a .

9.4. Условия устойчивой работы двигателей

Двигатель работает устойчиво и с постоянной частотой вращения при $M = M_c$ (рис. 9.1), неустойчиво – при $M \neq M_c$ (рис. 9.2).

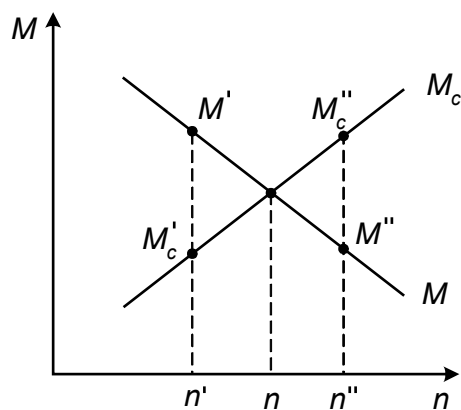


Рис. 9.1. Устойчивая работа двигателя: с увеличением n до n'' возрастет $M_c'' > M''$, произойдет замедление и возвращение в точку n ; с уменьшением n до n' возрастет $M' > M_c'$, начнется ускорение до n ; n – устойчивая точка

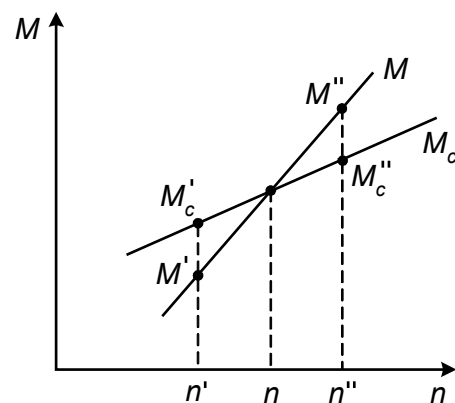


Рис. 9.2. Неустойчивая работа двигателя: с увеличением n до n'' $M'' > M_c''$ произойдет дальнейшее увеличение n ; с уменьшением n до n' $M_c' > M'$ произойдет дальнейшее уменьшение n ; n – неустойчивая точка

Таким образом, установившаяся частота вращения двигателя зависит не только от равенства моментов $M = M_c$, но и от устойчивости в работе двигателя.

Лекция 10

Двигатель с параллельным возбуждением

План лекции

10.1. Схема управления двигателем.

10.2. Характеристики двигателя с параллельным возбуждением.

10.3. Частота вращения и переходный процесс при изменении сопротивления в цепи якоря.

10.4. Частота вращения и переходный процесс при изменении магнитного потока.

10.5. Частота вращения и переходный процесс при изменении питающего напряжения.

10.1. Схема управления двигателем

В схеме управления двигателем используют трехзажимный реостат (рис. 10.1) с выводами Л, Я, Ш. Величина магнитного потока регулируется сопротивлением $R_{рег}$ в цепи обмотки возбуждения (+Ш) и (-Ш).

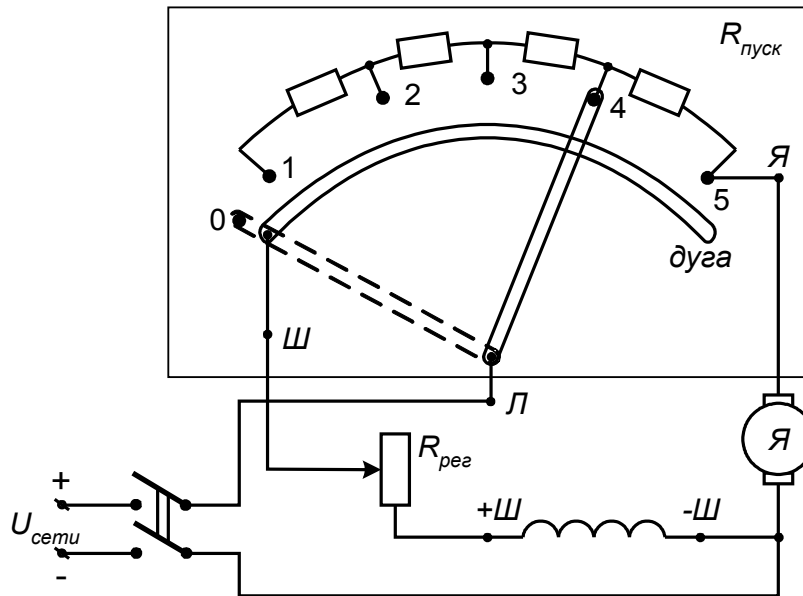


Рис. 10.1. Схема трехзажимного реостата

10.2. Характеристики двигателя с параллельным возбуждением

Пусковые характеристики:

- пусковой ток I_n/I_n ;
- пусковой момент M_n/M_n ;
- время пуска t_n ;
- экономичность.

Рабочие характеристики $n, M, \eta = f(I_a)$ при $U, I_b = \text{const}$ (рис. 10.2):

- моментная характеристика $M = f(I_a)$
- $M = C_M \Phi I_a = \text{const } I_a,$
-

Рис. 10.2. Моментные характеристики двигателя

$$M_2 = M - M_0;$$

– электромеханическая характеристика $n = f(I_a)$ (рис. 10.3):

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi},$$

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_0} 100 \% = (2 \div 8) \%.$$

Увеличение I_a ведет к уменьшению n (рис. 10.3, кривая 1).

Но реакция якоря уменьшает основной магнитный поток, что ведет к увеличению n (рис. 10.3, кривая 2);

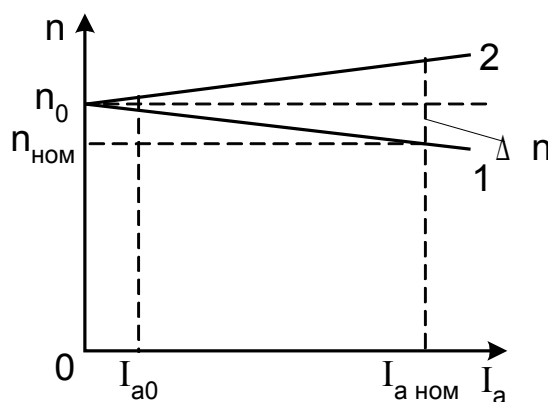


Рис. 10.3. Электромеханические характеристики двигателя

– кпд двигателя $\eta = f(I_a)$ (рис. 10.4).

Магнитные потери $P_{\text{мг}}$ постоянны.

Электрические потери $P_{\text{эл}}$

переменны.

Если $P_{\text{эл}} = P_{\text{мг}}$, то $\eta = \eta_{\text{max}}$.

При $n = \text{const}$ $P_{\text{мех}}$ также можно отнести к постоянным потерям.

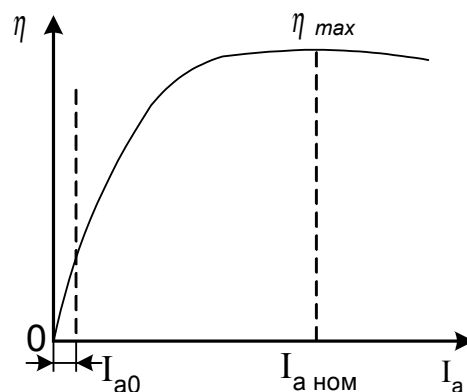


Рис. 10.4. Кпд двигателя

Механическая характеристика $n = f(M)$ (рис. 10.5).

Из уравнения $M = C_M \Phi I_a$,

$$I_a = \frac{M}{C \Phi}, \text{ тогда}$$

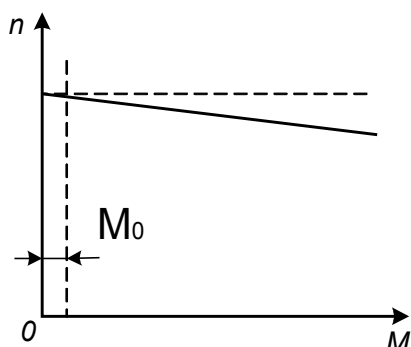


Рис. 10.5. Механическая характеристика двигателя

$$n = \frac{U - \frac{M}{C_M \Phi} R_a}{C_e \Phi} \text{ – жесткая характеристика.}$$

Регулировочные характеристики

Как следует из предыдущего материала (см. подразд. 9.2), в цепь якоря двигателя можно включать добавочное регулировочное сопротивление R_d , тогда основное уравнение эдс двигателя принимает вид

$$U = C_e n \Phi + I_a (R_a + R_d),$$

откуда
$$n = \frac{U - I_a (R_a + R_d)}{C_e \Phi}.$$

Регулировать частоту вращения можно:

- 1) изменением $\Delta U_a = I_a (R_a + R_d)$ за счет R_d ;
- 2) подводимым напряжением U ;
- 3) основным магнитным потоком Φ .

10.3. Частота вращения и переходный процесс при изменении сопротивления в цепи якоря

Частота вращения двигателя может быть выражена:

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_a (R_a + R_d)}{c_e \Phi} = n_0 - \Delta n.$$

10.3.1. Электромеханические характеристики

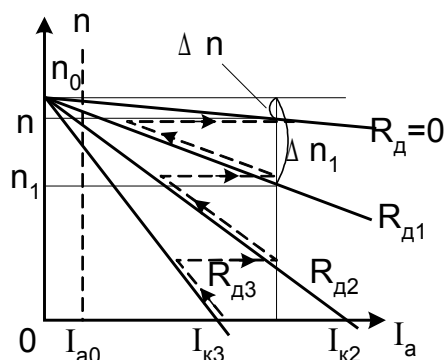


Рис. 10.6. Семейство электро-механических характеристик

В зависимости от соотношения добавочных сопротивлений $R_{d3} > R_{d2} > R_{d1} > R_d = 0$, получаем различный наклон характеристик (рис. 10.6).

При $n = 0$ $E = C_e n \Phi = 0$,

$$U = I_a (R_a + R_d) \Rightarrow$$

$$U = I_{k2} (R_a + R_d),$$

$$U = I_{k3} (R_a + R_d),$$

где I_{k2} и I_{k3} – токи короткого замыкания (токи пуска).

Электромеханические характеристики: – естественная при $R_d = 0$;

– искусственные при $R_d > 0$.

10.3.2. Механические характеристики

Семейство механических характеристик $n = f(M)$ будет иметь вид аналогичный электромеханическим, так как при $\Phi = \text{const}$ момент M пропорционален току I_a .

10.3.3. Моментная характеристика

Моментная характеристика останется без изменений, так как на $M = f(I_a)$ R_d не влияет.

Этот способ регулирования имеет недостатки:

– можно только уменьшать частоту вращения от значения n_0 ;

– возникают дополнительные потери мощности $\Delta p = I_a^2 R_d$.

10.3.4. Переходный процесс

До t_1 $M = M_c = \text{const}$ и $n = \text{const}$.

При t_1 ввели R_d ; в силу инерции n скачком измениться не может, поэтому остается прежним (рис. 10.7).

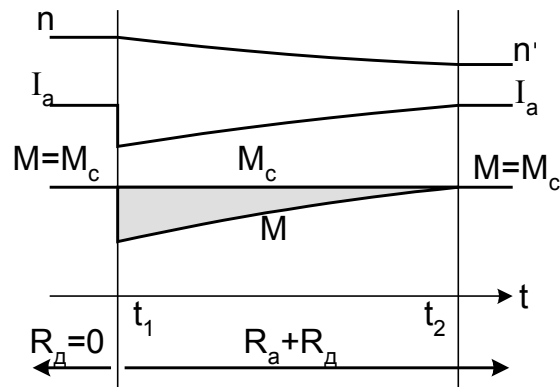


Рис. 10.7. Переходный процесс при введении в цепь якоря R_d ; t_1 – начало переходного процесса; t_2 – окончание переходного процесса

А ток I_a уменьшится резко, также уменьшится $M = C_M \Phi I_a$, так как $M < M_c$ появится отрицательный динамический момент, который вызовет

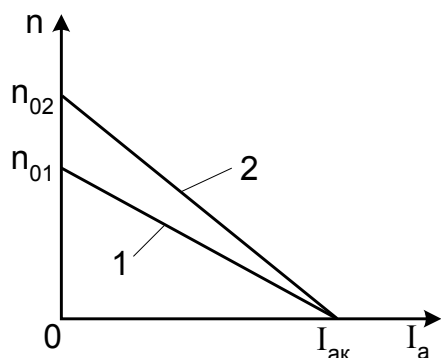
постепенное уменьшение n и соответственно E . Ток якоря I_a начнет возрастать и также будет увеличиваться M до $M = M_c$.

По окончании переходного процесса $n' = \text{const}$, но $n' < n$.

10.4. Частота вращения и переходный процесс при изменении магнитного потока

10.4.1. Электромеханические характеристики (рис. 10.8)

Пусть $\Phi_1 > \Phi_2$.



$$n_1 = \frac{U - I_a R_a}{c_e \Phi_1} \quad \text{и} \quad n_2 = \frac{U - I_a R_a}{c_e \Phi_2}$$

На холостом ходу $I_a = 0$;

$$n_{01} = \frac{U}{c_e \Phi_1} < \frac{U}{c_e \Phi_2} = n_{02}$$

Эти характеристики не параллельны, так как при $n = 0$ $c_e \Phi n = 0$, а ток I_a не зависит от магнитного потока

Рис. 10.8. Электромеханические характеристики двигателя:

1 —

$$U = I_{ак} R_a$$

10.4.2. Механические характеристики

На холостом ходу $I_a = 0$ и $M = 0$, при $\Phi_1 > \Phi_2$ $n_{02} > n_{01}$ (рис. 10.9).

При коротком замыкании, когда $n = 0$

$$\frac{M_{к1}}{M_{к2}} = \frac{C_M \Phi_1 I_{ак}}{C_M \Phi_2 I_{ак}} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2}$$

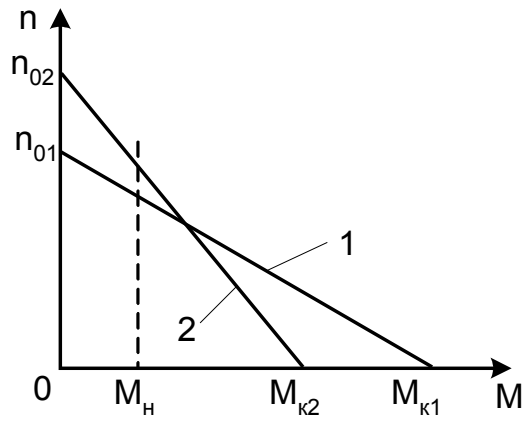


Рис. 10.9. Механические характеристики двигателя: 1 – естественная; 2 – искусственная

На практике зона изменения моментов находится в пределах $0 \div M_n$.

10.4.3. Моментная характеристика

Моментная характеристика не претерпевает изменений и семейства характеристик не имеет.

10.4.4. Переходный процесс

Если уменьшим Φ , то при неизменной в первый момент n уменьшится $E = C_e n \Phi$, но резко увеличится I_a , а вот момент неизвестно как себя «поведет» ($M = c_M \Phi I_a$), так как Φ уменьшается, а I_a увеличивается (рис. 10.10).

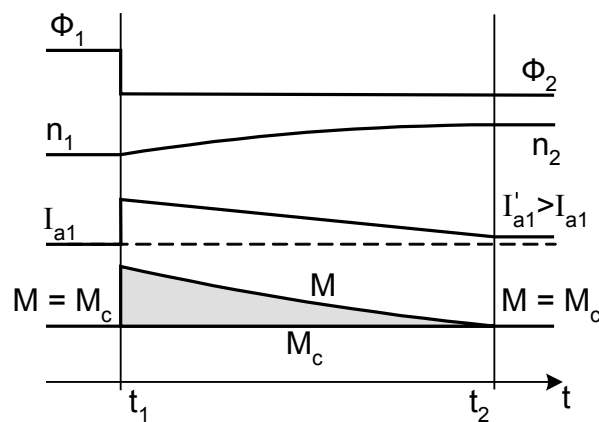


Рис. 10.10. Переходной процесс при изменении магнитного потока

Допустим, что $\Phi_2 = 0,8\Phi_1 \Rightarrow E_2 = 0,8E_1$.

Обычно $E_H = 0,95U_H$, тогда ток якоря:

$$I_{a1} = \frac{U_H - 0,95 U_H}{R_a} = 0,05 \frac{U_H}{R_a};$$

$$I_{a2} = \frac{U_H - 0,8(0,95 U_H)}{R_a} = \frac{U_H - 0,76 U_H}{R_a} = 0,24 \frac{U_H}{R_a};$$

$$\frac{I_{a2}}{I_{a1}} = \frac{0,24}{0,05} = 4,8 \text{ раза};$$

$$M_1 = c_M I_{a1} \Phi_1;$$

$$M_2 = c_M (4,8 I_{a1}) (0,8 \Phi_1).$$

Значит $M_2 > M_1$ в $4,8 \cdot 0,8 = 3,8$ раза, т.е. момент увеличится $M > M_c$, начнется ускорение n , увеличится E , но уменьшится I_a и постепенно уменьшится M до

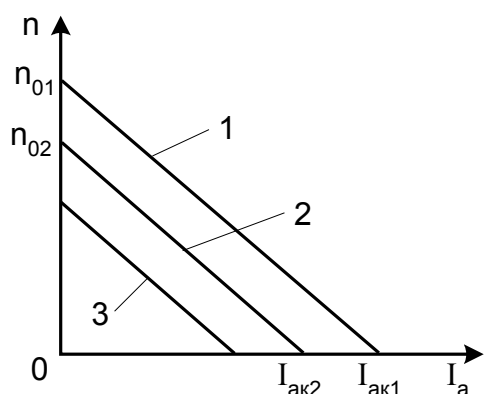
$$M = M_c.$$

Этот способ регулирования экономически выгоден:

- потери мощности малы;
- ток возбуждения мал.

10.5. Частота вращения и переходный процесс при изменении питающего напряжения

10.5.1. Электромеханические характеристики



Электромеханические характеристики зависят от подведенного напряжения:

$$U_1 > U_2 > U_3 \text{ (рис. 10.11).}$$

Если $U_1 > U_2$;

Рис. 10.11.

$$n_1 = \frac{U_1}{C_e \Phi} - \frac{I_a R_a}{C_e \Phi},$$

$$n_2 = \frac{U_2}{C_e \Phi} - \frac{I_a R_a}{C_e \Phi}.$$

При холостом ходе $I_a = 0$ $n_{01} > n_{02}$.

При коротком замыкании ($n = 0$)

$$U_1 = I_{ак1} R_a,$$

$$U_2 = I_{ак2} R_a, \quad I_{ак1} > I_{ак2}.$$

10.5.2. Механические характеристики

Механические характеристики повторяют электромеханические.

10.5.3. Моментная характеристика

Моментная характеристика при изменении напряжения не меняется.

10.5.4. Переходный процесс

Пусть уменьшится питающее напряжение от U_1 до U_2 , ток якоря уменьшится от I_{a1} до I'_{a1} (рис. 10.12).

Момент вращения также уменьшится $M < M_c$, начнется замедление вращения, т.е. n и E уменьшатся, а ток будет возрастать и M возрастает до значения $M = M_c$, когда n установится, но $n_2 < n_1$.

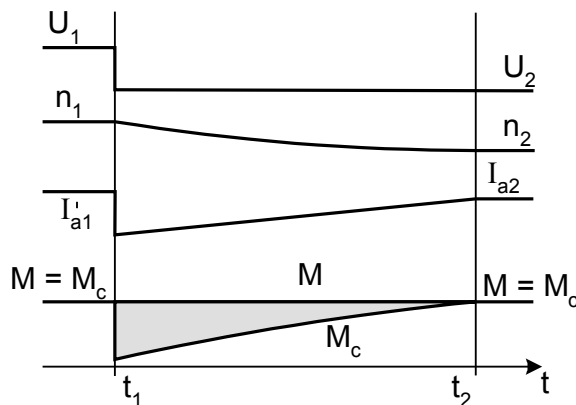


Рис. 10.12. Переходный процесс при изменении питающего напряжения

Лекция 11

Двигатель с последовательным возбуждением

План лекции

11.1. Характеристики двигателя с последовательным возбуждением.

11.2. Частота вращения и переходный процесс при введении в цепь якоря добавочных сопротивлений.

11.3. Частота вращения и переходный процесс при изменении магнитного потока.

11.4. Частота вращения и переходный процесс при изменении напряжения на зажимах двигателя.

11.1. Характеристики двигателя с последовательным возбуждением

Особенностью двигателя этого типа является то, что ток в обмотке возбуждения тот же, что и в якорной обмотке. Поэтому при изменении нагрузки двигателя его магнитный поток также изменяется в широких пределах ($I_a = I_b$). Схема двигателя представлена на рис. 11.1.

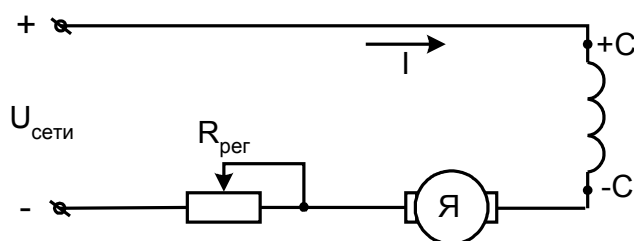


Рис. 11.1. Схема двигателя последовательного возбуждения

Электромеханическая характеристика $n = f(I_a)$ при $U = \text{const}$

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I_a R_a}{C_e \Phi}.$$

Предположим:

1) $I_a R_a \approx 0$, так как R_a очень мало;

2) магнитная система не насыщена, т.е.

$\Phi = k I_a$ (область (0 – а) на рис. 11.2).

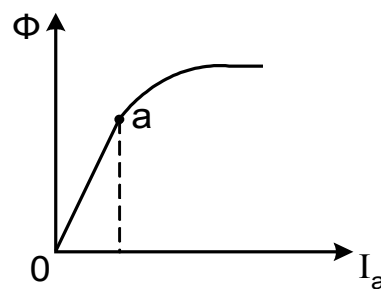


Рис. 11.2. Кривая намагничивания

$$\text{Тогда } n = \frac{U}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e k I_a} = \frac{\text{const}}{I_a},$$

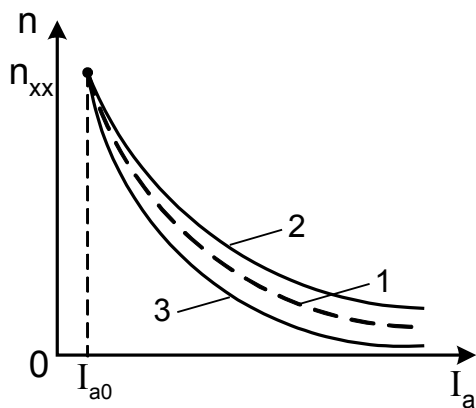


Рис. 11.3. Электромеханические характеристики двигателя

т.е. $n I_a = \text{const}$. Таким образом, электромеханическая характеристика будет иметь вид гиперболы (рис. 11.3, кривая 1).

При нарушении пропорциональности между Φ и I_a поток возрастает медленнее, поэтому зависимость пройдет по кривой 2 (рис. 11.3).

Анализируя выражение $\frac{I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{I_a}{\Phi} \text{const}$,

то с ростом I_a это выражение будет увеличиваться, а зависимость пройдет по кривой 3 (рис. 11.3).

При изменении нагрузки (тока I_a) скорость вращения изменяется в широких пределах. В данном случае имеет место мягкая характеристика, поэтому нельзя допускать, чтобы двигатель последовательного возбуждения работал в режиме холостого хода. Это приводит к работе двигателя вразнос (частота вращения $n_{xx} \rightarrow \infty$ при I_{a0}), что в свою очередь может привести к его поломке.

Моментная характеристика $M_2 = f(I_a)$ при $U = \text{const}$ (рис. 11.4)

$$M_2 = M_{\Theta} - M_0 = C_M I_a \Phi - M_0,$$

до насыщения $\Phi = k I_a$, так как $C_e = \frac{PN}{60a}$, то $M_{\Theta} = C_M k I_a^2$; так как $C_M k = \text{const}$,

то $M_{\Theta} \propto I_a^2$, т.е. зависимость – квадратичная.

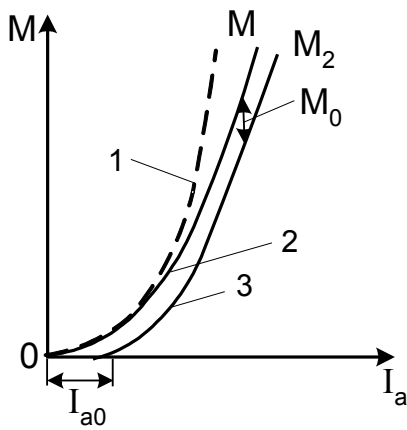


Рис. 11.4. Моментные характеристики двигателя: 1 – без учета насыщения $M_0 = f(I_a)$; 2 – с учетом насыщения $M_0 = f(I_a)$; 3 – с учетом насыщения $M_2 = f(I_a)$

Механическую характеристику (рис. 11.5) $n = f(M_2)$ при $U = \text{const}$ можно получить построением из двух предыдущих характеристик или объяснить теоретически.

Такие характеристики называются мягкими:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$$

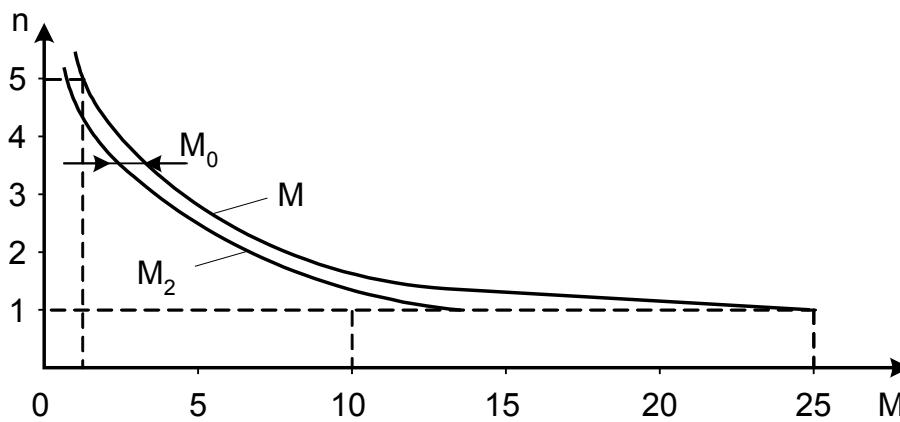


Рис. 11.5. Механические характеристики двигателя

Учитывая, что $M_0 = C_M I_a \Phi$, а $\Phi = k I_a$, для ненасыщенной системы

$M_0 = c I_a^2$, тогда $I_a = \sqrt{M_0/c}$ и, принимая $I_a R_a \approx 0$, получим

$$n = \frac{U}{C_e k I_a} = \frac{U}{C_e k \sqrt{\frac{M_0}{c}}} = \frac{U}{\frac{C_e}{\sqrt{c}} \sqrt{M_0}} = \frac{\text{const}}{\sqrt{M_0}}$$

11.2. Частота вращения и переходный процесс при введении в цепь якоря добавочных сопротивлений

При введении в цепь якоря добавочных сопротивлений происходят те же процессы, что и в шунтовом двигателе.

$$\text{Без введения } R_d \quad n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi},$$

$$\text{при введении } R_d \quad n' = \frac{U - I_a (R_a + R_d)}{C_e \Phi},$$

т.е. $\frac{n}{n'} = \frac{U - I_a R_a}{U - I_a (R_a + R_d)}$, тогда электромеханические характеристики примут

вид:

$$R_{d2} > R_{d1} > 0.$$

С помощью пускового реостата подбирают такую величину R_{d2} , чтобы при $n = 0$, $I_{к2} = I_{пуск} \approx (1,5 \div 2 I_{ном})$.

Начинают разгон по кривой 3 до $I_{ан}(n''_{уст})$ (рис. 11.6), уменьшают до R_{d1} , переходят на кривую 2, разгоняют до $n'_{уст}$ и т.д. (пусковая диаграмма, рис. 11.6).

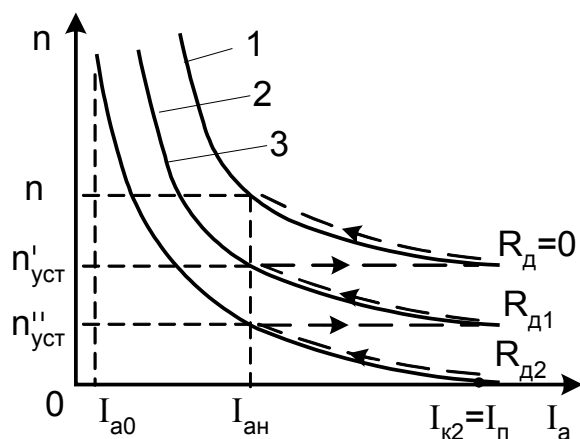


Рис. 11.6.
Электромеханические характеристики двигателя: 1 — естественная; 2 и 3 — искусственные

Моментная характеристика не зависит от R_d . Механическая характеристика аналогична электромеханической. Переходной процесс такой же, как и у двигателя параллельного возбуждения.

11.3. Частота вращения и переходный процесс при изменении магнитного потока

От изменения магнитного потока изменяется частота вращения.

Пусть $\Phi' < \Phi$, $n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$, $n' = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi'}$, $\frac{n}{n'} = \frac{C_e \Phi'}{C_e \Phi}$.

11.3.1. Способы изменения магнитного потока

Величина Φ зависит от намагничивающей силы обмотки возбуждения $F_B = I_B W$, следовательно, изменить магнитный поток можно двумя способами:

- изменением тока возбуждения при $W = \text{const}$ (шунтирование обмотки возбуждения, рис. 11.7, а);
- изменением числа витков при $I_B = \text{const}$ (секционирование обмотки возбуждения, рис. 11.7, б).

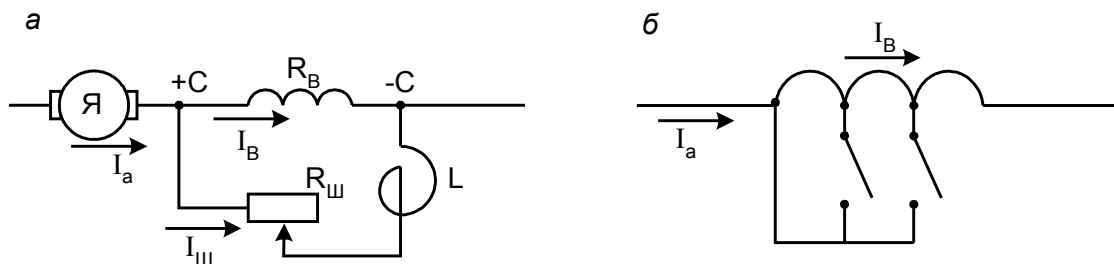


Рис. 11.7. Схемы для изменения магнитного потока

Таким образом, ток возбуждения определяется

$$I_B = I_a - I_{ш},$$

$$\frac{I_B}{I_a} = \alpha \text{ — коэффициент ослабления поля.}$$

11.3.2. Переходный процесс

Особенностью регулирования n изменением магнитного потока является то, что, например, с уменьшением I_B уменьшаются Φ и E , вследствие чего увеличивается ток якоря, а вместе с ним и I_B и $I_{ш}$, что ведет вновь к увеличению магнитного потока почти до первоначального момента (рис. 11.8).

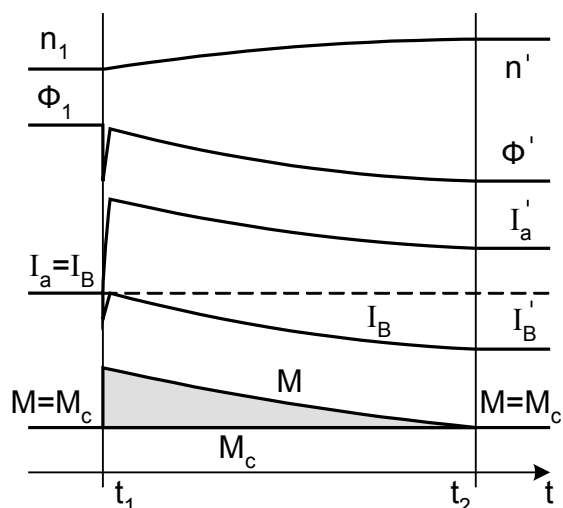


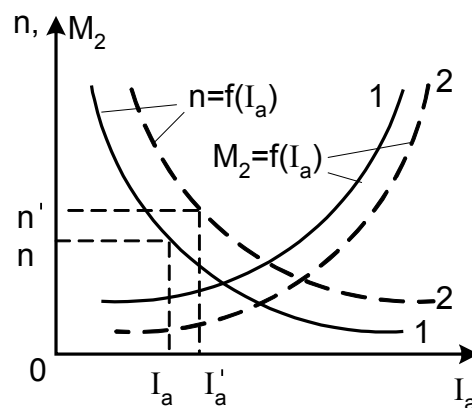
Рис. 11.8 Переходный процесс при изменении магнитного потока

С увеличением тока якоря увеличивается $M_{\text{Э}}$ ($M_{\text{Э}} > M_{\text{с}}$), начинается разгон двигателя, это ведет к увеличению n и E и уменьшению тока якоря и $I_{\text{В}}$, а, следовательно, и Φ . Все это продолжается до момента стабилизации ($M_{\text{Э}} = M_{\text{с}}$), но при этом $I'_{\text{а}} > I_{\text{а}}$, $I'_{\text{В}} < I_{\text{В}}$, $\Phi' < \Phi$.

В шунтирующей цепи должна иметься индуктивность L . В случае отрыва и нового контакта пантографа, все замкнется через якорь и $R_{\text{ш}}$ (см. рис. 11.7, а), если в его цепи не будет L , то $I = \frac{U}{R_{\text{а}} + R_{\text{ш}}}$ очень велико, так как не будет противоэдс, что приведет к “круговому огню”.

Анализ характеристик при изменении Φ дан на рис. 11.9.

Рис. 11.9. Электромеханические и моментные характеристики двигателя: 1 – естественная; 2 – искусственная



11.3.3. Моментные характеристики $M = f(I_{\text{а}})$

При тех же токах $I_{\text{а}}$ зависимость определяется только потоком Φ , следовательно,

$$M_2 = M_{\text{Э}} - M_0 = c_M I_{\text{а}} \Phi - M_0.$$

Механическая характеристика будет аналогична электромеханической.

11.4. Частота вращения и переходный процесс при изменении напряжения на зажимах двигателя

Переходный процесс аналогичен процессу двигателя с параллельным возбуждением.

Переходный процесс аналогичен процессу двигателя с параллельным возбуждением.

Изменить напряжение на двигателях можно:

- по системе Г-Д (применяется редко);
- перегруппировкой двигателей, т.е. переключением с последовательного соединения на параллельное (рис. 11.10).

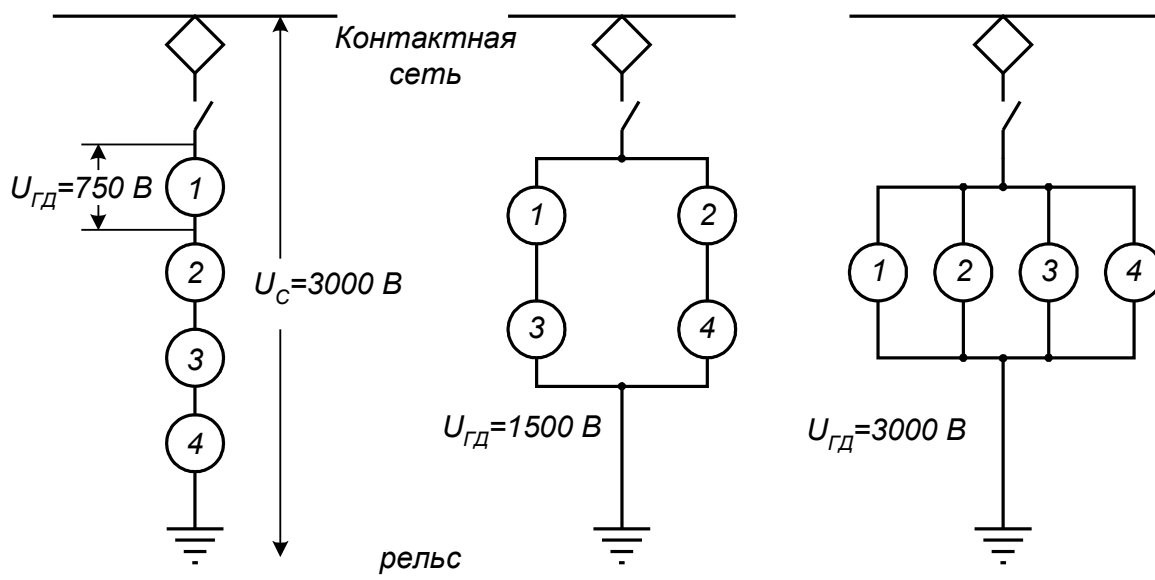
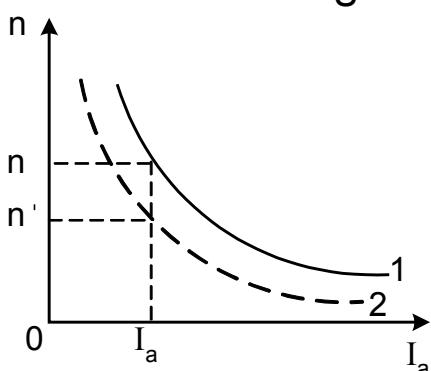


Рис. 11.10. Схемы включения тяговых двигателей

При первоначальном напряжении U $n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$;

уменьшим напряжение $n' = \frac{\beta U - I_a R_a}{C_e \Phi}$, тогда $\frac{n}{n'} = \frac{U - I_a R_a}{\beta U - I_a R_a}$, так как

$I_a R_a \rightarrow 0$, то $n' = \beta \frac{U}{U} n = \beta n$.



Если уменьшится напряжение, то уменьшится и частота вращения почти во столько же раз при том же токе якоря I_a (рис. 11.11).

Механическая характеристика аналогична

электромеханической.

Моментная характеристика не зависит от напряжения.

Характеристики двигателя смешанного возбуждения рассмотреть самостоятельно. Его характеристики находятся между характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения.

Рис. 11.11.
Электромеханические характеристики двигателя:
1 – при $U_{ном}$; 2 – при $U <$

Лекция 12 Трансформаторы

План лекции

12.1. Устройство и принцип действия однофазного трансформатора.

12.2. Уравнения напряжений и эдс однофазного трансформатора под нагрузкой.

Трансформатор представляет собой статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Чаще всего применяются *однофазные* и *трехфазные* трансформаторы. Трансформаторы с другим числом фаз используются в специальных устройствах.

В зависимости от назначения трансформаторы имеют некоторые особенности в конструкции и режимах работы.

12.1. Устройство и принцип действия однофазного трансформатора

Простейший трансформатор (рис. 12.1) состоит из магнитомягкого замкнутого магнитопровода (сердечника) и двух обмоток.

Магнитопровод служит для концентрации и прохождения магнитного потока. Он должен обладать минимальным сопротивлением магнитному потоку и выполняться из магнитомягкого ферромагнитного материала.

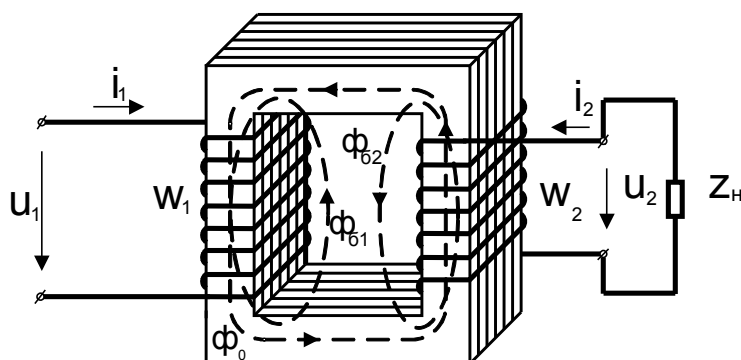


Рис. 12.1 Простейший однофазный трансформатор (магнитопровод стержневого типа)

Ферромагнетики, попадая во внешнее магнитное поле, создают свое магнитное поле, поток которого намного больше потока катушки.

По конструкции магнитопроводы бывают *стержневого* (рис. 12.1) и *броневое* (рис. 12.2) типов.

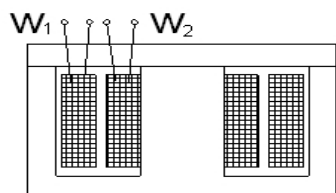


Рис. 12.2 - Магнитопровод броневое трансформатора

Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопроводы набираются из листов электротехнической стали толщиной 0,5 и 0,35 мм *горячекатаной прокатки* (1411, 1511) или *холоднокатаной прокатки* (3411, 3412, 3413 и др.).

Рис. 12.2. Магнитопровод броневое типа

У листов холоднокатаной стали сопротивление R_{μ} по направлению проката меньше.

Сердечники, набранные из листов стали, называются *шихтованными*.

Шихтованные сердечники изготовляют *встык* (рис. 12.3, а) и *впереплет* (рис. 12.3, б). На сердечники, изготовленные встык, упрощается посадка обмотки, их применяют в трансформаторах малой мощности.

Для уменьшения воздушных зазоров используют *ленточные* сердечники (рис. 12.3, в).

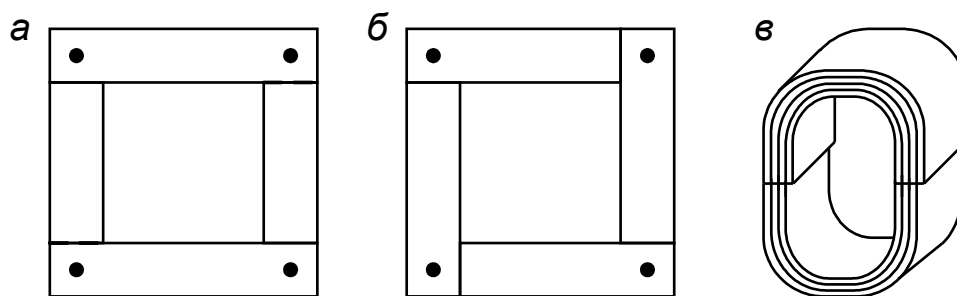


Рис. 12.3. Магнитопроводы уложенные встык (а);
впереплет (б); ленточный (в)

Принцип действия трансформатора основан на *законе электромагнитной индукции*.

К первичной обмотке трансформатора подключается переменное напряжение u_1 , по ней потечет переменный ток i_1 , который создаст магнитодвижущую силу (мдс) $i_1 W_1$. Мдс в свою очередь создаст переменный магнитный поток, который, замыкаясь по магнитопроводу, будет наводить в обеих обмотках электродвижущую силу. В первичной обмотке возникает эдс самоиндукции, а во вторичной – эдс взаимной индукции

$$u_1 \rightarrow i_1 \rightarrow F_1 = W_1 i_1 \rightarrow (\Phi_0 + \Phi_6),$$

где Φ_0 – основной магнитный поток, пересекающий обе обмотки; Φ_6 – поток рассеяния, пересекающий только одну обмотку (см. рис. 12.1);

$$\Phi_0 \begin{cases} \rightarrow e_2 = - W_2 \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ \rightarrow e_1 = - W_1 \frac{d\Phi_0}{dt}. \end{cases}$$

12.2. Уравнения напряжений и эдс однофазного трансформатора под нагрузкой

Если к вторичной обмотке подключить нагрузку Z_n , то по ней потечет ток i_2 . Этот ток создает свой магнитный поток Φ_2 , который направлен навстречу основному потоку от тока i_1 .

Таким образом, получается два взаимно-индуктивных контура со встречным включением обмоток (рис. 12.4).

На рис. 12.4 представлена схема замещения трансформатора.

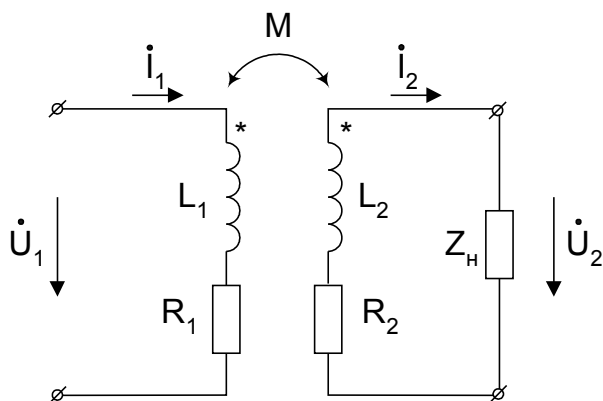


Рис. 12.4 Схема встречного включения обмоток трансформатора: * – одноименные зажимы

Два зажима 2-х разных элементов являются одноименными и обозначаются одинаково. Если токи относительно их протекают в одном направлении, а магнитные потоки направлены согласно – это согласное включение обмоток.

На рис. 12.4 показано встречное включение обмоток.

Коэффициент магнитной связи K :

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}};$$

$$M = K\sqrt{L_1 L_2},$$

где L_1 – собственная индуктивность первичной обмотки, Гн; L_2 – собственная индуктивность вторичной обмотки, Гн; M – взаимная индуктивность обмоток, Гн.

Составим уравнения по 2-му закону Кирхгофа для мгновенных значений токов:

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 R_1 - M \frac{di_2}{dt}, \quad (12.1, a)$$

$$0 = L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 R_2 - M \frac{di_1}{dt} + u_2, \quad (12.2,а)$$

или в комплексной форме записи:

$$\dot{U}_1 = j\omega L_1 \dot{I}_1 + R_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2, \quad (12.1,б)$$

$$0 = j\omega L_2 \dot{I}_2 + R_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 + \dot{U}_2. \quad (12.2,б)$$

Обозначим $j\omega M \dot{I}_2 = \dot{E}_{1M}, \quad j\omega M \dot{I}_1 = \dot{E}_{2M},$

$$j\omega L_1 \dot{I}_1 = \dot{E}_{1S}, \quad j\omega L_2 \dot{I}_2 = \dot{E}_{2S},$$

где \dot{E}_{1M} и \dot{E}_{2M} – эдс взаимной индукции; \dot{E}_{1S} и \dot{E}_{2S} – эдс самоиндукции.

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_{1S} + R_1 \dot{I}_1 - \dot{E}_{1M} = -(\dot{E}_{1M} - \dot{E}_{1S}) + R_1 \dot{I}_1, \quad (12.1,в)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_{2S} - \dot{E}_{2M} - R_2 \dot{I}_2 = (\dot{E}_{2M} - \dot{E}_{2S}) - R_2 \dot{I}_2, \quad (12.2,в)$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1, \quad (12.1,г)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - R_2 \dot{I}_2. \quad (12.2,г)$$

Основные уравнения трансформатора (12.1,г) и (12.2,г) составлены без учета потоков рассеяния.

От потоков рассеяния Φ_δ в обмотках трансформатора наводятся эдс [формулы (12.1,д) и (12.2,д)].

$$e_{\delta 1} = L_{\delta 1} \frac{di_1}{dt} \Rightarrow \dot{E}_{\delta 1} = jX_1 \dot{I}_1, \quad (12.1,д)$$

$$e_{62} = L_{62} \frac{di_1}{dt} \Rightarrow \dot{E}_{62} = jX_2 \dot{I}_2. \quad (12.2,д)$$

Тогда уравнения (12.1,г) и (12.2,г) примут вид:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1,$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - R_2 \dot{I}_2 - jX_2 \dot{I}_2.$$

Работа первичной обмотки трансформатора аналогична работе электродвигателя, а вторичной – генератора.

Лекция 13

Основные соотношения в идеальном трансформаторе. Уравнение МДС, приведение и схемы замещения трансформатора

План лекции

- 13.1. Основные соотношения в идеальном трансформаторе.
- 13.2. Уравнение мдс трансформатора.
- 13.3. Приведенный трансформатор.
- 13.4. Схемы замещения трансформатора.

13.1. Основные соотношения параметров в идеальном трансформаторе

Идеальным называется трансформатор, у которого:

– коэффициент магнитной связи $K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = 1$, т.е. отсутствуют

потoki рассеяния;

– коэффициент полезного действия (кпд) $\eta = 1$, т.е. отсутствуют потери мощности электрические (в обмотках) $p_{эл1} = 0$, так как $r_2 = 0$ и $p_{эл2} = 0$, потому что $r_1 = 0$; магнитные (в сердечнике) $p_{вихр} = 0$ и $p_{гист} = 0$, $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1$, $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$;

– напряжение изменяется по синусоидальному закону, так как $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, т.е. трансформатор работает на прямолинейном участке кривой намагничивания (без насыщения). Наводимые в обмотках эдс:

$$e_1 = - \frac{d\psi_1}{dt} = - W_1 \frac{d\phi}{dt} = - W_1 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} =$$

$$= - \omega W_1 \Phi_m \cos \omega t = \omega W_1 \Phi_m (- \cos \omega t),$$

где $\omega W_1 \Phi_m = E_{1m}$;

$$e_1 = E_{1m} \sin (\omega t - 90^\circ), \quad (13.1)$$

$$e_2 = - \frac{d\psi_2}{dt} = - W_2 \frac{d\phi}{dt} = - W_2 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} =$$

$$= - \omega W_2 \Phi_m \cos \omega t = \omega W_2 \Phi_m (- \cos \omega t),$$

где $\omega W_2 \Phi_m = E_{2m}$;

$$e_2 = E_{2m} \sin (\omega t - 90^\circ). \quad (13.2)$$

Эдс, наводимые магнитным потоком, отстают от него на угол 90° (рис. 13.1)

Действующие значения эдс:

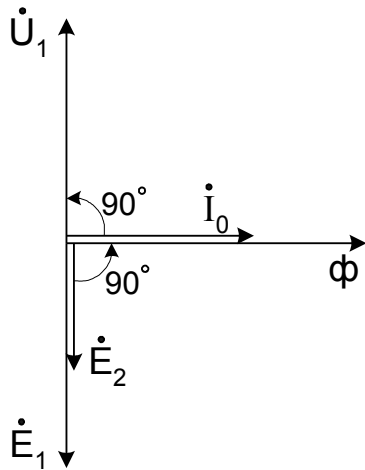
$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega W_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2 \pi f_1}{\sqrt{2}} W_1 \Phi_m;$$

$$E_1 = 4,44 f_1 W_1 \Phi_m, \quad (13.3)$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega W_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2 \pi f_1}{\sqrt{2}} W_2 \Phi_m,$$

$$E_2 = 4,44 f_1 W_2 \Phi_m. \quad (13.4)$$

Рис. 13.1. Векторная диаграмма идеального трансформатора



Если $W_1 > W_2$ – то трансформатор понижающий и наоборот $W_1 < W_2$ – повышающий.

Отношение эдс:
$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 f_1 W_1 \Phi_m}{4,44 f_1 W_2 \Phi_m} = \frac{W_1}{W_2}, \quad (13.5)$$

где K – коэффициент трансформации.

В идеальном трансформаторе $U_1 = E_1$, $U_2 = E_2$, тогда

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2} = K.$$

Мощности обмоток $S_1 = S_2$, $U_1 I_1 = U_2 I_2$, откуда $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = K$.

Таким образом, токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны количеству витков.

В реальном трансформаторе полученные соотношения несколько нарушаются. Но силовые трансформаторы имеют очень высокий КПД ($\eta = 98\div 99\%$), у них r_1 и r_2 малы, x_{61} и x_{62} также малы.

13.2. Уравнение мдс трансформатора

В режиме холостого хода (хх) первичная обмотка трансформатора забирает из сети такой ток $\dot{I}_{1\text{хх}} = \dot{I}_0$, который создает мдс $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 W_1$, а мдс в свою очередь создает магнитный поток Φ_0 .

Когда во вторичной обмотке потечет ток \dot{I}_2 , он создаст свою мдс $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 W_2$ и соответственно свой поток Φ_2 , направление которого встречное к основному потоку Φ_0 . Следовательно, поток Φ_0 уменьшается. Если поток Φ_0 уменьшается, то уменьшается и индуктивное сопротивление x_{L1} в первичной обмотке, а так как \dot{U}_1 неизменно, то увеличится ток в первичной обмотке на величину $\Delta \dot{I}_1$. Кроме тока холостого хода \dot{I}_0 теперь будет потребляться из сети еще дополнительный ток $\Delta \dot{I}_1$ такой величины, которая создает свою мдс $\Delta \dot{F}_1 = \Delta \dot{I}_1 W_1$, компенсирующую мдс \dot{F}_2 , т.е. $\Delta \dot{I}_1 W_1 = \dot{I}_2 W_2$ и основной магнитный поток Φ_0 останется таким же, каким он был в режиме холостого хода.

Таким образом, полную мдс первичной обмотки при работе трансформатора под нагрузкой выразим формулой

$$W_1 \dot{I}_1 = W_1 \dot{I}_0 + W_1 \Delta \dot{I}_1$$

или, заменив $W_1 \Delta \dot{I}_1$ на $(-W_2 \dot{I}_2)$, получим

$$W_1 \dot{I}_1 = W_1 \dot{I}_0 - W_2 \dot{I}_2, \text{ или}$$

$$W_1 \dot{I}_1 + W_2 \dot{I}_2 = W_1 \dot{I}_0. \quad (13.6)$$

Разделив (13.6) на W_1 , получим:

$$\dot{I}_1 + \frac{W_2}{W_1} \dot{I}_2 = \dot{I}_0, \text{ так как } \frac{W_2}{W_1} = \frac{1}{K}, \text{ то}$$

$$\dot{I}_1 + \frac{\dot{I}_2}{K} = \dot{I}_0, \quad (13.7)$$

где $\frac{\dot{I}_2}{K} = \dot{I}'_2$ – ток вторичной обмотки, приведенный к первичной (подразд. 13.3).

13.3. Приведенный трансформатор

Так как в общем случае $\omega_2 \neq \omega_1$, то $E_2 \neq E_1$ и $I_2 \neq I_1$. В соответствии с разными эдс и токами различны и параметры обмоток, т.е. их активные и индуктивные сопротивления. Это затрудняет количественный учет процессов, происходящих в трансформаторе, и построение векторных диаграмм, особенно при больших коэффициентах трансформации.

Чтобы избежать этих затруднений, пользуются способом, при котором *обе обмотки трансформатора приводятся к одному числу витков*.

Обычно приводят вторичную обмотку к первичной, т.е. новое число витков вторичной обмотки приравнивают к первичной $W'_2 = W_1$, (в дальнейшем приведенные параметры обозначаем со штрихом), но чтобы не изменилось энергетическое состояние трансформатора поступают следующим образом: имеют в виду, что при новом числе витков изменится и эдс, т.е. $\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$, так как $W'_2 = W_1$, т.е.

$$\dot{E}'_2 = \dot{E}_2 K. \quad (13.8)$$

Мощность трансформатора не должна измениться, при этом:

– полная мощность $\dot{E}'_2 \dot{I}'_2 = \dot{E}_2 \dot{I}_2$, откуда

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{E}_2 \dot{I}_2}{\dot{E}'_2} = \frac{\dot{E}_2 \dot{I}_2}{\dot{E}_2 K} = \frac{\dot{I}_2}{K},$$

т.е. приведенное значение тока

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{K}; \quad (13.9)$$

– активная мощность $(\dot{I}'_2)^2 R'_2 = (\dot{I}_2)^2 R_2$, откуда

$$R'_2 = \frac{(\dot{I}_2)^2 R_2}{(\dot{I}'_2)^2} = \frac{(\dot{I}_2)^2 R_2}{(\dot{I}_2)^2 / K^2} = K^2 R_2,$$

$$R'_2 = K^2 R_2; \quad (13.10)$$

– реактивная мощность $(\dot{I}'_2)^2 X'_2 = (\dot{I}_2)^2 X_2$, откуда

$$X'_2 = \frac{(\dot{I}_2)^2 X_2}{(\dot{I}'_2)^2} = \frac{(\dot{I}_2)^2 X_2}{(\dot{I}_2)^2 / K^2} = K^2 X_2,$$

$$X'_2 = K^2 X_2; \quad (13.11)$$

и соответственно

$$Z'_2 = K^2 Z_2. \quad (13.12)$$

Уравнение мдс трансформатора (см. подразд. 13.2):

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0, \quad (13.13)$$

уравнения эдс трансформатора:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1, \quad (13.14)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}'_2 + \dot{I}'_2 \underline{Z}'_2. \quad (13.15)$$

Еще одним средством, облегчающим исследование и расчет трансформаторов, является применение электрической схемы замещения приведенного трансформатора.

13.4. Схемы замещения трансформатора

Действительный приведенный трансформатор имеет схему замещения с магнитной связью, которая показана на рис. 13.2.

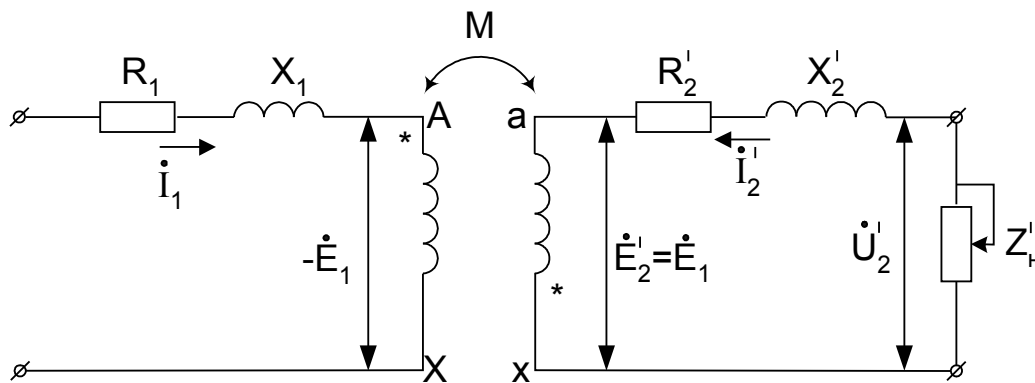


Рис. 13.2. Схема замещения приведенного трансформатора с магнитной связью

Согласно этой схеме магнитную связь можно заменить на электрическую.

Так как $\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$, то точки А и а, а также X и x на приведенном трансформаторе имеют одинаковые потенциалы, что позволяет элект-

рически соединить указанные точки, получив Т-образную схему замещения и перейти от магнитной связи обмоток к электрической (рис. 13.3).

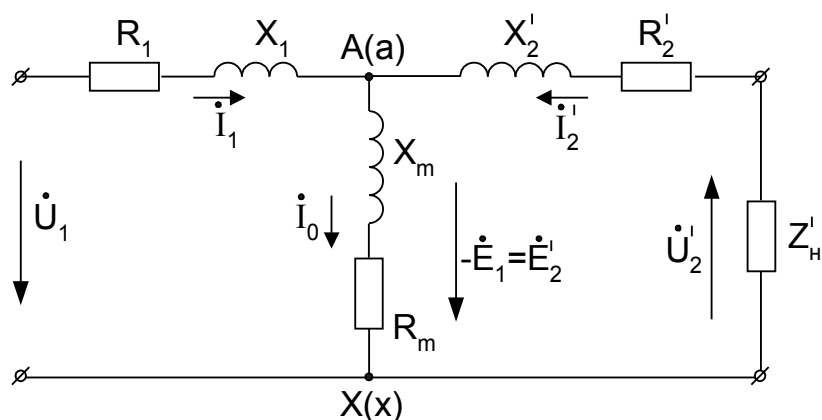


Рис. 13.3. Схема замещения приведенного трансформатора с электрической связью

Эта схема удовлетворяет уравнениям эдс и токов приведенного трансформатора [формулы (13.13)–(13.15)].

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0, \quad (13.13,a)$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 j X_1 + \dot{I}_1 R_1, \quad (13.14,a)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}'_2 + \dot{I}'_2 \underline{Z}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 j X'_2 - \dot{I}'_2 R'_2. \quad (13.15,a)$$

По схеме замещения и уравнениям приведенного трансформатора можно построить векторную диаграмму (см. подразд. 15.1).

Лекция 14

Режимы холостого хода и короткого замыкания трансформатора

План лекции

- 14.1. Параметры холостого хода трансформатора.
- 14.2. Векторная диаграмма холостого хода трансформатора.
- 14.3. Параметры режима короткого замыкания.
- 14.4. Векторная диаграмма короткого замыкания трансформатора.

14.1. Параметры холостого хода трансформатора

Режимом холостого хода трансформатора называют режим, когда вторичная обмотка трансформатора разомкнута ($Z_H \rightarrow \infty$, $I_2 = 0$), а на первичную обмотку подается номинальное напряжение $U_{1н}$.

Режим холостого хода осуществляют по схеме, приведенной на

рис. 14.1.

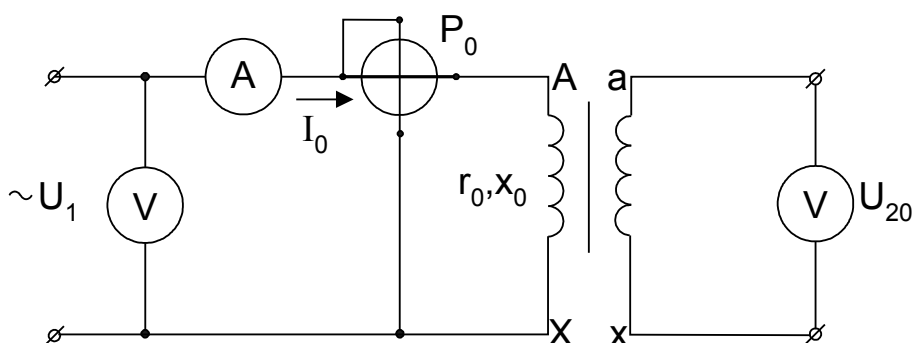


Рис. 14.1. Схема опыта холостого хода

По результатам опыта имеем параметры холостого хода:

- приложенное первичное напряжение U_1 ;
- вторичное напряжение $U_2 = E_2$;
- ток холостого хода I_0 ;
- мощность, потребляемая на холостом ходу P_0 .

Полезная мощность трансформатора $P_2 = 0$, но потребляемая мощность P_0 расходуется на магнитные потери (потери в стали $P_{ст}$ от перемагничивания сердечника) и электрические потери в первичной обмотке $P_{э1} = I_0^2 r_1$; но так как $I_0 = (2 \div 10) \%$ от $I_{1н}$, то этими потерями в обмотке можно пренебречь.

Потери мощности в стали $P_{ст}$ с изменением нагрузки остаются неизменными.

Потери холостого хода затрачиваются на потери мощности от вихревых токов, наводимых в магнитопроводе, и от перемагничивания петли гистерезиса.

По полученным данным из опыта холостого хода можно рассчитать следующие величины:

- коэффициент трансформации $K = U_1/U_2$;

– коэффициент мощности холостого хода $\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{S_0} = \frac{P_0}{U_{1H} I_0}$;

– ток холостого хода в процентах $i_0 \% = \frac{I_0}{I_{1H}} 100$;

– полное сопротивление $Z_0 = U_{1H}/I_0$.

Согласно схемы замещения трансформатора на холостом ходу (рис. 14.2)

$$r_0 = r_1 + r_M; \quad x_0 = x_1 + x_M; \quad Z_0 = Z_1 + Z_M, \quad (14.1)$$

где r_M и x_M – активная и реактивная составляющие сопротивления контура намагничивания.

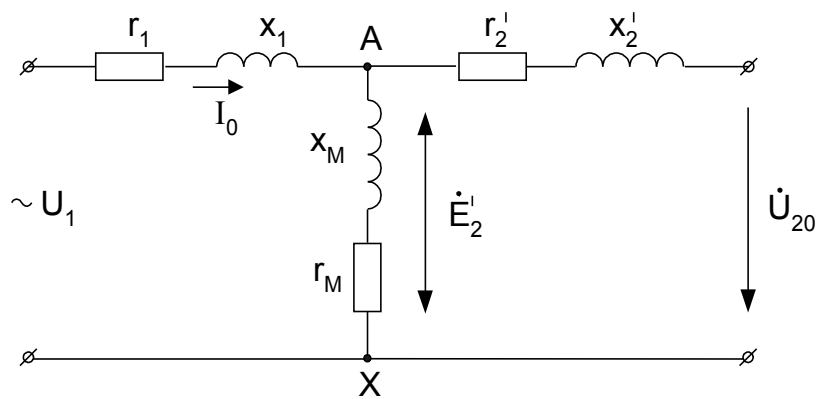


Рис. 14.2. Схема замещения приведенного трансформатора в режиме холостого хода

Величины этих составляющих определяются по следующим формулам:

$$r_0 = P_0/I_0^2; \quad x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} \quad \text{или} \quad (14.2)$$

$$r_0 = Z_0 \cos \varphi_0; \quad x_0 = Z_0 \sin \varphi_0. \quad (14.3)$$

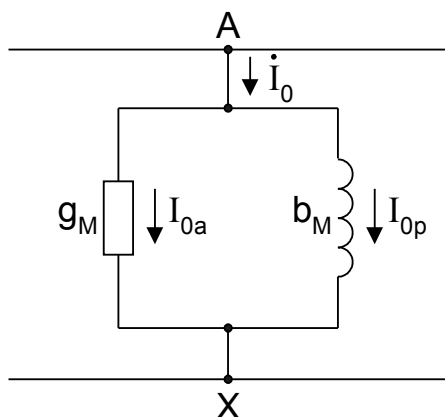


Рис. 14.3. Параллельная схема замещения контура на

Иногда последовательная схема замещения контура намагничивания заменяется на параллельную, как это показано на рис. 14.3.

Переход от одной схемы к другой эквивалентной рассматривается в курсе ТОЭ.

Активная составляющая тока холостого хода идет на покрытие потерь мощности

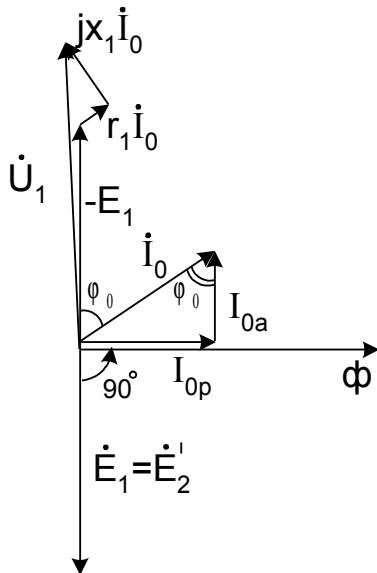
$$I_{0a} = P_0 / U_{1н}. \quad (14.4)$$

Реактивная составляющая тока холостого хода создает основной магнитный ПОТОК

$$I_{0р} = \sqrt{I_0^2 - I_{0a}^2}; \quad (14.5)$$

или $I_{0р} = I_0 \cos \varphi_0;$ $I_{0a} = I_0 \sin \varphi_0.$ (14.6)

14.2. Векторная диаграмма холостого хода трансформатора



Векторная диаграмма холостого хода трансформатора приведена на рис. 14.4.

Порядок построения диаграммы:

- проводится произвольно вектор магнитного потока Φ ;
- с ним по фазе совпадает реактивная составляющая тока $\bar{I}_{0р}$, создающая этот поток;

– под углом 90° из вершины тока $\bar{I}_{0р}$ проводится вектор $\bar{I}_{0а}$, в результате получаем $\bar{I}_0 = \bar{I}_{0р} + \bar{I}_{0а}$.

Рис. 14.4. Векторная диаграмма холостого хода трансформатора

От магнитного потока Φ эдс $\bar{E}_1 = \bar{E}_2'$ отстают на 90° , а вектор $(-\bar{E}_1)$ повернут на 180° относительно вектора \bar{E}_1 .

Чтобы выполнялось условие уравнения напряжений для первичной обмотки $\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_0 r_1 + jX_1 \bar{I}_0$, надо к вектору $(-\bar{E}_1)$ прибавить вектор падения напряжения $\bar{I}_0 r_1$, проведя его параллельно току \bar{I}_0 , и вектор $jX_1 \bar{I}_0$ под углом 90° к вектору тока \bar{I}_0 .

14.3. Параметры режима короткого замыкания

Режимом короткого замыкания трансформатора называют режим, когда вторичная обмотка замыкается накоротко ($z_n = 0$), а к первичной

подводят такое пониженное напряжение U_k , при котором токи в обмотках должны быть равными номинальным $I_{1k} = I_{1H}$; $I_{2k} = I_{2H}$. Напряжение U_k составляет всего $(5 \div 12)\%$ от номинального первичного напряжения

$$u_k \% = \frac{U_k}{U_{1H}} 100 = (5 \div 12)\% . \quad (14.7)$$

Режим короткого замыкания осуществляется по схеме, приведенной на рис. 14.5.

Из опыта короткого замыкания имеем:

- приложенное напряжение U_{1k} ($U_{2k} = 0$);
- токи в обмотках I_{1k} и I_{2k} ;
- мощность потребления в режиме короткого замыкания P_k .

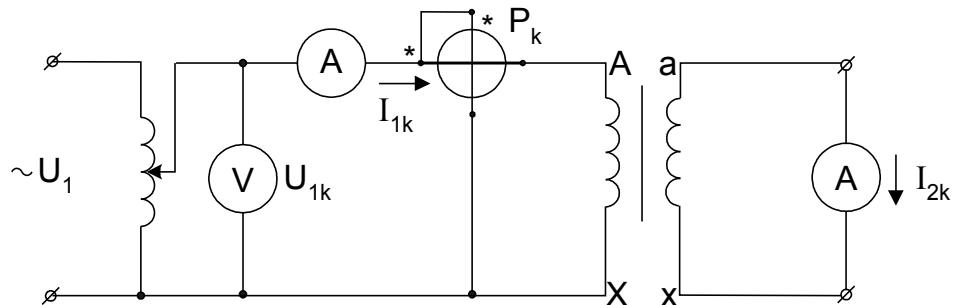


Рис. 14.5. Схема опыта короткого замыкания

Магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой, находится в прямой зависимости от приложенного напряжения. Но как было отмечено выше, напряжение U_{1k} весьма незначительно, поэтому магнитный поток очень мал, что позволяет допустить:

- ток намагничивания I_0 близок к нулю и им можно пренебречь, поэтому в схеме замещения для режима короткого замыкания (рис. 14.6) контур намагничивания отсутствует, а $I_{1k} = -I_{2k}$;
- вся мощность, потребляемая из сети, расходуется на покрытие электрических потерь (потери в меди обмоток P_M).

$$P_M = \beta^2 P_k, \quad (14.7,a)$$

где $\beta = \frac{I_1}{I_{1H}} = \frac{I_2}{I_{2H}}$ – коэффициент загрузки трансформатора;

при $\beta = 1$, $P_M = P_k$.

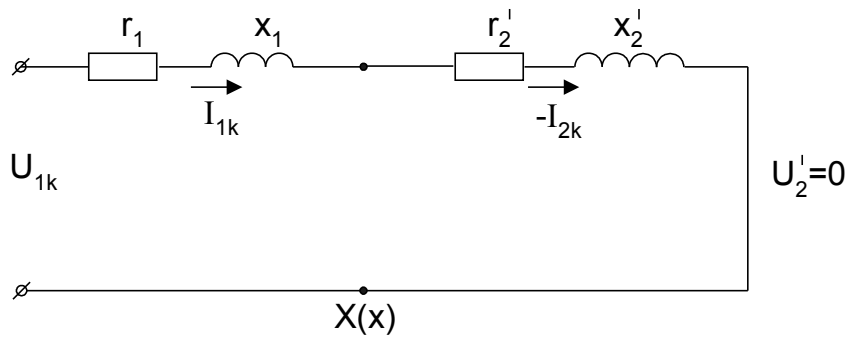


Рис. 14.6. Схема замещения приведенного трансформатора в режиме короткого замыкания

По полученным данным из опыта короткого замыкания можно рассчитать следующие величины:

- коэффициент трансформации $K = I_{2k}/I_{1k}$;
- коэффициент мощности короткого замыкания

$$\cos \varphi_K = \frac{P_k}{S_k} = \frac{P_k}{U_{1k} I_{1k}} ; \quad (14.8)$$

- напряжение короткого замыкания по формуле (14.7) в процентах;
- полное сопротивление $Z_k = U_{1k}/I_{1k}$.

Согласно схеме замещения трансформатора в режиме короткого замыкания (см. рис. 14.6)

$$\dot{U}_{1k} = \dot{I}_{1k}(r_k + jx_k) = \dot{I}_{1k}(r_1 + r_2') + j\dot{I}_{1k}(x_1 + x_2') ; \quad (14.9)$$

$$r_k = r_1 + r_2' ; \quad x_k = x_1 + x_2' ; \quad Z_k = Z_1 + Z_2' . \quad (14.10)$$

Активная и реактивная составляющие полного сопротивления короткого замыкания

$$r_k = P_k / I_{1k}^2 ; \quad x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} \quad \text{или} \quad (14.11)$$

$$r_k = Z_k \cos \varphi_k ; \quad x_k = Z_k \sin \varphi_k . \quad (14.12)$$

Напряжение короткого замыкания в процентах можно также определить по следующему выражению

$$u_k \% = \frac{Z_k I_{1k}}{U_{1H}} 100 = \frac{Z_k S_H}{U_{1H}^2} 100 . \quad (14.13)$$

Тогда активная и реактивная составляющие

$$u_{ak} \% = u_k \% \cos \varphi_k = \frac{r_k I_{1k}}{U_{1H}} 100 , \quad (14.14)$$

$$u_{pk} \% = u_k \% \sin \varphi_k = \frac{x_k I_{1k}}{U_{1H}} 100 , \quad (14.15)$$

при этом, не забывая, что $I_{1к} = I_{1н}$.

14.4. Векторная диаграмма короткого замыкания трансформатора

Векторная диаграмма короткого замыкания трансформатора приведена на рис. 14.7.

При построении векторной диаграммы должно выполняться условие (14.9).

Согласно теории приведенного трансформатора и выражениям (14.10)

$$r_1 = r'_2 = r_k/2; \quad x_1 = x'_2 = x_k/2.$$

$$\text{Тогда} \quad r_2 = r'_2/K^2; \quad x_2 = x'_2/K^2.$$

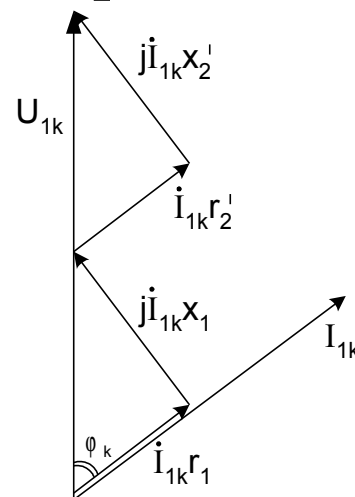


Рис. 14.7.
Векторная диаграмма короткого замыкания

Таким образом, по опытам холостого хода и короткого замыкания можно определить основные параметры трансформатора, что позволяет анализировать работу трансформатора под нагрузкой при помощи векторной диаграммы.

Лекция 15

Работа трансформатора под нагрузкой

План лекции

15.1. Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке.

15.2. Внешняя характеристика трансформатора.

15.3. Коэффициент полезного действия трансформатора.

15.1. Векторная диаграмма трансформатора

при активно-индуктивной нагрузке

Все параметры схемы замещения работающего трансформатора, за исключением Z'_H , являются постоянными величинами и могут быть определены из опытов холостого хода и короткого замыкания.

По основным уравнениям эдс и токов можно построить векторную диаграмму, которая наглядно показывает соотношения между токами, эдс и напряжениями.

Она является графическим выражением основных уравнений приведенного трансформатора.

Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке приведена на рис. 15.1.

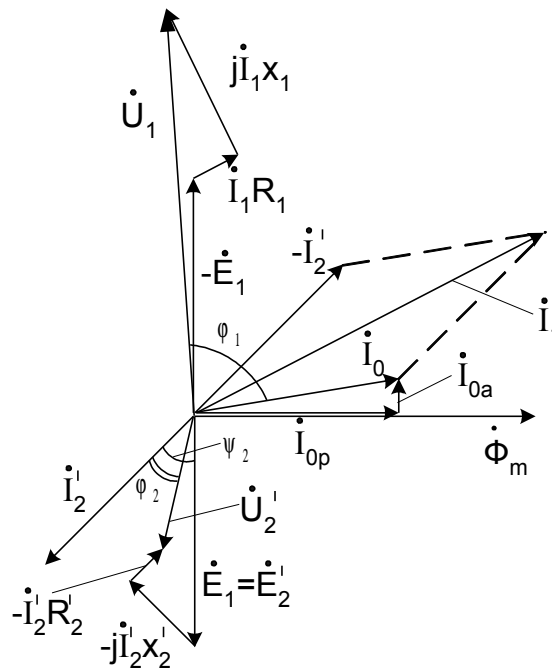


Рис. 15.1. Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке

Порядок построения векторной диаграммы:

- проводится произвольно вектор магнитного потока $\dot{\Phi}$;
- построение векторов \bar{I}_{0p} , \bar{I}_{0a} и \bar{I}_0 аналогично диаграмме холостого хода;
- эдс $\bar{E}_1 = \bar{E}'_2$ отстают на 90° от магнитного потока Φ_m ;

– определив величину тока $I'_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R'_H + R'_2)^2 + (X'_H + X'_2)^2}}$, откладываем

вектор \dot{I}'_2 под углом ψ_2 , который находим по формуле $\psi_2 = \text{arctg} \frac{X'_2 + X'_H}{R'_2 + R'_H}$;

– согласно уравнению (13.13) $\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + (-\bar{I}'_2)$ строим вектор \bar{I}_1 ;

– по формуле (13.14) $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 X_1 + \dot{I}_1 R_1$ находим вектор \dot{U}_1 ;

– по формуле (13.15) $\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2 X'_2 - \dot{I}'_2 R'_2$ получаем вектор \dot{U}'_2 .

По полученным данным можно построить внешнюю характеристику $U_2 =$

$f(I_2)$ и зависимость $\cos\varphi_1 = f(I_2)$.

В случае активно-емкостной нагрузки вид диаграммы изменится при прежнем порядке построений. Ток \dot{I}'_2 опережает эдс по фазе на угол

$$\psi_2 = \text{arctg} \frac{X'_2 + X'_H}{R'_2 + R'_H}.$$

15.2. Внешняя характеристика трансформатора

Внешней характеристикой трансформатора называют зависимость $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$, $\cos\varphi_2 = \text{const}$ (рис. 15.2).

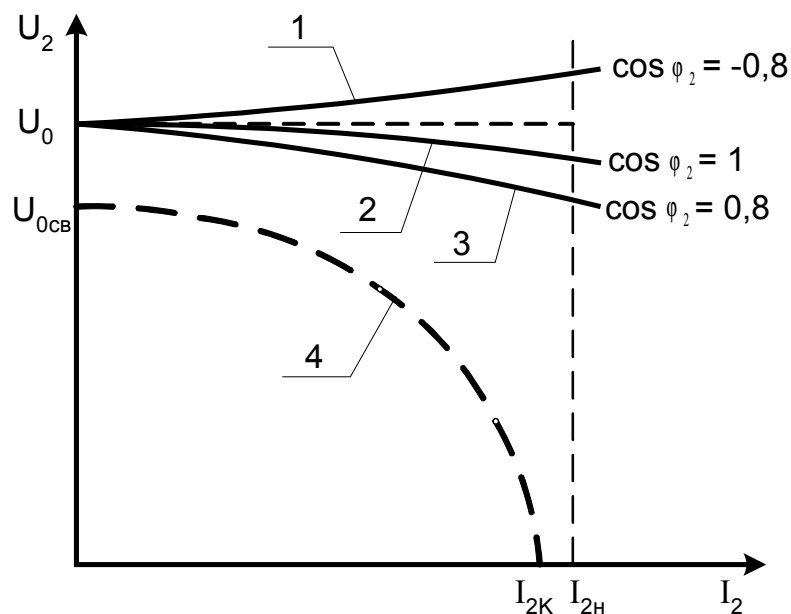


Рис. 15.2. Внешние характеристики трансформатора: 1 – нагрузка активно-емкостная; 2 – чисто активная; 3 – активно-индуктивная; 4 – внешняя характеристика сварочного трансформатора

У сварочного трансформатора $U_{0св} \approx 70$ В достаточно для зажигания дуги. При сварке $U_{св} = 0$, а $I_{2к} = I_{св} \approx 300$ А. Такая крутопадающая характеристика образуется за счет включения последовательно с вторичной обмоткой реактора (катушки с большой индуктивностью).

15.3. Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициент полезного действия трансформатора определяется по формуле

$$\eta = P_2/P_1, \quad (15.1)$$

где P_2 – мощность, отдаваемая (полезная) вторичной обмоткой; P_1 – мощность подведенная (затраченная) к первичной обмотке.

Разность между подведенной и отдаваемой мощностями является потерями мощности:

$$P_1 - P_2 = \sum P. \quad (15.2)$$

Потери мощности в трансформаторе делятся на магнитные и электрические.

Магнитные потери – это потери мощности в магнитопроводе на гистерезис и на вихревые токи.

$P_{маг} = P_{ст} = P_{г} + P_{вх} = P_0$ – потери холостого хода (постоянные, см. подразд. 14.1).

Электрические потери – это потери, связанные с нагревом обмоток трансформатора:

$P_{эл} = P_{ма} = \beta^2 P_{кн}$ – переменные потери, так как зависят от силы тока $P_{ма}$ (см. 14.7,а),

$$\beta = I_1/I_{1н} = I_2/I_{2н},$$

где β – коэффициент нагрузки.

Полезную мощность можно определить по формуле

$$P_2 = mU_2I_2 \cos \varphi_2, \quad (15.3)$$

где m – число фаз,

при $m = 1$

$$P_2 = \beta S_H \cos \varphi_2.$$

Если $P_1 = P_2 + \sum P$, то

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P},$$

подставим значения потерь мощности

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{KH}}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{KH}}. \quad (15.4)$$

Максимальное значение кпд соответствует такой нагрузке, когда магнитные потери равны электрическим потерям $P_0 = \beta^2 P_{KH}$,

откуда

$$\beta = \sqrt{P_0 / P_{KH}}. \quad (15.5)$$

Зависимость коэффициента полезного действия от коэффициента нагрузки $\eta = f(\beta)$ представлена на рис. 15.3.

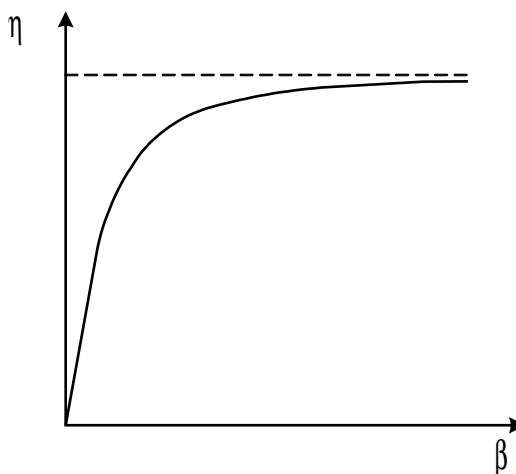


Рис. 15.3. Зависимость коэффициента полезного действия трансформатора от коэффициента нагрузки

Как правило у трансформаторов кпд очень высокий.

Лекция 16

Трёхфазные трансформаторы

План лекции

16.1. Устройство трёхфазных трансформаторов.

16.2. Группы соединения обмоток.

16.3. Параллельная работа трансформаторов.

16.4. Регулирование напряжения трансформаторов.

16.1. Устройство трехфазных трансформаторов

Преобразование (трансформирование) трехфазного напряжения можно осуществить:

– тремя однофазными трансформаторами, соединенными в одну трансформаторную группу (рис. 16.1), но она имеет *недостатки*: большую массу, высокую стоимость, но при больших мощностях $S > 60000$ кВА идут на использование группы, так как облегчается транспортировка по частям;

– трехфазными трансформаторами – обмотки на трех стержнях, их объединяют два ярма (рис. 16.2).

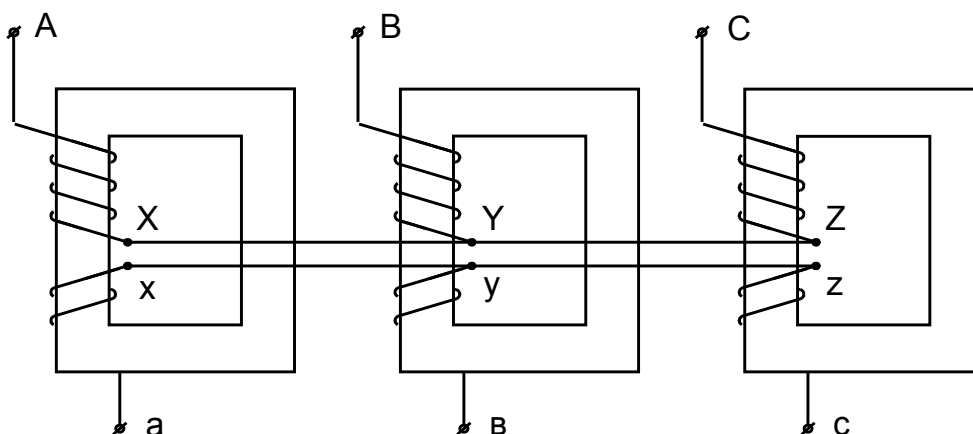


Рис. 16.1. Трехфазная трансформаторная группа

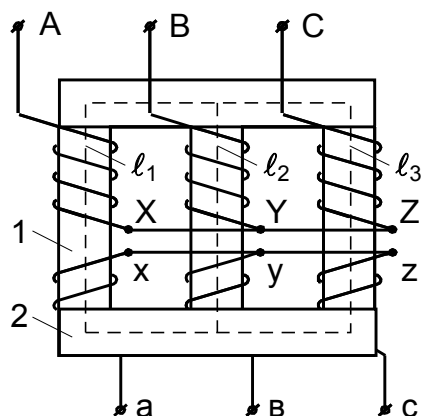


Рис. 16.2. Трехфазный трансформатор: 1 – стержень; 2 – ярмо; $l_1 = l_3 \neq l_2$ – средние длины участков

Магнитное сопротивление у трехфазного трансформатора:

$$R_M = \frac{\ell}{\mu S} \text{ при } S_1 = S_2 = S_3, \quad R_{M1} = R_{M3} > R_{M2}.$$

Такой магнитопровод является несимметричным.

При симметричной схеме трехфазного напряжения, подведенного к трансформатору, токи холостого хода образуют несимметричную систему.

Сечение ярма делают на 10÷15 % больше чем сечение стержня, что уменьшает его магнитное сопротивление.

Уравнения эдс и мдс, диаграммы, схемы замещения однофазных трансформаторов могут быть использованы для исследования работы каждой фазы трехфазного трансформатора.

16.2. Группы соединения обмоток

Ранее принималось, что E_1 и E'_2 совпадают по фазе (в схемах замещения, на векторных диаграммах). Но это не всегда выполняется, так как на угол сдвига влияют:

- направление намотки катушек;
- маркировка выводов.

Пример.

В однофазном трансформаторе угол сдвига между первичной E_1 и вторичной E_2 эдс может принимать всего 2 значения: $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 180^\circ$.

В трехфазном трансформаторе угол сдвига между эдс или напряжениями высокой и низкой сторонами может принимать значения от 0° до 360° через 30° . Поэтому сдвиг фаз между одноименными линейными эдс принято выражать группой соединений, для чего принимается ряд чисел от 0 до 11 (рис. 16.3).

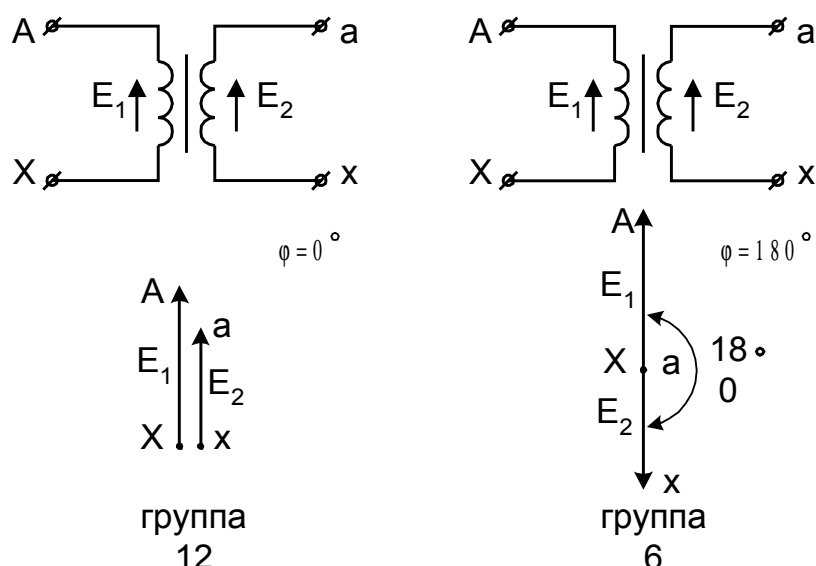


Рис. 16.3. К понятию о группах трансформаторов

Из 12 групп соединений обмоток трехфазных трансформаторов в России стандартизированы только две:

- группа 11 со сдвигом фаз 330° $Y/\Delta - 11$, $Y_0/\Delta - 11$; $Y_0/Z - 11$;
- группа 0 со сдвигом фаз 0° (360°) $Y/Y_0 - 0$.

В качестве примера определения группы соединения на рис. 16.4 приведено соединение “звезда – звезда”, а на рис. 16.5 соединение “звезда – треугольник”.

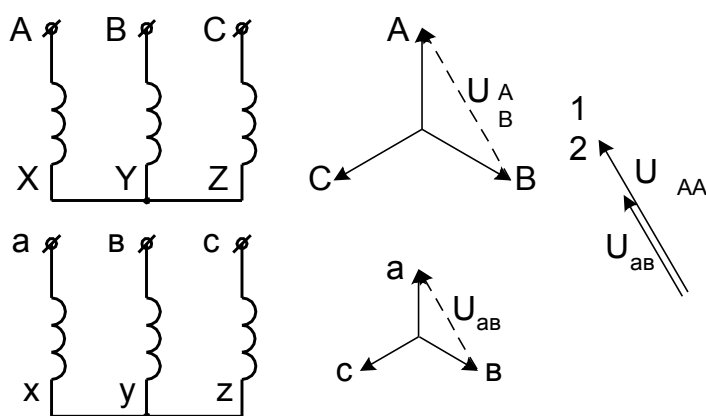


Рис. 16.4. Группа соединения обмоток – 0

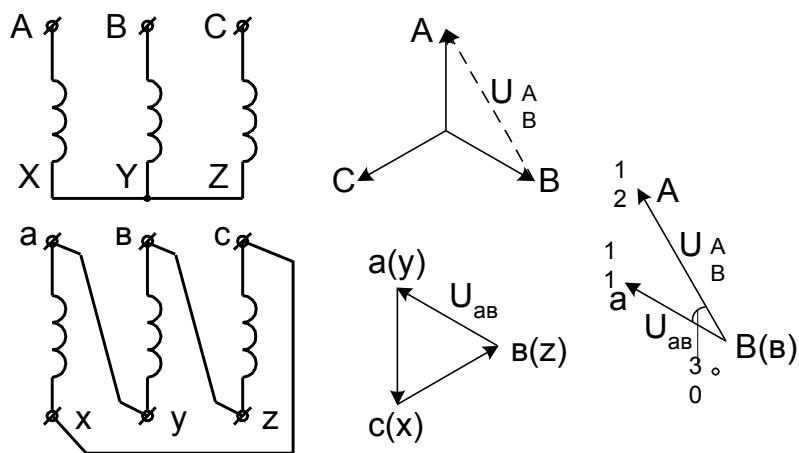


Рис. 16.5. Группа соединения обмоток – 11

16.3. Параллельная работа трансформаторов

Параллельная работа трансформаторов осуществляется при включении первичных обмоток на общую первичную сеть, а вторичных – на общую вторичную сеть.

Параллельная работа трансформаторов необходима для того, чтобы при увеличении нагрузки включать добавочные трансформаторы, при снижении нагрузки – выключать, менять при ремонте и т.д.

Трансформаторы могут быть включены на параллельную работу только при соблюдении следующих условий.

1. Трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации $K_I = K_{II} = K_{III} = \dots$, что дает одинаковые вторичные напряжения.

Если не выполнять это условие, то даже в режиме холостого хода потечет уравнительный ток

$$I_{ур} = \frac{\Delta U}{Z_I + Z_{II}}, \quad (16.1)$$

где Z_I и Z_{II} – внутренние сопротивления трансформаторов.

Под нагрузкой, если $S_{нI}$ и $S_{нII}$ равны, то трансформатор с меньшим коэффициентом трансформации $K_I < K_{II}$ оказывается перегруженным

$$(I_{нагр} + I_{ур}), \text{ а другой – недогруженным } (I_{нагр} - I_{ур}).$$

Так как перегрузка трансформаторов недопустима, то придется снижать общую нагрузку.

Государственные стандарты допускают разницу коэффициентов трансформации, не превышающую 0,5%, т.е.

$$\Delta K = \frac{K_I - K_{II}}{K} \leq \pm 0,5\%, \quad (16.2)$$

где $K = \sqrt{K_I K_{II}}$ – среднее геометрическое значение коэффициента трансформации.

2. Трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединений.

Несоблюдение этого условия ведет к тому, что вторичные эдс окажутся сдвинутыми по фазе, появится разностная эдс и также потечет уравнительный ток.

3. Трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания $U_{KI} = U_{KII} = U_{KIII} = \dots$.

Если при выполнении прочих условий два (или более) трансформатора с разными U_K включены на параллельную работу, то нагрузки S_1 и S_2 распределяются между ними обратно пропорционально U_K

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{U_{KII} S_{HI}}{U_{KI} S_{HII}}, \quad (16.3)$$

где S_{HI} и S_{HII} – мощности, на которые рассчитаны трансформаторы.

Трансформатор с меньшим U_K перегружается, значит надо снижать общую нагрузку, следовательно, один трансформатор также будет недогружен.

Государственные стандарты допускают разницу U_K на $\pm 10\%$ от их среднеарифметического значения.

4. Перед подключением необходимо проверить чередование фаз.

16.4. Регулирование напряжения трансформаторов

Напряжения в разных точках ЛЭП, где должны подключаться понижающие трансформаторы, отличаются, а вторичные напряжения должны быть одинаковые и равные $U_{2н}$. Поэтому обмотки высокого напряжения снабжаются регулировочными ответвлениями, с помощью которых можно получить коэффициент трансформации, несколько отличающийся от номинального.

Без нагрузки существуют два варианта выполнения регулировочных ответвлений (рис. 16.6 и 16.7).

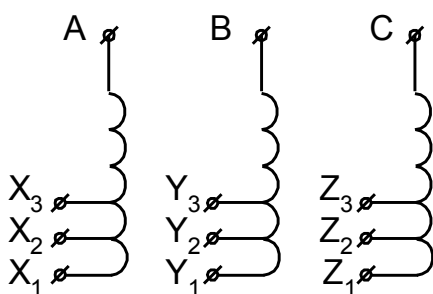


Рис. 16.6. Регулировочные ответвления
вблизи нулевой точки

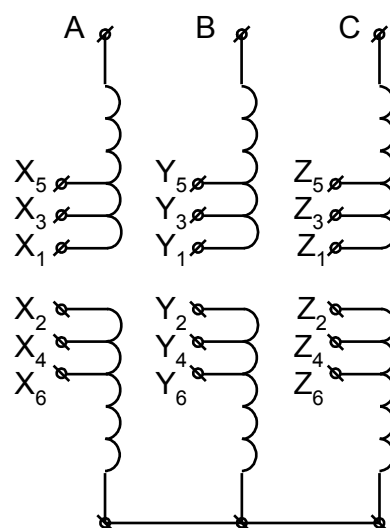


Рис. 16.7 Регулировочные ответвления
посередине обмотки

Необходимая последовательность замыканий регулировочных ответвлений для схемы рис. 16.7 приведена в табл. 16.1.

Таблица 16.1

Зависимость коэффициента трансформации
от схемы соединения ответвлений

| Коэффициент трансформации | Соединение ответвлений | | |
|---------------------------|------------------------|-------------|-------------|
| $K_n + 5\%$ | $X_2 - X_1$ | $Y_2 - Y_1$ | $Z_2 - Z_1$ |
| $K_n + 2,5\%$ | $X_3 - X_2$ | $Y_3 - Y_2$ | $Z_3 - Z_2$ |
| K_n | $X_3 - X_4$ | $Y_3 - Y_4$ | $Z_3 - Z_4$ |

| | | | |
|----------------|-------------|-------------|-------------|
| (номинальный) | | | |
| $K_H - 2,5 \%$ | $X_4 - X_5$ | $Y_4 - Y_5$ | $Z_4 - Z_5$ |
| $K_H - 5 \%$ | $X_5 - X_6$ | $Y_5 - Y_6$ | $Z_5 - Z_6$ |

Подключение выполняется с помощью штанги при полном отключении всех обмоток трансформатора.

С нагрузкой регулировку в цепи производят также при помощи регулировочных ответвлений, но переключения выполняются без разрыва электрической цепи (под нагрузкой). Такой способ применяется на некоторых типах электровозов.

Переключающее устройство в каждой фазе содержит реактор P , два контакта K_1 и K_2 , переключатель с двумя подвижными контактами Π_1 и Π_2 (рис. 16.8).

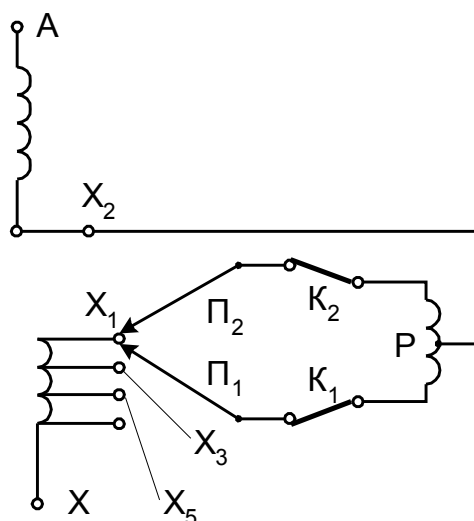


Рис. 16.8. Переключающее устройство

Порядок работы переключающего устройства приведен в табл. 16.2.

Таблица 16.2

Порядок работы переключающего устройства с реактором

| | | | | |
|---------|---------|---------|-------|-------|
| Переход | Π_2 | Π_1 | K_2 | K_1 |
|---------|---------|---------|-------|-------|

| | | | | |
|---------------------|-------|-------|----------|------|
| с X_1 на X_3 | X_1 | X_1 | Вкл | Вкл |
| | X_1 | X_1 | Вкл | Выкл |
| | X_1 | X_3 | Вкл | Вкл |
| | X_1 | X_3 | В ыкл | Вкл |
| | X_3 | X_3 | Вкл | Вкл |

Из приведенного выше следует, что при разных напряжениях на высокой стороне, с помощью ответвлений можно добиться одинакового напряжения на низкой стороне.

Заключение

В конспектах лекций "Машины постоянного тока и трансформаторы" сделана попытка изложить теорию электрических машин в сжатой, доступной пониманию студентов форме. Успешному усвоению курса должны способствовать знания таких дисциплин как "Физика", "Высшая математика", "Теоретические основы электротехники".

Знание курса электрических машин позволит успешно изучать дисциплины "Основы электропривода технологического оборудования локомотивных предприятий", "Тяговые электродвигатели" и другие специальные дисциплины.

Конспекты лекций дают базовые знания, которые студенты развивают и применяют на практике.

Ограниченное время, отведенное на чтение лекций, не позволяет охватить вопросы нетрадиционного применения электрических машин (например, использование вторичной обмотки трансформатора в качестве нагревателя жидкостной среды, сварка и плавление металлов, применение ветрогенераторов постоянного тока и др.), но творческий подход к полученным знаниям позволит студентам использовать электрические машины в соответствии с современными техническими требованиями.

Список литературы

1. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – М.: Энергия, 1978.
2. Костенко, М.П. Электрические машины. Ч. 1: Машины постоянного тока. Трансформаторы / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. – Л.: Энергия, 1972. – 543 с.
3. Кононенко, Е.В. Электрические машины (спец. курс): Учебное пособие для вузов / Е.В. Кононенко. – М.: Высшая школа, 1975. – 279 с.
4. Петров, Г.Н. Электрические машины. Ч. 1 / Г.Н. Петров. – М.: Энергия, 1974.
5. Винокуров, В.А. Электрические машины железнодорожного транспорта: Учебник для вузов/ В.А. Винокуров, Д.А. Попов. – М.: Транспорт, 1986. – 511 с.

4. Практические занятия

Темы практических занятий:

- 4.1. Электромагнитные процессы в трансформаторе при холостом ходе. – 2 ч.
- 4.2. Работа трансформатора при нагрузке. Приведенный трансформатор: схема замещения и векторная диаграмма. Экспериментальное определение параметров. – 2 ч.
- 4.3. Потери и КПД трансформатора. Изменение напряжения. – 2 ч.

- 4.4. Трехфазные трансформаторы. Схемы и группы соединения. – 2 ч.
- 4.5. Основные этапы проектирования трансформатора. – 2 ч.
- 4.6. Электромагнитные процессы в СМ при нагрузке. – 2 ч.
- 4.7. Анализ рабочих характеристик СГ. – 2 ч.
- 4.8. Параллельная работа СГ. – 2 ч.
- 4.9. СД и синхронные компенсаторы – 2 ч.

Практические занятия проводятся в аудитории и заключаются в решении задач из задачника и учебного пособия:

1. Читечян В.И. Электрические машины. Сборник задач.– М.: Высшая школа, 1988.
2. Усенко В.И., Серов А.Е., Русинов В.Л. Расчет трансформаторов: Учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос. Ун-т, 2002, 113 с.

5. Лабораторные работы

В лаборатории по электромеханике проводятся следующие лабораторные работы:

- 4.1. Исследование однофазного трансформатора – 4 ч.
- 4.2. Исследование трехфазного трансформатора– 6 ч.
- 4.3. Опытное определение группы соединения трехфазных трансформаторов – 4 ч.
- 4.4. Исследование однофазного автотрансформатора – 4 ч.
- 4.5. Исследование трехфазного СГ – 6 ч.
- 4.6. Исследование трехфазного СД – 4 ч.
- 4.7. Исследование трехфазного АД – 4 ч.
- 4.8. Исследование генератора ПТ параллельного возбуждения – 4 ч.

Технические средства для выполнения лаб. работ и пособия к ним:

1. Лабораторный стенд по исследованию однофазного трансформатора
2. Лабораторный стенд по исследованию трехфазного трансформатора
3. Лабораторный стенд по исследованию механических характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором
4. Лабораторный стенд по исследованию машины постоянного тока
5. Я.В. Кривохижа, А.С. Истомина, А.Е. Серов «Машины постоянного тока». Учебное пособие. Благовещенск, Амурский государственный университет, 2002

6. Я.В. Кривохижа, А.Е. Серов «Трансформаторы: Лабораторные работы». Учебное пособие. Благовещенск, Амурский государственный университет, 2002

7. Я.В. Кривохижа, А.Е. Серов «Электрические машины переменного тока». Учебное пособие. Благовещенск, Амурский государственный университет, 2001

6. Курсовое проектирование

1-я часть «Проектирование трансформатора» – 5 семестр

2-я часть «Проектирование гидрогенератора» – 6 семестр

Проект выполняется с использованием пособий:

Усенко В.И., Серов А.Е., Русинов В.Л. Расчет трансформаторов: Учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос. Ун-т, 2002, 113 с.

Усенко В.И., Русинов В.Л. Расчет гидрогенераторов: Учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос. Ун-т, 2004, 113 с.

Критерии оценки курсового проекта на защите:

Оценка «удовлетворительно» ставится, если студент изучил основные положения теории проектирования трансформаторов и гидрогенераторов, особенности их конструкции, методику определения основных размеров и построения эксплуатационных характеристик.

Оценка «хорошо» ставится, если студент изучил основные положения теории проектирования трансформаторов и гидрогенераторов, особенности их конструкции, методику определения основных размеров и построения эксплуатационных характеристик, выбор типа обмоток и их расчет.

Оценка «отлично» ставится, если студент изучил основные положения теории проектирования трансформаторов и гидрогенераторов, особенности их конструкции, методику определения основных размеров и построения эксплуатационных характеристик, выбор типа обмоток и их расчет, методику расчета магнитной цепи трансформаторов и выбор размеров и основных параметров обмотки возбуждения гидрогенераторов.

7. Самостоятельная работа студентов

Самостоятельная работа студентов по дисциплине предусматривается в следующих формах:

– выполнение расчетно-графической работы «Расчет параметров и построение характеристик асинхронного двигателя с помощью круговой диаграммы» (6 семестр) и курсового проекта (5 и 6 семестры) – всего 56 часа;

– выполнения заданий по темам практических занятий, подготовка отчетов по ним – 18 часов;

– предварительная подготовка к лабораторным занятиям и составление отчетов по ним – 72 часа.

Расчетно-графическая работа по электромеханике

«Расчет параметров и построение характеристик асинхронного двигателя с помощью круговой диаграммы»

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором на номинальное напряжение $U_{нл} = 380$ В и частоту $f = 50$ Гц при соединении обмотки статора в звезду имеет данные, приведенные в табл.1,2 и 3. Этими данными являются: номинальная мощность $P_{2н}$, активное сопротивление обмотки статора R_1 , индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора X_1 , приведенное активное сопротивление обмотки ротора R'_2 , приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора X'_2 , ток холостого хода I_x , потери холостого хода P_x , потери механические $P_{мех}$, число пар полюсов (табл.3). Добавочные потери $P_{доб}$ при нагрузке составляют 0,5% подводимой к двигателю мощности P_1 .

1. Рассчитать параметры Г-образной схемы замещения асинхронного двигателя и построить упрощенную круговую диаграмму. Для определения приведенного активного сопротивления ротора (R'_2) нужно воспользоваться данными табл.2.
2. По круговой диаграмме определить параметры двигателя при его работе в номинальном режиме: ток статора (фазный), приведенный ток ротора, коэффициент мощности, потребляемую активную мощность P_1 , КПД η , номинальные момент M_n и скольжение s_n . Определить перегрузочную способность двигателя в номинальном режиме работы.
3. Определить параметры двигателя при пуске: начальный пусковой ток (фазный), начальный пусковой момент, кратность пускового тока, кратность пускового момента. Построить зависимость полного входного сопротивления схемы замещения двигателя от скольжения.

Таблиц

a 1

| <i>Параметры</i> | <i>Последняя цифра шифра</i> | | | | | | | | | |
|------------------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | <i>0</i> | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> | <i>7</i> | <i>8</i> | <i>9</i> |
| $P_{2н}, кВт$ | 30 | 10 | 55 | 100 | 75 | 13 | 4 | 22 | 7,5 | 40 |
| $R_1, Ом$ | 0,15 | 0,7 | 0,1 | 0,02 | 0,05 | 0,4 | 1,4 | 0,25 | 0,85 | 0,1 |
| $X_1, Ом$ | 0,5 | 1,5 | 0,25 | 0,15 | 0,2 | 1,0 | 3,0 | 0,75 | 1,7 | 0,1 |
| $R'_2, Ом$ | 0,1k | 0,4k | 0,05k | 0,025k | 0,03k | 0,25k | 0,8k | 0,15k | 0,5k | 0,06k |
| $X'_2, Ом$ | 0,6 | 1,5 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 1,0 | 3,5 | 0,8 | 1,9 | 0,65 |
| $I_x, А$ | 20 | 7,5 | 45 | 52 | 45 | 10 | 4,5 | 15 | 7 | 42 |
| $P_x, Вт$ | 1200 | 460 | 2100 | 3300 | 2800 | 700 | 220 | 900 | 370 | 1800 |
| $P_{мех}, Вт$ | 150 | 70 | 330 | 600 | 450 | 100 | 40 | 120 | 60 | 230 |

Таблица 2

| | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------------|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| Коэффициент | Предпоследняя цифра шифра | | | | | | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| k | 0,8 | 0,7 | 0,75 | 1,0 | 1,1 | 1,5 | 1,25 | 1,3 | 1,4 | 1,2 |

Таблица 3

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Последняя цифра шифра | Предпоследняя цифра шифра | | | | | | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0, 9 | 2 | 2 | 4 | 4 | 6 | 6 | 4 | 4 | 6 | 6 |
| 2, 1 | 2 | 2 | 4 | 4 | 8 | 6 | 4 | 4 | 8 | 8 |
| 4, 7 | 2 | 2 | 6 | 6 | 2 | 2 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| 6, 3 | 2 | 2 | 4 | 4 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 8, 5 | 2 | 2 | 4 | 4 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 |

Задачи для самостоятельной работы.

1). Машины постоянного тока

Задача 1.

Генератор постоянного тока 1 с параллельным возбуждением имеет следующие паспортные данные: номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 5$ кВт; напряжение 230 В, частота вращения $n_{\text{ном}} = 1450$ об./мин.; сопротивление цепи якоря $R_{\text{я}} = 0,635$ Ом, сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 91$ Ом, магнитные и механические потери $P_{\text{х}} = 0,052$ от номинальной мощности.

Определить номинальный ток обмотки якоря, ЭДС обмотки якоря при номинальном режиме, электрические потери, суммарные потери, потребляемую (механическую) мощность, КПД при номинальном режиме работы.

Решение:

1. Для определения номинального тока якоря найдем номинальный ток генератора и ток обмотки возбуждения

Номинальный ток генератора определим из соотношения:

$$P_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} * I_{\text{ном}}$$

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / U_{\text{ном}} = 5000 / 230 = 21,74 \text{ А}$$

Ток обмотки возбуждения

$$I_{\text{в}} = U_{\text{ном}} / R_{\text{в}} = 230 / 91 = 2,52 \text{ А}$$

Ток в цепи якоря в соответствии с законом Кирхгофа равен сумме токов в цепи нагрузки и обмотки возбуждения

$$I_{\text{я}} = I_{\text{ном}} + I_{\text{в}} = 21,74 + 2,52 = 24,26 \text{ А}$$

ЭДС обмотки якоря при номинальном режиме

$$E = U_{\text{ном}} + I_{\text{я}} * R_{\text{я}} = 230 + 21,26 * 0,635 = 245,4 \text{ В}$$

Электрические потери в обмотках якоря

$$\Delta P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 * R_{\text{я}} = 24,26^2 * 0,635 = 373,7 \text{ Вт}$$

Электрические потери в обмотках возбуждения

$$\Delta P_{\text{в}} = I_{\text{в}}^2 * R_{\text{в}} = 2,52^2 * 91 = 577,8 \text{ Вт}$$

Магнитные и механические потери

$$\Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{мх}} = 0,052 * P_{\text{ном}} = 0,052 * 5000 = 260 \text{ Вт}$$

Суммарные потери при номинальном режиме

$$\sum \Delta P = \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{мх}} = 373,7 + 577,8 + 260 = 1211,5 \text{ Вт}$$

Потребляемая мощность

$$P_1 = P_{\text{ном}} + \sum \Delta P = 5000 + 1211,5 = 6211,5 \text{ Вт}$$

КПД при номинальном режиме работы

$$\eta = P_{\text{ном}} / P_1 = 5000 / 6211,5 = 0,805$$

Задача 2.

Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением имеет следующие паспортные данные:

| | |
|-------------------------------|---|
| число пар полюсов | $p = 2;$ |
| число витков обмотки якоря | $w = 124;$ |
| число пар параллельных ветвей | $a = 2;$ |
| сопротивление обмотки якоря | $R_{\text{я}} = 0,04 \text{ Ом};$ |
| ток обмотки возбуждения | $I_{\text{в}} = 2,0 \text{ А};$ |
| скорость вращения | $n_{\text{ном}} = 2850 \text{ об./мин.};$ |
| ЭДС в номинальном режиме | $E_{\text{ном}} = 234,4 \text{ В};$ |

номинальный ток
КПД

$$I_{\text{ном}} = 108 \text{ A};$$
$$\eta = 89 \text{ \%}.$$

Определить: электромагнитный тормозной момент; мощности (электромагнитную, потребляемую и на выходах генератора, суммарные потери, потери электрические, добавочные, механические, магнитные); напряжение при холостом ходе генератора.

Решение:

1. Для определения электромагнитного момента найдем постоянные двигателя, магнитный поток и электромагнитный тормозной момент.

1.1. Электрическая постоянная машины

$$c_e = p \cdot N / (60 \cdot a) = p \cdot (2 \cdot w) / (60 \cdot a) = 2 \cdot 2 \cdot 124 / (60 \cdot 2) = 4,13$$

$$c_m = c_e \cdot 9,55 = 4,13 \cdot 9,55 = 39,47$$

1.2. Магнитный поток генератора определим из соотношения для ЭДС обмоток якоря

$$E_{\text{я}} = c_e \cdot \Phi \cdot n$$

откуда

$$\Phi = E_{\text{ном}} / (c_e \cdot n) = 234,4 / (4,13 \cdot 2850) = 0,02 \text{ Вб}$$

$$M = c_m \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} = 39,47 \cdot 0,02 \cdot 110,7 = 87,34 \text{ Н*м}$$

1.3. Ток в цепи якоря

$$I_{\text{я}} = I_{\text{ном}} + I_{\text{в}} = 108,7 + 2 = 110,7 \text{ A}$$

1.4. Электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = E_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}} = 234,4 \cdot 110,7 = 25951 \text{ Вт}$$

1.5. Напряжение на зажимах генератора при номинальном режиме

$$U_{\text{ном}} = E_{\text{я}} - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} = 234,4 - 110,7 \cdot 0,04 = 230 \text{ В}$$

1.6. Мощность потребляемая генератором

$$P_1 = P_{\text{ном}} / \eta = 25000 / 0,89 = 28090 \text{ Вт}$$

1.7. Сумма потерь при номинальной нагрузке

$$\sum \Delta P = P_1 - P_{\text{ном}} = 28090 - 25000 = 3090 \text{ Вт}$$

1.8. Электрические потери в обмотках якоря и возбуждения

$$P_3 = P_{\text{я}} + P_{\text{эв}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + I_{\text{в}} U_{\text{ном}} = 108,7^2 * 0,04 + 2 * 230 = 932 \text{ Вт}$$

1.9. Добавочные потери в соответствии с ГОСТом определяются в количестве 1% от номинальной мощности

$$\Delta P_{\text{д}} = 0,01 * P_{\text{ном}} = 0,01 * 25000 = 250 \text{ Вт}$$

1.10. Механические и магнитные потери

$$\Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{мх}} = \sum \Delta P - (\Delta P_3 + \Delta P_{\text{д}}) = 3090 - (932 + 250) = 2808 \text{ Вт}$$

2. Напряжение при холостом ходе генератора

$$U_{\text{хх}} = E - I_{\text{в}} R_{\text{я}} = 234,4 - 2 * 0,04 = 234,32 \text{ В}$$

так как нагрузочный ток представляет собой ток обмотки возбуждения.

Задача 3.

Двухполюсный генератор постоянного тока с параллельным возбуждением имеет: сопротивление цепи якоря $R_{\text{я}} = 0,155 \text{ Ом}$; одну пару параллельных ветвей; $N = 500$ активных проводников; магнитный поток $\Phi = 1,97 * 10^{-2} \text{ Вб}$; частоту вращения якоря $n_{\text{ном}} = 1450 \text{ об./мин}$. При номинальном токе в цепи нагрузки $I_{\text{ном}} = 50 \text{ А}$ и токе возбуждения $I_{\text{в}} = 1,7 \text{ А}$ КПД $\eta = 0,89$.

Определить напряжение на зажимах генератора при номинальной нагрузке. Электромагнитный момент, подводимую к генератору мощность при номинальной нагрузке и сумму потерь.

Решение:

ЭДС, генерируемая в обмотке якоря при номинальной частоте вращения:

$$E = c_e * \Phi * n_{\text{ном}} = P * N / (60 * a) * \Phi * n_{\text{ном}} = 1 * 500 * 0,0197 * 1450 / (60 * 1) = 238 \text{ В}$$

Ток в цепи якоря

$$I_{\text{я}} = I_{\text{ном}} + I_{\text{в}} = 50 + 1,7 = 51,7 \text{ А}$$

Напряжение на зажимах генератора при номинальной нагрузке

$$U = E - I_{\text{я}} * R_{\text{я}} = 238 - 51,7 * 0,14 = 230 \text{ В}$$

Электромагнитный тормозной момент

$$M = c_m * \Phi * I_{\text{я}} = P * N / (2 * \pi * a) * I_{\text{я}} = 1 * 500 * 0,0197 * 51,7 / (2 * 3,14 * 1) = 81 \text{ Н*м}$$

Полезная мощность, отдаваемая генератором в цепь

$$P_{2\text{ном}} = U_{\text{ном}} * I_{\text{ном}} = 230 * 50 = 11500 \text{ Вт}$$

Мощность, подводимая к генератору для его вращения при номинальной нагрузке

$$P_{1\text{ном}} = P_{2\text{ном}} / \eta = 11500 / 0,89 = 13259 \text{ Вт}$$

Сумма потерь при номинальной нагрузке

$$\sum \Delta P = P_{1\text{ном}} - P_{2\text{ном}} = 13259 - 11500 = 2029 \text{ Вт}$$

Задача 4.

Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением подключен к сети с напряжением 110 В и потребляет ток $I_{\text{ном}} = 50,5 \text{ А}$. Сопротивление обмотки якоря и добавочных полюсов $R_{\text{я}} = 0,21 \text{ Ом}$; сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 62 \text{ Ом}$, номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 1000 \text{ об./мин.}$; КПД $\eta = 81 \%$. Определить: сумму потерь, электрические потери, дополнительные, механические и магнитные потери; ток при максимальном КПД, максимальный КПД.

Решение:

1. Мощность, потребляемая двигателем при номинальной нагрузке

$$P_1 = U_{\text{ном}} * I_{\text{ном}} = 110 * 50,5 = 5555 \text{ Вт}$$

2. Номинальная мощность на валу двигателя

$$P_{\text{ном}} = \eta * P_1 = 0,81 * 5555 = 4500 \text{ Вт}$$

3. Сумма потерь при номинальной нагрузке

$$\sum \Delta P = P_1 - P_{\text{ном}} = 5555 - 4500 = 1055 \text{ Вт}$$

4. Ток обмотки возбуждения

$$I_B = U_{\text{НОМ}}/R_B = 110/62 = 1,77 \text{ А}$$

5. Ток в обмотке якоря

$$I_A = I_{\text{НОМ}} - I_B = 50,5 - 1,77 = 48,73 \text{ А}$$

6. Электрические потери в цепи якоря и обмотке возбуждения при номинальной нагрузке

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma A} + \Delta P_{\Sigma B} = I_A^2 R_A + I_B^2 R_B = 48,73^2 * 0,21 + 1,77^2 * 62 = 693 \text{ Вт}$$

7. Добавочные потери составляют 1% от номинальной мощности

$$\Delta P_d = 0,01 P_{\text{НОМ}} = 0,01 * 4500 = 45 \text{ Вт}$$

8. Механические и магнитные потери

$$\Delta P_M + \Delta P_{\text{МХ}} = \sum \Delta P - (\Delta P_{\Sigma} + \Delta P_d) = 1055 - (693 + 45) = 317 \text{ Вт}$$

9. Условием максимального КПД является равенство постоянных и переменных потерь

$$I_1^2 * R_A = P_x + I_B^2 * R_B$$

откуда ток в цепи нагрузки при максимальном КПД

$$I_1 = [(P_x + I_B^2 * R_B) / R_A]^{-0,5} = [(317 + 45 + 1,77^2 * 62) / 0,21]^{-0,5} = 51,5 \text{ А}$$

максимальный КПД

$$\eta = 1 - \sum \Delta P / [U * (I_1 + I_B)] = 1 - (2 * 317 + 45) / [110 * (51,5 + 1,77)] = 0,884$$

Задача 5.

Найти магнитный поток четырех полюсной машины постоянного тока, соответствующей первой гармонической индукции в зазоре $B_{\text{лмб}} = 0,8 \text{ Тл}$, если расчетная длина якоря $L_6 = 0,15 \text{ м}$, диаметр якоря $D_A = 0,3 \text{ м}$.

Решение:

$$\Phi = \int_0^l B_\sigma * L_\sigma * d_x - \text{магнитный поток на один полюс}$$

$$\Phi = 0,8 * 0,15 * 0,3 = 0,036 - \text{на один полюс}$$

$$\Phi = 0,036 / 2 = 0,018 - \text{на два полюса}$$

Задача 6.

В четырех полюсной машине постоянного тока с простой петлевой обмоткой общее число эффективных проводников $N = 168$. Определить число витков в параллельной ветви обмотки якоря.

Решение:

$$w_{\text{я}} = N / (2 * p) = 168 / 8 = 21$$

Задача 7.

Четырех полюсный двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением работает от сети с напряжением $U = 220$ В и потребляет ток $I_{\text{ном}} = 102$ А. Число проводников в обмотке якоря $N = 600$, число пар параллельных ветвей $a = 2$, магнитный поток $\Phi = 1,4 * 10^{-2}$ Вб, сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0,1$ Ом, ток обмотки возбуждения $I_{\text{в}} = 2$ А.

Определить:

1. ЭДС обмоток якоря
2. номинальную частоту вращения
3. номинальный вращающий момент
4. КПД
5. сопротивление пускового реостата при пусковом токе $I_{\text{п}} = 3 * I_{\text{ном}}$
6. пусковой ток при отсутствии пускового реостата.

Решение:

1. ЭДС обмоток якоря в номинальном режиме

$$1.1. E_{\text{я}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{я}} * R_{\text{я}} = 220 - 100 * 0,1 = 210 \text{ В}$$

$$1.2. I_{\text{я}} = I_{\text{ном}} - I_{\text{в}} = 102 - 2 = 100 \text{ А}$$

2. Номинальная частота вращения якоря

$$2.1. n_{\text{ном}} = E / (c_e * \Phi) = 210 / (10 * 1,4 * 10^{-2}) = 1500 \text{ об./мин.}$$

$$2.2. c_e = P * N / (60 * a) = 2 * 600 / (60 * 2) = 10$$

3. Номинальный вращающий момент

$$3.1. c_m = 9,55 * c_e = 9,55 * 10 = 95,5$$

$$3.2. M_{\text{ном}} = c_m * \Phi * I_{\text{я}} = 95,5 * 1,4 * 10^{-2} * 100 = 133,7 \text{ Н*м}$$

4. Номинальная мощность на валу двигателя определяется из соотношения

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 * P_{\text{НОМ}} / n_{\text{НОМ}}$$

4.1. $P_{\text{НОМ}} = M_{\text{НОМ}} * n_{\text{НОМ}} / 9,55 = 133,7 * 1500 / 9,55 = 21000 \text{ Вт}$

4.2. Потребляемая мощность

$$P_1 = U_{\text{НОМ}} * I_{\text{НОМ}} = 220 * 102 = 22440 \text{ Вт}$$

4.3. КПД при номинальной нагрузке

$$\eta = P_2 / P_1 = 21000 / 22440 = 0,935$$

5. Сопротивление пускового реостата при условии понижения пускового тока трехкратного значения

$$I_{\text{я}} = U_{\text{НОМ}} / (R_{\text{я}} + R_{\text{р}})$$

откуда

$$R_{\text{р}} = U_{\text{НОМ}} / (3 * I_{\text{НОМ}}) - R_{\text{я}} = 220 / (3 * 100) - 0,1 = 0,63 \text{ Ом}$$

6. Пусковой ток при отсутствии пускового реостата

$$I_{\text{яп}} = U_{\text{НОМ}} / R_{\text{я}} = 220 / 0,1 = 22000 \text{ А}$$

Задача 8.

На табличке-паспорте двигателя постоянного тока указаны следующие паспортные данные:

| | |
|--------------------------------|--|
| тип двигателя – | П 22; |
| номинальный режим работы – | продолжительный; |
| номинальная мощность – | $P_{\text{НОМ}} = 1 \text{ кВт}$; |
| номинальное напряжение – | $U_{\text{НОМ}} = 110 \text{ В}$; |
| номинальная частота вращения – | $n_{\text{НОМ}} = 1500 \text{ об./мин.}$; |
| система возбуждения – | параллельная; |
| КПД – | $\eta = 0,76$. |

Дополнительные данные:

| | |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| сопротивление цепи обмотки якоря – | $R_{\text{я}} = 0,88 \text{ Ом}$; |
| сопротивление обмотки возбуждения – | $R_{\text{в}} = 166 \text{ Ом}$; |

Определить:

1. Номинальный вращающий момент
2. Мощность, потребляемую двигателем из сети
3. Потребляемый ток
4. Ток в обмотках якоря и обмотке возбуждения

5. Ток в обмотке якоря при коротком замыкании (при пуске)
6. Пусковой ток и сопротивление пускового реостата при условии $I_{\Pi} = 2,5 \cdot I_{\text{ном}}$
7. Потери при холостом ходе
8. Ток двигателя при холостом ходе

Решение:

1. Номинальный вращающий момент

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 1000 / 1500 = 6,36 \text{ Н*м}$$

2. Мощность, потребляемая двигателем из сети при номинальной нагрузке

$$P_1 = P_{\text{ном}} / \eta = 1000 / 0,76 = 1315 \text{ Вт}$$

3. Потребляемый ток в номинальном режиме

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / U_{\text{ном}} = 1315 / 110 = 12 \text{ А}$$

4. Токи в обмотках якоря и возбуждения при номинальном режиме

$$I_{\text{в}} = U_{\text{ном}} / R_{\text{в}} = 110 / 166 = 0,66 \text{ А}$$

$$I_{\text{я}} = I_{\text{ном}} - I_{\text{в}} = 12 - 0,66 = 11,34 \text{ А}$$

5. Ток якоря при коротком замыкании (при отключенной обмотки возбуждения или в момент пуска при отключенном пусковом реостате)

$$I_{\text{к}} = U_{\text{ном}} / R_{\text{я}} = 110 / 0,88 = 125 \text{ А}$$

6. Пусковой ток при условии $I_{\Pi} = 2,5 \cdot I_{\text{ном}}$

$$I_{\Pi} = 2,5 \cdot I_{\text{ном}} = 2,5 \cdot 12 = 30 \text{ А}$$

7. Сопротивление пускового реостата при условии $I_{\Pi} = 2,5 \cdot I_{\text{ном}}$

$$R_{\Pi} = U_{\text{ном}} / I_{\Pi} - R_{\text{я}} = 110 / 30 - 0,88 = 2,78 \text{ Ом}$$

8. Сумма потерь двигателя

$$\sum \Delta P = P_1 - P_{\text{ном}} = 1315 - 1000 = 315 \text{ Вт}$$

9. Потери электрические

$$P_3 = P_{\text{эя}} + P_{\text{эв}} = I^2 R_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}} = 11,34^2 * 0,88 + 0,66^2 * 166 = 185,4 \text{ Вт}$$

10. Потери магнитные и механические

$$P_{\text{м}} + P_{\text{мх}} = \sum \Delta P - P_3 = 315 - 185,4 = 129,4 \text{ Вт}$$

Так как мощность, потребляемая двигателем при холостом ходе равна потерям в стали, в цепи возбуждения и механическим потерям, то

$$I_{\text{хх}} = I_{\text{в}} + (P_{\text{м}} + P_{\text{мех}})/U_{\text{ном}} = 0,66 + 129,4/110 = 1,8 \text{ А}$$

Задача 9.

Определить частоту вращения двигателя постоянного тока П12 при холостом ходе и номинальной нагрузке, если известно, что регулирование производилось за счет изменения сопротивления в цепи возбуждения и магнитный поток имел три значения:

$$1. \Phi_{\text{ном}}; \quad 2. \Phi_1 = 0,8 * \Phi_{\text{ном}}; \quad 3. \Phi_2 = 0,5 * \Phi_{\text{ном}}.$$

Паспортные данные двигателя:

$$P_{\text{ном}} = 1 \text{ кВт}$$

$$U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$$

$$n_{\text{ном}} = 3000 \text{ об./мин.}$$

$$I_{\text{яном}} = 5,6 \text{ А}$$

$$R_{\text{я}} = 2,0 \text{ Ом}$$

Решение:

1. Определение частоты вращения двигателя при холостом ходе и номинальном магнитном потоке

$$n_{\text{х}} = n_{\text{ном}} * U_{\text{ном}} / (U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} * R_{\text{я}}) = 3000 * 220 / (220 - 5,6 * 2) = 3160 \text{ об./мин.}$$

2. Частота вращения и магнитные потоки связаны соотношением

$$n_{1\text{х}}/n_{\text{х}} = \Phi_{\text{ном}}/\Phi_1$$

Частота вращения при холостом ходе и пониженном магнитном потоке
 $\Phi_1 = 0,8 * \Phi_{\text{ном}}$

$$n_{1\text{х}} = n_{\text{х}} * \Phi_{\text{ном}}/\Phi_1 = 3160 * 1/0,8 = 3950 \text{ об./мин.}$$

Частота вращения при холостом ходе и пониженном магнитном потоке
 $\Phi_2 = 0,5 * \Phi_{\text{ном}}$

$$n_{2x} = n_x * \Phi_{ном} / \Phi_2 = 3160 * 1/0,5 = 6320 \text{ об./мин.}$$

3. Для определения частоты вращения при номинальном моменте и пониженном магнитном потоке необходимо определить перепад частоты вращения между холостым ходом и номинальной нагрузкой

$$\Delta n_1 = (n_x - n_{ном}) * (\Phi_{ном} / \Phi_1)^2 = (3160 - 3000) * (1/0,8)^2 = 250 \text{ об./мин.}$$

$$\Delta n_2 = (n_x - n_{ном}) * (\Phi_{ном} / \Phi_2)^2 = (3160 - 3000) * (1/0,5)^2 = 640 \text{ об./мин.}$$

Частота вращения при номинальном моменте и магнитном потоке $\Phi_1 = 0,8 * \Phi_{ном}$

$$n_{1ном} = n_{1x} - \Delta n_1 = 3950 - 250 = 3700 \text{ об./мин.}$$

то же при магнитном потоке $\Phi_2 = 0,5 * \Phi_{ном}$

$$n_{2ном} = n_{2x} - \Delta n_2 = 6320 - 640 = 5680 \text{ об./мин.}$$

Задача 10.

Генератор постоянного тока с независимым возбуждением должен использоваться в системе генератор-двигатель для регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока П12. Используя данные предыдущей задачи, выбрать генератор для регулирования частоты вращения двигателя П12. Определить пределы регулирования частоты вращения от максимального до минимального значения при холостом ходе и номинальном вращающем моменте.

Решение:

Для выбора генератора постоянного тока, используемого в системе генератор-двигатель, необходимо учесть, что номинальная мощность генератора должна быть равна или превышать потребляемую мощность двигателя с учетом возможных перегрузок.

1. Потребляемая мощность двигателя П12

$$P_1 = U_{ном} * I_{ном} = 220 * 5,6 = 1232 \text{ А}$$

Выбираем генератор мощностью не менее 1,3 КВт напряжением 230 В с номинальным током не менее 6 А. Этим данным соответствует генератор типа П22, имеющий следующие паспортные данные:

$$P_{ном} = 1,6 \text{ Квт};$$

$$U_{ном} = 230 \text{ В};$$

$$I_{ном} = 7 \text{ А};$$

$$n_{ном} = 2850 \text{ об./мин.}$$

$$\eta = 83,5 \%$$

$$R_{яг} = 1,55 \text{ Ом}$$

2. Определим общее сопротивление цепи якоря двигателя и генератора (обмотки якоря генератора и двигателя включены последовательно)

$$R_{общ} = R_{ядв} + R_{яг} = 2,0 + 1,55 = 3,55 \text{ Ом}$$

3. ЭДС генератора в номинальном режиме

$$E_g = U_{гном} + I_{гя} * R_{яг} = 230 + 7 * 1,55 = 240,85 \text{ В}$$

4. Напряжение на выходе генератора при номинальной нагрузке двигателя

$$U_g = E - I_{ядв} * R_{общ} = 240 - 5,6 * 3,55 = 220,97 \text{ В}$$

Что соответствует номинальному режиму двигателя

5. Определение частоты вращения двигателя

$$c_e * \Phi = E / n_{ном} = (U_{ном} - I_{ном} * R_{ядв}) / n_{ном} = (220 - 5,6 * 2,0) / 3000 = 0,0694$$

Вб

максимальная частота вращения двигателя при холостом ходе

$$n_x = E_1 / (c_e * \Phi) = 240,85 / 0,0694 = 3458 \text{ об./мин.}$$

Минимальная частота вращения двигателя при холостом ходе определяется по минимальному значению ЭДС генератора, при котором двигатель приходит во вращение. Пусть пуск двигателя происходит при полутора кратном значении номинального тока.

$$E_{гmin} = 1,5 * I_{ядв} * R_{общ} = 1,5 * 5,6 * 3,55 = 29,8 \text{ В}$$

Минимальная частота вращения при холостом ходе

$$n_{min} = E_{min} / (c_e * \Phi) = 29,8 / 0,0694 = 429,6 \text{ об./мин.}$$

При номинальном моменте

$$n_{min} = (E_{гmin} - I_{ядв} * R_{общ}) / (c_e * \Phi) = (29,8 - 5,6 * 3,55) / 0,0694 = 142,9 \text{ об./мин.}$$

Следовательно, при изменении напряжения на выходе генератора частота вращения двигателя:

– при холостом ходе меняется от 3488 до 452 об./мин,

– при номинальном моменте от 3000 до 142,9 об./мин.

6. Выходная мощность генератора при номинальной нагрузке двигателя

$$P_{\text{ГВЫХ}} = U_{\text{Г}} * I_{\text{ЯДВ}} = 220,97 * 5,6 = 1237,4 \text{ Вт}$$

7. Мощность, потребляемая генератором при номинальном режиме двигателя

$$P_{\text{ГНОМ}} = P_{\text{ГВЫХ}} / \eta = 1237,4 / 0,835 = 1481,9 \text{ Вт}$$

8. Для определения мощности двигателя, который приводит во вращение генератор, необходимо учесть возможные перегрузки (~30 %)

$$P_{1\text{Г}} = P_2 / \eta = U_{\text{НОМ}} * 1,3 * I_{\text{ЯДВ}} / \eta = 220,97 * 1,3 * 5,6 / 0,835 = 1926,5 \text{ Вт}$$

Задача 11.

Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением включен в сеть с напряжением $U = 220 \text{ В}$ и при номинальном вращающем моменте $M_{\text{НОМ}} = 101,7 \text{ Н*м}$ развивает частоту вращения $n_{\text{НОМ}} = 750 \text{ об./мин.}$; КПД двигателя $\eta = 75 \%$. Сопротивления:

| | |
|---------------------|-------------------------------------|
| Обмотки якоря | $R_{\text{я}} = 0,0443 \text{ Ом};$ |
| Обмотки возбуждения | $R_{\text{в}} = 0,197 \text{ Ом};$ |
| Пускового реостата | $R_{\text{п}} = 1,17 \text{ Ом}.$ |

Определить: номинальную, потребляемую и электромагнитную мощность; вращающий момент при пуске, если соответствующее увеличение тока приводит к увеличению магнитного потока в 1,2 раза.

Решение:

1. Номинальная мощность находится из уравнения

$$M = 9,55 * P / n$$

откуда

$$P_{\text{НОМ}} = M_{\text{НОМ}} * n_{\text{НОМ}} / 9,55 = 101,7 * 750 / 9,55 = 8000 \text{ Вт}$$

Потребляемая мощность

$$P_1 = P_{\text{НОМ}} / \eta = 10666 \text{ Вт}$$

2. Ток в якоре двигателя последовательного возбуждения равен току в цепи возбуждения и потребляемому току

$$I_1 = I_{\text{я}} = I_{\text{в}} = P_1 / U_{\text{НОМ}} = 10666 / 220 = 48,5 \text{ А}$$

ЭДС обмоток якоря

$$E_{\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}} - I_{\text{я}} * (R_{\text{я}} + R_{\text{в}}) = 220 - 48,5(0,443 + 0,197) = 189 \text{ В}$$

Электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = E_{\text{я}} * I_{\text{я}} = 189 * 48,5 = 9166 \text{ Вт}$$

Пусковой ток

$$I_{\text{п}} = U_{\text{НОМ}} / (R_{\text{я}} + R_{\text{в}} + R_{\text{п}}) = 220 / (0,443 + 0,197 + 1,17) = 121,5 \text{ А}$$

Кратность пускового тока

$$k_1 = I_{\text{п}} / I_{\text{НОМ}} = 121,5 / 48,5 = 2,5$$

вращающий момент при пуске с возрастанием тока в 2,5 раза приводит к увеличению магнитного потока в 1,2 раза

$$M_{\text{п}} = c_m * 1,22\Phi * 2,5 * I_{\text{я}} = 3 * 101,7 = 305 \text{ Н*м}$$

Задача 12.

Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением работает при напряжении на зажимах $U = 110 \text{ В}$ и токе $I_{\text{НОМ}} = 24 \text{ А}$. якорь двигателя вращается с частотой $n_{\text{НОМ}} = 1500 \text{ об./мин.}$ и развивает на валу вращающий момент $M = 14,0 \text{ Н*м}$. Общее сопротивление обмоток якоря и возбуждения $R_{\text{общ}} = 0,35 \text{ ом}$. Определить электромагнитную, полезную и потребляемую мощности, электрические, магнитные и механические потери. Как изменится потребляемый ток, магнитный поток, частота вращения, потребляемая мощность, КПД при понижении подводимого напряжения до 90 В и при неизменном вращающем моменте на валу.

Решение:

1. ЭДС обмотки якоря

$$E_{\text{я}} = U - I_{\text{я}} * R_{\text{общ}} = 110 - 24 * 0,35 = 101,6 \text{ В}$$

Так как $I_{\text{я}} = I_{\text{в}} = I_{\text{НОМ}}$

Электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = E * I_{\text{я}} = 101,6 * 24 = 2438,6 \text{ Вт}$$

Полезная мощность, развиваемая на валу

$$P_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} * n_{\text{ном}} / 9,55 = 14 * 1500 / 9,55 = 2200 \text{ Вт}$$

Потребляемая мощность при номинальной нагрузке

$$P_1 = U_{\text{ном}} * I_{\text{ном}} = 110 * 24 = 2460 \text{ Вт}$$

Электрические потери в обмотках якоря и возбуждения

$$P_3 = P_1 - P_{\text{эм}} = 2460 - 2438 = 201,6 \text{ Вт}$$

или

$$P_3 = I^2 * R_{\text{общ}} = 24^2 * 0,35 = 201,6 \text{ Вт}$$

КПД при номинальном режиме

$$\eta = P_{\text{ном}} / P_1 = 2200 / 2460 = 0,833$$

При понижении напряжения на зажимах двигателя до 90 В и неизменном вращающем моменте на валу ток якоря и магнитный поток остаются неизменными, а частота вращения понижается

$$n_1 = n_{\text{ном}} * (U_1 - I_{\text{я}} * R_{\text{общ}}) / (U_{\text{ном}} - I_{\text{я}} * R_{\text{общ}}) = \\ = 1500 * (90 - 24 * 0,35) / (110 - 24 * 0,35) = 1204 \text{ об./мин.}$$

мощность на валу двигателя

$$P_2 = M_{\text{ном}} * n_1 / 9,55 = 14 * 1204 / 9,55 = 1766 \text{ Вт}$$

Потребляемая мощность

$$P_1 = U_1 * I_{\text{я}} = 90 * 24 = 2160 \text{ Вт}$$

КПД при пониженном напряжении

$$\eta_1 = P_2 / P_1 = 1766 / 2160 = 0,811$$

Следовательно, с понижением подводимого напряжения при неизменном вращающем моменте потребляемый ток (ток якоря), магнитный поток, электрические потери ($I_{\text{я}}^2 * R_{\text{общ}}$) остаются неизменными, а частота вращения, потребляемая мощность и КПД понижаются к первоначальному значению

$$n = n_1 / n_{\text{ном}} * 100 \% = 1204 / 1500 * 100 \% = 80 \%$$

$$P_2 = P_2/P_{\text{НОМ}} * 100 \% = 1766/2200 * 100 \% = 80 \%$$

$$\eta = \eta_1/\eta_{\text{НОМ}} * 100 \% = 0,811/0,833 * 100 \% = 97,3 \%$$

Задача 13.

Шести полюсный двигатель постоянного тока смешанного возбуждения работает от сети с напряжением $U = 220$ В и вращается с частотой $n = 1000$ об./мин. Двигатель рассчитан на номинальный ток $I_{\text{НОМ}} = 13,3$ А; КПД $\eta = 75,2$ %, сопротивление цепи якоря $R_{\text{я}} = 1,65$ Ом, сопротивление параллельной обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 183$ Ом, имеется три пары параллельных ветвей и 240 проводников обмотки якоря. Определить магнитный поток, вращающий момент на валу двигателя, электромагнитную, потребляемую и номинальную мощности.

Решение:

Для определения магнитного потока найдем ток якоря и ЭДС обмотки якоря

$$I_{\text{в}} = U_{\text{НОМ}}/R_{\text{в}} = 220/183 = 1,2 \text{ А}$$

Ток в цепи якоря

$$I_{\text{я}} = I_{\text{НОМ}} - I_{\text{в}} = 13,3 - 1,2 = 12,1 \text{ А}$$

ЭДС, наводимая в обмотке якоря

$$E_{\text{я}} = U_{\text{НОМ}} - I_{\text{я}} * R_{\text{я}} = 220 - 12,1 * 1,65 = 200 \text{ В}$$

Магнитный поток определяется из соотношения

$$E = p * N * n_{\text{НОМ}} * \Phi / (60 * a)$$

откуда

$$\Phi = 60 * a * E / (p * N * n_{\text{НОМ}}) = 60 * 3 * 200 / (3 * 240 * 1000) = 0,05 \text{ Вб}$$

Мощности:

Электромагнитная

$$P_{\text{эм}} = E_{\text{я}} * I_{\text{я}} = 200 * 12,1 = 2420 \text{ Вт}$$

Потребляемая

$$P_1 = U_1 * I_{\text{ном}} = 200 * 13,3 = 2926 \text{ Вт}$$

Номинальная

$$P_{\text{ном}} = P_1 * \eta = 2926 * 0,752 = 2200 \text{ Вт}$$

Вращающий момент на валу двигателя при номинальной нагрузке

$$M = 9,55 * P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 * 2200 / 1000 = 21 \text{ Н*м}$$

Задача 3.

Двухполюсный генератор постоянного тока с параллельным возбуждением имеет: сопротивление цепи якоря $R_{\text{я}} = 0,155 \text{ Ом}$; одну пару параллельных ветвей; $N = 500$ активных проводников; магнитный поток $\Phi = 1,97 * 10^{-2} \text{ Вб}$; частоту вращения якоря $n_{\text{ном}} = 1450 \text{ об./мин.}$ При номинальном токе в цепи нагрузки $I_{\text{ном}} = 50 \text{ А}$ и токе возбуждения $I_{\text{в}} = 1,7 \text{ А}$ КПД $\eta = 0,89$.

Определить напряжение на зажимах генератора при номинальной нагрузке. Электромагнитный момент, подводимую к генератору мощность при номинальной нагрузке и сумму потерь.

Решение:

ЭДС, генерируемая в обмотке якоря при номинальной частоте вращения:

$$E = c_e * \Phi * n_{\text{ном}} = P * N / (60 * a) * \Phi * n_{\text{ном}} = 1 * 500 * 0,0197 * 1450 / (60 * 1) = 238 \text{ В}$$

Ток в цепи якоря

$$I_{\text{я}} = I_{\text{ном}} + I_{\text{в}} = 50 + 1,7 = 51,7 \text{ А}$$

Напряжение на зажимах генератора при номинальной нагрузке

$$U = E - I_{\text{я}} * R_{\text{я}} = 238 - 51,7 * 0,14 = 230 \text{ В}$$

Электромагнитный тормозной момент

$$M = c_m * \Phi * I_{\text{я}} = P * N / (2 * \pi * a) * I_{\text{я}} = 1 * 500 * 0,0197 * 51,7 / (2 * 3,14 * 1) = 81 \text{ Н*м}$$

Полезная мощность, отдаваемая генератором в цепь

$$P_{2\text{ном}} = U_{\text{ном}} * I_{\text{ном}} = 230 * 50 = 11500 \text{ Вт}$$

Мощность, подводимая к генератору для его вращения при номинальной нагрузке

$$P_{1\text{ном}} = P_{2\text{ном}}/\eta = 11500/0,89 = 13259 \text{ Вт}$$

Сумма потерь при номинальной нагрузке

$$\sum \Delta P = P_{1\text{ном}} - P_{2\text{ном}} = 13259 - 11500 = 2029 \text{ Вт}$$

Задача 4.

Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением подключен к сети с напряжением 110 В и потребляет ток $I_{\text{ном}} = 50,5$ А. Сопротивление обмотки якоря и добавочных полюсов $R_{\text{я}} = 0,21$ Ом; сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 62$ Ом, номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 1000$ об./мин.; КПД $\eta = 81$ %. Определить: сумму потерь, электрические потери, дополнительные, механические и магнитные потери; ток при максимальном КПД, максимальный КПД.

Решение:

1. Мощность, потребляемая двигателем при номинальной нагрузке

$$P_1 = U_{\text{ном}} * I_{\text{ном}} = 110 * 50,5 = 5555 \text{ Вт}$$

2. Номинальная мощность на валу двигателя

$$P_{\text{ном}} = \eta * P_1 = 0,81 * 5555 = 4500 \text{ Вт}$$

3. Сумма потерь при номинальной нагрузке

$$\sum \Delta P = P_1 - P_{\text{ном}} = 5555 - 4500 = 1055 \text{ Вт}$$

4. Ток обмотки возбуждения

$$I_{\text{в}} = U_{\text{ном}}/R_{\text{в}} = 110/62 = 1,77 \text{ А}$$

5. Ток в обмотке якоря

$$I_{\text{я}} = I_{\text{ном}} - I_{\text{в}} = 50,5 - 1,77 = 48,73 \text{ А}$$

6. Электрические потери в цепи якоря и обмотке возбуждения при номинальной нагрузке

$$\Delta P_{\text{э}} = \Delta P_{\text{эя}} + \Delta P_{\text{эв}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}} = 48,73^2 * 0,21 + 1,77^2 * 62 = 693 \text{ Вт}$$

7. Добавочные потери составляют 1% от номинальной мощности

$$\Delta P_d = 0,01P_{\text{ном}} = 0,01*4500 = 45 \text{ Вт}$$

8. Механические и магнитные потери

$$\Delta P_m + \Delta P_{\text{мх}} = \sum \Delta P - (\Delta P_s + \Delta P_d) = 1055 - (693 + 45) = 317 \text{ Вт}$$

9. Условием максимального КПД является равенство постоянных и переменных потерь

$$I_1^2 * R_{\text{я}} = P_x + I_B^2 * R_B$$

откуда ток в цепи нагрузки при максимальном КПД

$$I_1 = [(P_x + I_B^2 * R_B) / R_{\text{я}}]^{0,5} = [(317 + 45 + 1,77^2 * 62) / 0,21]^{0,5} = 51,5 \text{ А}$$

максимальный КПД

$$\eta = 1 - \sum \Delta P / [U * (I_1 + I_B)] = 1 - (2*317+45) / [110*(51,5 + 1,77)] = 0,884$$

Задача 5.

Найти магнитный поток четырех полюсной машины постоянного тока, соответствующей первой гармонической индукции в зазоре $B_{1\text{мб}} = 0,8 \text{ Тл}$, если расчетная длина якоря $L_{\text{б}} = 0,15 \text{ м}$, диаметр якоря $D_{\text{я}} = 0,3 \text{ м}$.

Решение:

$$\Phi = \int_0^l B_{\text{б}} * L_{\text{б}} * d_x - \text{магнитный поток на один полюс}$$

$$\Phi = 0,8 * 0,15 * 0,3 = 0,036 - \text{на один полюс}$$

$$\Phi = 0,036 / 2 = 0,018 - \text{на два полюса}$$

Задача 6.

В четырех полюсной машине постоянного тока с простой петлевой обмоткой общее число эффективных проводников $N = 168$. Определить число витков в параллельной ветви обмотки якоря.

Решение:

$$w_{\text{я}} = N/(2 \cdot p) = 168/8 = 21$$

Задача 7.

Четырех полюсный двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением работает от сети с напряжением $U = 220$ В и потребляет ток $I_{\text{ном}} = 102$ А. Число проводников в обмотке якоря $N = 600$, число пар параллельных ветвей $a = 2$, магнитный поток $\Phi = 1,4 \cdot 10^{-2}$ Вб, сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0,1$ Ом, ток обмотки возбуждения $I_{\text{в}} = 2$ А.

Определить:

1. ЭДС обмоток якоря
2. номинальную частоту вращения
3. номинальный вращающий момент
4. КПД
5. сопротивление пускового реостата при пусковом токе $I_{\text{п}} = 3 \cdot I_{\text{ном}}$
6. пусковой ток при отсутствии пускового реостата.

Решение:

1. ЭДС обмоток якоря в номинальном режиме

$$1.1. E_{\text{я}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} = 220 - 100 \cdot 0,1 = 210 \text{ В}$$

$$1.2. I_{\text{я}} = I_{\text{ном}} - I_{\text{в}} = 102 - 2 = 100 \text{ А}$$

2. Номинальная частота вращения якоря

$$2.1. n_{\text{ном}} = E / (c_e \cdot \Phi) = 210 / (10 \cdot 1,4 \cdot 10^{-2}) = 1500 \text{ об./мин.}$$

$$2.2. c_e = P \cdot N / (60 \cdot a) = 2 \cdot 600 / (60 \cdot 2) = 10$$

3. Номинальный вращающий момент

$$3.1. c_m = 9,55 \cdot c_e = 9,55 \cdot 10 = 95,5$$

$$3.2. M_{\text{ном}} = c_m \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} = 95,5 \cdot 1,4 \cdot 10^{-2} \cdot 100 = 133,7 \text{ Н*м}$$

4. Номинальная мощность на валу двигателя определяется из соотношения

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}}$$

$$4.1. P_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} \cdot n_{\text{ном}} / 9,55 = 133,7 \cdot 1500 / 9,55 = 21000 \text{ Вт}$$

4.2. Потребляемая мощность

$$P_1 = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} = 220 \cdot 102 = 22440 \text{ Вт}$$

4.3. КПД при номинальной нагрузке

$$\eta = P_2 / P_1 = 21000 / 22440 = 0,935$$

5. Сопротивление пускового реостата при условии понижения пускового тока трехкратного значения

$$I_{я} = U_{ном}/(R_{я} + R_{р})$$

откуда

$$R_{р} = U_{ном}/(3 \cdot I_{ном}) - R_{я} = 220/(3 \cdot 100) - 0,1 = 0,63 \text{ Ом}$$

6. Пусковой ток при отсутствии пускового реостата

$$I_{яп} = U_{ном}/R_{я} = 220/0,1 = 22000 \text{ А}$$

Задача 8.

На табличке-паспорте двигателя постоянного тока указаны следующие паспортные данные:

| | |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| тип двигателя – | П 22; |
| номинальный режим работы – | продолжительный; |
| номинальная мощность – | $P_{ном} = 1 \text{ кВт}$; |
| номинальное напряжение – | $U_{ном} = 110 \text{ В}$; |
| номинальная частота вращения – | $n_{ном} = 1500 \text{ об./мин.}$; |
| система возбуждения – | параллельная; |
| КПД – | $\eta = 0,76$. |

Дополнительные данные:

| | |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| сопротивление цепи обмотки якоря – | $R_{я} = 0,88 \text{ Ом}$; |
| сопротивление обмотки возбуждения – | $R_{в} = 166 \text{ Ом}$; |

Определить:

1. Номинальный вращающий момент
2. Мощность, потребляемую двигателем из сети
3. Потребляемый ток
4. Ток в обмотках якоря и обмотке возбуждения
5. Ток в обмотке якоря при коротком замыкании (при пуске)
6. Пусковой ток и сопротивление пускового реостата при условии $I_{п} = 2,5 \cdot I_{ном}$
7. Потери при холостом ходе
8. Ток двигателя при холостом ходе

Решение:

1. Номинальный вращающий момент

$$M_{ном} = 9,55 \cdot P_{ном}/n_{ном} = 9,55 \cdot 1000/1500 = 6,36 \text{ Н*м}$$

2. Мощность, потребляемая двигателем из сети при номинальной нагрузке

$$P_1 = P_{\text{ном}}/\eta = 1000/0,76 = 1315 \text{ Вт}$$

3. Потребляемый ток в номинальном режиме

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}/U_{\text{ном}} = 1315/110 = 12 \text{ А}$$

4. Токи в обмотках якоря и возбуждения при номинальном режиме

$$I_{\text{в}} = U_{\text{ном}}/R_{\text{в}} = 110/166 = 0,66 \text{ А}$$

$$I_{\text{я}} = I_{\text{ном}} - I_{\text{в}} = 12 - 0,66 = 11,34 \text{ А}$$

5. Ток якоря при коротком замыкании (при отключенной обмотки возбуждения или в момент пуска при отключенном пусковом реостате)

$$I_{\text{к}} = U_{\text{ном}}/R_{\text{я}} = 110/0,88 = 125 \text{ А}$$

6. Пусковой ток при условии $I_{\text{п}} = 2,5 \cdot I_{\text{ном}}$

$$I_{\text{п}} = 2,5 \cdot I_{\text{ном}} = 2,5 \cdot 12 = 30 \text{ А}$$

7. Сопротивление пускового реостата при условии $I_{\text{п}} = 2,5 \cdot I_{\text{ном}}$

$$R_{\text{п}} = U_{\text{ном}}/I_{\text{п}} - R_{\text{я}} = 110/30 - 0,88 = 2,78 \text{ Ом}$$

8. Сумма потерь двигателя

$$\sum \Delta P = P_1 - P_{\text{ном}} = 1315 - 1000 = 315 \text{ Вт}$$

9. Потери электрические

$$P_{\text{э}} = P_{\text{эя}} + P_{\text{эв}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}} = 11,34^2 \cdot 0,88 + 0,66^2 \cdot 166 = 185,4 \text{ Вт}$$

10. Потери магнитные и механические

$$P_{\text{м}} + P_{\text{мех}} = \sum \Delta P - P_{\text{э}} = 315 - 185,4 = 129,4 \text{ Вт}$$

Так как мощность, потребляемая двигателем при холостом ходе равна потерям в стали, в цепи возбуждения и механическим потерям, то

$$I_{\text{хх}} = I_{\text{в}} + (P_{\text{м}} + P_{\text{мех}})/U_{\text{ном}} = 0,66 + 129,4/110 = 1,8 \text{ А}$$

Задача 9.

Определить частоту вращения двигателя постоянного тока П12 при холостом ходе и номинальной нагрузке, если известно, что регулирование

производилось за счет изменения сопротивления в цепи возбуждения и магнитный поток имел три значения:

$$1. \Phi_{\text{ном}}; \quad 2. \Phi_1 = 0,8 * \Phi_{\text{ном}}; \quad 3. \Phi_2 = 0,5 * \Phi_{\text{ном}}.$$

Паспортные данные двигателя:

$$P_{\text{ном}} = 1 \text{ кВт}$$

$$U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$$

$$n_{\text{ном}} = 3000 \text{ об./мин.}$$

$$I_{\text{яном}} = 5,6 \text{ А}$$

$$R_{\text{я}} = 2,0 \text{ Ом}$$

Решение:

1. Определение частоты вращения двигателя при холостом ходе и номинальном магнитном потоке

$$n_x = n_{\text{ном}} * U_{\text{ном}} / (U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} * R_{\text{я}}) = 3000 * 220 / (220 - 5,6 * 2) = 3160 \text{ об./мин.}$$

2. Частота вращения и магнитные потоки связаны соотношением

$$n_{1x} / n_x = \Phi_{\text{ном}} / \Phi_1$$

Частота вращения при холостом ходе и пониженном магнитном потоке $\Phi_1 = 0,8 * \Phi_{\text{ном}}$

$$n_{1x} = n_x * \Phi_{\text{ном}} / \Phi_1 = 3160 * 1 / 0,8 = 3950 \text{ об./мин.}$$

Частота вращения при холостом ходе и пониженном магнитном потоке $\Phi_2 = 0,5 * \Phi_{\text{ном}}$

$$n_{2x} = n_x * \Phi_{\text{ном}} / \Phi_2 = 3160 * 1 / 0,5 = 6320 \text{ об./мин.}$$

3. Для определения частоты вращения при номинальном моменте и пониженном магнитном потоке необходимо определить перепад частоты вращения между холостым ходом и номинальной нагрузкой

$$\Delta n_1 = (n_x - n_{\text{ном}}) * (\Phi_{\text{ном}} / \Phi_1)^2 = (3160 - 3000) * (1 / 0,8)^2 = 250 \text{ об./мин.}$$

$$\Delta n_2 = (n_x - n_{\text{ном}}) * (\Phi_{\text{ном}} / \Phi_2)^2 = (3160 - 3000) * (1 / 0,5)^2 = 640 \text{ об./мин.}$$

Частота вращения при номинальном моменте и магнитном потоке $\Phi_1 = 0,8 * \Phi_{\text{ном}}$

$$n_{1\text{ном}} = n_{1x} - \Delta n_1 = 3950 - 250 = 3700 \text{ об./мин.}$$

то же при магнитном потоке $\Phi_2 = 0,5 * \Phi_{ном}$

$$n_{2ном} = n_{2х} - \Delta n_2 = 6320 - 640 = 5680 \text{ об./мин.}$$

Задача 10.

Генератор постоянного тока с независимым возбуждением должен использоваться в системе генератор-двигатель для регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока П12. Используя данные предыдущей задачи, выбрать генератор для регулирования частоты вращения двигателя П12. Определить пределы регулирования частоты вращения от максимального до минимального значения при холостом ходе и номинальном вращающем моменте.

Решение:

Для выбора генератора постоянного тока, используемого в системе генератор-двигатель, необходимо учесть, что номинальная мощность генератора должна быть равна или превышать потребляемую мощность двигателя с учетом возможных перегрузок.

1. Потребляемая мощность двигателя П12

$$P_1 = U_{ном} * I_{ном} = 220 * 5,6 = 1232 \text{ А}$$

Выбираем генератор мощностью не менее 1,3 кВт напряжением 230 В с номинальным током не менее 6 А. Этим данным соответствует генератор типа П22, имеющий следующие паспортные данные:

$$P_{ном} = 1,6 \text{ кВт};$$

$$U_{ном} = 230 \text{ В};$$

$$I_{ном} = 7 \text{ А};$$

$$n_{ном} = 2850 \text{ об./мин.}$$

$$\eta = 83,5 \%$$

$$R_{яг} = 1,55 \text{ Ом}$$

2. Определим общее сопротивление цепи якоря двигателя и генератора (обмотки якоря генератора и двигателя включены последовательно)

$$R_{общ} = R_{ядв} + R_{яг} = 2,0 + 1,55 = 3,55 \text{ Ом}$$

3. ЭДС генератора в номинальном режиме

$$E_{г} = U_{гном} + I_{гя} * R_{яг} = 230 + 7 * 1,55 = 240,85 \text{ В}$$

4. Напряжение на выходе генератора при номинальной нагрузке двигателя

$$U_{г} = E - I_{ядв} * R_{общ} = 240 - 5,6 * 3,55 = 220,97 \text{ В}$$

Что соответствует номинальному режиму двигателя

5. Определение частоты вращения двигателя

$$c_e * \Phi = E/n_{ном} = (U_{ном} - I_{ном} * R_{ядв})/n_{ном} = (220 - 5,6 * 2,0)/3000 = 0,0694$$

В6

максимальная частота вращения двигателя при холостом ходе

$$n_x = E_1/(c_e * \Phi) = 240,85/0,0694 = 3458 \text{ об./мин.}$$

Минимальная частота вращения двигателя при холостом ходе определяется по минимальному значению ЭДС генератора, при котором двигатель приходит во вращение. Пусть пуск двигателя происходит при полутора кратном значении номинального тока.

$$E_{гmin} = 1,5 * I_{ядв} * R_{общ} = 1,5 * 5,6 * 3,55 = 29,8 \text{ В}$$

Минимальная частота вращения при холостом ходе

$$n_{min} = E_{min}/(c_e * \Phi) = 29,8/0,0694 = 429,6 \text{ об./мин.}$$

При номинальном моменте

$$n_{min} = (E_{гmin} - I_{ядв} * R_{общ})/(c_e * \Phi) = (29,8 - 5,6 * 3,55)/0,0694 = 142,9 \text{ об./мин.}$$

Следовательно, при изменении напряжения на выходе генератора частота вращения двигателя:

- при холостом ходе меняется от 3488 до 452 об./мин,
- при номинальном моменте от 3000 до 142,9 об./мин.

6. Выходная мощность генератора при номинальной нагрузке двигателя

$$P_{гвых} = U_{г} * I_{ядв} = 220,97 * 5,6 = 1237,4 \text{ Вт}$$

7. Мощность, потребляемая генератором при номинальном режиме двигателя

$$P_{гном} = P_{гвых}/\eta = 1237,4/0,835 = 1481,9 \text{ Вт}$$

8. Для определения мощности двигателя, который приводит во вращение генератор, необходимо учесть возможные перегрузки (~30 %)

$$P_{1г} = P_2/\eta = U_{ном} * 1,3 * I_{ядв}/\eta = 220,97 * 1,3 * 5,6/0,835 = 1926,5 \text{ Вт}$$

Задача 11.

Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением включен в сеть с напряжением $U = 220$ В и при номинальном вращающем моменте $M_{\text{ном}} = 101,7$ Н*м развивает частоту вращения $n_{\text{ном}} = 750$ об./мин.; КПД двигателя $\eta = 75$ %. Сопротивления:

| | |
|---------------------|-----------------------------|
| Обмотки якоря | $R_{\text{я}} = 0,0443$ Ом; |
| Обмотки возбуждения | $R_{\text{в}} = 0,197$ Ом; |
| Пускового реостата | $R_{\text{п}} = 1,17$ Ом. |

Определить: номинальную, потребляемую и электромагнитную мощность; вращающий момент при пуске, если соответствующее увеличение тока приводит к увеличению магнитного потока в 1,2 раза.

Решение:

1. Номинальная мощность находится из уравнения

$$M = 9,55 * P / n$$

откуда

$$P_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} * n_{\text{ном}} / 9,55 = 101,7 * 750 / 9,55 = 8000 \text{ Вт}$$

Потребляемая мощность

$$P_1 = P_{\text{ном}} / \eta = 10666 \text{ Вт}$$

2. Ток в якоре двигателя последовательного возбуждения равен току в цепи возбуждения и потребляемому току

$$I_1 = I_{\text{я}} = I_{\text{в}} = P_1 / U_{\text{ном}} = 10666 / 220 = 48,5 \text{ А}$$

ЭДС обмоток якоря

$$E_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{я}} * (R_{\text{я}} + R_{\text{в}}) = 220 - 48,5(0,443 + 0,197) = 189 \text{ В}$$

Электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = E_{\text{я}} * I_{\text{я}} = 189 * 48,5 = 9166 \text{ Вт}$$

Пусковой ток

$$I_{\text{п}} = U_{\text{ном}} / (R_{\text{я}} + R_{\text{в}} + R_{\text{п}}) = 220 / (0,443 + 0,197 + 1,17) = 121,5 \text{ А}$$

Кратность пускового тока

$$k_1 = I_p/I_{ном} = 121,5/48,5 = 2,5$$

вращающий момент при пуске с возрастанием тока в 2,5 раза приводит к увеличению магнитного потока в 1,2 раза

$$M_{п} = c_m * 1,22\Phi * 2,5 * I_{я} = 3 * 101,7 = 305 \text{ Н*м}$$

Задача 12.

Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением работает при напряжении на зажимах $U = 110 \text{ В}$ и токе $I_{ном} = 24 \text{ А}$. якорь двигателя вращается с частотой $n_{ном} = 1500 \text{ об./мин.}$ и развивает на валу вращающий момент $M = 14,0 \text{ Н*м}$. Общее сопротивление обмоток якоря и возбуждения $R_{общ} = 0,35 \text{ ом}$. Определить электромагнитную, полезную и потребляемую мощности, электрические, магнитные и механические потери. Как изменится потребляемый ток, магнитный поток, частота вращения, потребляемая мощность, КПД при понижении подводимого напряжения до 90 В и при неизменном вращающем моменте на валу.

Решение:

1. ЭДС обмотки якоря

$$E_{я} = U - I_{я} * R_{общ} = 110 - 24 * 0,35 = 101,6 \text{ В}$$

Так как $I_{я} = I_{в} = I_{ном}$

Электромагнитная мощность

$$P_{эм} = E * I_{я} = 101,6 * 24 = 2438,6 \text{ Вт}$$

Полезная мощность, развиваемая на валу

$$P_{ном} = M_{ном} * n_{ном} / 9,55 = 14 * 1500 / 9,55 = 2200 \text{ Вт}$$

Потребляемая мощность при номинальной нагрузке

$$P_1 = U_{ном} * I_{ном} = 110 * 24 = 2460 \text{ Вт}$$

Электрические потери в обмотках якоря и возбуждения

$$P_э = P_1 - P_{эм} = 2460 - 2438 = 201,6 \text{ Вт}$$

или

$$P_э = I^2 * R_{общ} = 24^2 * 0,35 = 201,6 \text{ Вт}$$

КПД при номинальном режиме

$$\eta = P_{\text{ном}}/P_1 = 2200/2460 = 0,833$$

При понижении напряжения на зажимах двигателя до 90 В и неизменном вращающем моменте на валу ток якоря и магнитный поток остаются неизменными, а частота вращения понижается

$$\begin{aligned} n_1 &= n_{\text{ном}}*(U_1 - I_{\text{я}}*R_{\text{общ}})/(U_{\text{ном}} - I_{\text{я}}*R_{\text{общ}}) = \\ &= 1500*(90 - 24*0,35)/(110 - 24*0,35) = 1204 \text{ об./мин.} \end{aligned}$$

мощность на валу двигателя

$$P_2 = M_{\text{ном}}*n_1/9,55 = 14*1204/9,55 = 1766 \text{ Вт}$$

Потребляемая мощность

$$P_1 = U_1*I_{\text{я}} = 90*24 = 2160 \text{ Вт}$$

КПД при пониженном напряжении

$$\eta_1 = P_2/P_1 = 1766/2160 = 0,811$$

Следовательно, с понижением подводимого напряжения при неизменном вращающем моменте потребляемый ток (ток якоря), магнитный поток, электрические потери ($I_{\text{я}}^2*R_{\text{общ}}$) остаются неизменными, а частота вращения, потребляемая мощность и КПД понижаются к первоначальному значению

$$n = n_1/n_{\text{ном}}*100 \% = 1204/2200*100 \% = 80 \%$$

$$P_2 = P_2/P_{\text{ном}}*100 \% = 1766/2200*100 \% = 80 \%$$

$$\eta = \eta_1/\eta_{\text{ном}}*100 \% = 0,811/0,833*100 \% = 97,3 \%$$

Задача 13.

Шести полюсный двигатель постоянного тока смешанного возбуждения работает от сети с напряжением $U = 220 \text{ В}$ и вращается с частотой $n = 1000 \text{ об./мин.}$ Двигатель рассчитан на номинальный ток $I_{\text{ном}} = 13,3 \text{ А}$; КПД $\eta = 75,2 \%$, сопротивление цепи якоря $R_{\text{я}} = 1,65 \text{ Ом}$, сопротивление параллельной обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 183 \text{ Ом}$, имеется три пары параллельных ветвей и 240 проводников обмотки якоря. Определить магнитный поток, вращающий момент на валу двигателя, электромагнитную, потребляемую и номинальную мощности.

Решение:

Для определения магнитного потока найдем ток якоря и ЭДС обмотки якоря

$$I_B = U_{\text{ном}}/R_B = 220/183 = 1,2 \text{ A}$$

Ток в цепи якоря

$$I_A = I_{\text{ном}} - I_B = 13,3 - 1,2 = 12,1 \text{ A}$$

ЭДС, наводимая в обмотке якоря

$$E_A = U_{\text{ном}} - I_A * R_A = 220 - 12,1 * 1,65 = 200 \text{ В}$$

Магнитный поток определяется из соотношения

$$E = p * N * n_{\text{ном}} * \Phi / (60 * a)$$

откуда

$$\Phi = 60 * a * E / (p * N * n_{\text{ном}}) = 60 * 3 * 200 / (3 * 240 * 1000) = 0,05 \text{ Вб}$$

Мощности:

Электромагнитная

$$P_{\text{эм}} = E_A * I_A = 200 * 12,1 = 2420 \text{ Вт}$$

Потребляемая

$$P_1 = U_1 * I_{\text{ном}} = 200 * 13,3 = 2926 \text{ Вт}$$

Номинальная

$$P_{\text{ном}} = P_1 * \eta = 2926 * 0,752 = 2200 \text{ Вт}$$

Вращающий момент на валу двигателя при номинальной нагрузке

$$M = 9,55 * P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 * 2200 / 1000 = 21 \text{ Н*м}$$

2). Асинхронные машины

Задача1.

Найти ЭДС, индуцируемую в фазе обмоток статора и ротора асинхронного короткозамкнутого двигателя при неподвижном и вращающемся роторе, коэффициент трансформации и процентное значение ЭДС от подводимого напряжения обмотки статора, если известны:

скольжение $s=4\%$, обмотка статора соединена в «звезду» и подключена к сети переменного тока с линейным напряжением 380 В, число витков в каждой фазе статора $w_1=88$, $w_2=12$. Магнитный поток $\Phi=1.21 \cdot 10^{-2}$ Вб, обмоточный коэффициент обмотки статора $K_{o1}=0,95$, ротора $K_{o2}=0,92$.

Частота тока $f=50$ Гц.

Решение:

Определяем ЭДС, индуцируемую в фазе обмотки статора

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi \cdot K_{o1} = 4,44 \cdot 50 \cdot 88 \cdot 1,21 \cdot 10^{-2} \cdot 0,92 = 217,5 \text{ В}$$

ЭДС, индуцируемая в фазе обмотки неподвижного ротора

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi \cdot K_{o2} = 4,44 \cdot 50 \cdot 12 \cdot 1,21 \cdot 10^{-2} \cdot 0,92 = 30,6 \text{ В}$$

Коэффициент трансформации представляет собой отношение ЭДС обмотки статора к ЭДС обмотки ротора

$$n = E_1 / E_2 = 217,5 / 30,6 = 7,1$$

ЭДС, индуцируемая в фазе обмотки вращающегося ротора, при скольжении $s=4\%$

$$E_{2s} = E_2 \cdot s = 30,6 \cdot 0,04 = 1,22 \text{ В}$$

Фазное напряжение обмотки статора

$$U_\phi = U_l / \sqrt{3} = 220 \text{ В}$$

Отсюда ЭДС в фазе обмотки статора от подводимого напряжения

$$E_1 = E_l / U_\phi = (127,5 / 220) \cdot 100 = 98,8\%$$

Задача 2

Асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором марки АО2-82-6 имеет следующие паспортные данные:

напряжение $U=220/380$

номинальная мощность $P_2=40$ кВт

частота вращения $n=980$ об/мин

КПД $\eta = 91,5\%$

коэффициент мощности $\cos\phi = 0,91$

кратность пускового тока $K_i=5$

кратность пускового момента $K_m=1,1$

перегрузочная способность двигателя $\lambda = 1,8$

Определить число пар полюсов, номинальное скольжение, номинальный, максимальный и пусковой вращающие моменты, номинальный и пусковой токи двигателя при соединении обмотки статора в «звезду» и «треугольник». Возможен ли пуск нагруженного двигателя, если подводимое напряжение на 10% ниже и пуск производится переключением обмоток статора со «звезды» на «треугольник»?

Решение:

1. Для определения числа пар полюсов можно воспользоваться маркировкой двигателя. Последнее число в марке двигателя означает число полюсов. В данном двигателе шесть полюсов, следовательно – три пары полюсов.

Можно определить число пар полюсов, воспользовавшись частотой вращения магнитного поля ротора

$$p=60*f/n_2=3000/980=3,06$$

Частота вращения магнитного поля

$$n_1=60*f/p=1000\text{об/мин}$$

2. Номинальное значение скольжения

$$s=(n_1-n_2)/n_1*100=(1000-980)/1000*100=2\%$$

3. Мощность, потребляемая двигателем

$$P_1=P_2/\eta=40000/0,915=43712\text{Вт}$$

4. Номинальный вращающий момент двигателя

$$M_{ном}=9,55*P_2/n_2=9,55*40000/980=389,8\text{Н*М}$$

5. Максимальный момент

$$M_{max}=\lambda*M_{ном}=1,8*389,8=702,6\text{Н*М}$$

6. Пусковой момент

$$M_n=K_m*M_{ном}=1,1*389,8=428,7\text{Н*М}$$

7. Для определения фазных, линейных и пусковых токов нужно учесть следующее: если двигатель рассчитан на работу от сети переменного тока с напряжением 220/300В, то это значит, что каждая фаза обмотки статора рассчитана на напряжение 220 В. Обмотку необходимо включить по схеме «треугольник», если в сети линейное напряжение 220 В и по схеме «звезда», если в сети линейное напряжение 380 В.

Определяем фазный, линейный и пусковой токи при линейном напряжении 220 В и соединении обмотки статора по схеме «треугольник»

$$I_\phi=P_1/3*U_\phi*cos\varphi=43715/3*220*0,91=72,8\text{А}$$

$$I_\lambda=\sqrt{3}*I_\phi=1,73*72,8=125,9$$

$$I_n=K_i*I_\lambda=5*125,9=629,5\text{А}$$

Найдем значения фазных, линейных и пусковых токов, если обмотки статора включены по схеме «звезда» и подключены к сети с линейным напряжением U=380 В

Значение фазного тока найдем из формулы мощностей для линейных значений токов и напряжений

$$P_1=\sqrt{3}*U_\lambda*I_\lambda*cos\varphi$$

При соединении в «звезду»

линейный ток

$$I_\phi=I_\lambda=P_1/\sqrt{3}*U_\lambda*cos\varphi=43715/1,73*380*0,91=73\text{А}$$

пусковой ток

$$I_n=K_i*I_\lambda=5*73=365\text{А}$$

8. Для определения возможности пуска в ход двигателя, находящегося под номинальной нагрузкой и пониженным напряжением, необходимо определить пусковой вращающий момент при пониженном напряжении. В соответствии с формулой

$$M=c*U^2$$

вращающий момент двигателя пропорционален квадрату приложенного напряжения. Следовательно, при понижении напряжения на 10% вращающий момент составит

$$0,9^2 * M_{ном} = 0,81 * 389,8 = 314,74 \text{ Н*М}$$

Соответственно пусковой момент

$$M_{n1} = 1,1 * 315,74 = 347,3 \text{ Н*М}$$

Тормозной момент двигателя на 47,5 НМ больше, следовательно пуск невозможен.

Для понижения пусковых токов часто пуск асинхронных двигателей осуществляют при пониженном напряжении, Двигатели, работающие при соединении обмоток статора по схеме «треугольник» пускают без нагрузки путем переключения обмоток со «Звезды» на «треугольник». В момент пуска обмотки находятся под напряжением $U_{\phi} = U_{л} / \sqrt{3} = 127 \text{ В}$, что составляет 57,7% от номинального напряжения, пусковой момент при переключении обмоток составит $(0,577 * U_{ном})^2 = 128,8 \text{ НМ}$, что в три раза меньше номинального значения.

Задача 3.

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором единой серии АО2-92-6 имеет следующие технические характеристики:

номинальная мощность на валу $P_{ном} = 75 \text{ кВт}$

номинальное напряжение сети $U_{ном} = 220/380 \text{ В}$

номинальное скольжение $s_{ном} = 0,015$

коэффициент мощности при номинальной нагрузке $\cos \varphi_{ном} = 0,92$

при холостом ходе $\cos \varphi_x = 0,2$

коэффициент полезного действия $\eta = 92,5\%$

кратность пускового тока $K_i = 1,1$

кратность максимального момента $\lambda = 1,8$

Определить номинальный, максимальный и пусковой вращающий моменты, фазный, линейный и пусковой токи при номинальной нагрузке, ток холостого хода, потери энергии в роторе, общее, активное и индуктивное сопротивление фазы при номинальной нагрузке, частоту вращения ротора при максимальной нагрузке, частоту тока ротора при номинальной и максимальной нагрузках.

Решение:

Определяем частоту вращения магнитного поля. Число пар полюсов указано в обозначении типа двигателя ($p=3$). Для единой серии А2 частота тока равна 50 Гц. Тогда

$$n_1 = 60 * f / p = 1000 \text{ об/мин}$$

Число оборотов ротора при номинальной нагрузке и известном скольжении

$$n_{2ном} = n_1 * (1-s) = 1000 * (1-0,015) = 985 \text{ об/мин}$$

Вращающие моменты

- номинальный

$$M_{ном} = 9,55 * P_{ном} / n_{2ном} = 9,55 * 75000 / 985 = 727 \text{ Н*М}$$

- максимальный

$$M_{max} = \lambda * M_{ном} = 1,8 * 727 = 1308 \text{ Н*М}$$

- пусковой

$$M_n = K_m * M_{ном} = 1,1 * 727 = 799,8 \text{ Н*М}$$

Мощность, потребляемая двигателем из сети

$$P_1 = P_{ном} / \eta = 75000 / 0,925 = 81081,2 \text{ Вт}$$

Номинальный фазный ток в обмотках статора при соединении в «треугольник»

$$I_{фном} = P_1 / 3 * U_{ф} * \cos\varphi_{ном} = 81081,2 / 3 * 220 * 0,92 = 133,5 \text{ А}$$

$$I_{лном} = \sqrt{3} * I_{фном} = 1,73 * 133,5 = 231 \text{ А}$$

$$I_n = K_i * I_l = 6 * 231 = 1386 \text{ А}$$

Общие потери двигателя составляют разность между потребляемой и номинальной мощностью

$$\Sigma P = P_1 - P_{ном} = 81081,2 - 75000 = 6081,2 \text{ Вт}$$

Ток холостого хода определяем из формулы мощности холостого хода

$$P_x = \sqrt{3} * U_{ном} * I_x * \cos\varphi_x$$

$$I_x = P_x / \sqrt{3} * U_{ном} * \cos\varphi_x = 6081,2 / 1,73 * 220 * 0,2 = 79,9 \text{ А}$$

Электромагнитную мощность, т.е. мощность, передаваемую электромагнитным путем из статора в ротор, определяем из соотношения

$$P_{эм} = M_{ном} * \omega = M_{ном} * (2 * \pi * n_1 / 60) = 727 * 1000 / 9,55 = 76,125 \text{ Вт}$$

Потери энергии в статоре

$$P_c = P_1 - P_{эм} = 81081,2 - 76125 = 4956,2 \text{ Вт}$$

Потери энергии в роторе

$$P_p = \Sigma P - P_c = 6081,2 - 4956,2 = 1125 \text{ Вт}$$

Сопротивление фазы при номинальной нагрузке
- общее

$$Z_{\phi} = U_{фном} / I_{фном} = 220 / 133,5 = 1,65 \text{ Ом}$$

активное

$$R = Z_{\phi} * \cos\varphi = 1,65 * 0,92 = 1,5$$

индуктивное

$$x = \sqrt{Z^2 - R^2} = 0,68 \text{ Ом}$$

Критическое скольжение – это скольжение, при котором двигатель развивает максимальный вращающий момент

$$s_{кр} = s * (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,049$$

Частота вращения ротора при максимальной нагрузке

$$n_{2кр} = n_1 * (1 - s_{кр}) = 1000 * (1 - 0,049) = 952 \text{ об/мин}$$

Частота тока ротора при номинальной нагрузке

$$f_{2ном} = n_1 * s_{ном} = 50 * 0,015 = 0,75$$

Частота тока ротора максимальной нагрузке

$$f_{2max} = f_1 * s_{кр} = 50 * 0,049 = 2,45 \text{ Гц}$$

Задача 4

Трехфазный шестиполюсный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет следующие паспортные данные:

номинальная мощность $P_2 = 5,0$ кВт
 номинальное напряжение $U = 220/380$ В
 номинальная частота вращения $n = 940$ об/мин
 номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,68$
 номинальный КПД $\eta = 74,5\%$

Определить мощность, подводимую к двигателю, токи двигателя при соединении обмоток статора в «треугольник» и «звезду», вращающий момент $M_{ном}$ и скольжение $s_{ном}$, если частота тока статора $f = 50$ Гц. Рассчитать сопротивление регулировочного реостата, включаемого в цепь ротора для снижения частоты вращения вала двигателя до 750 /мин при номинальном моменте на валу и соединении обмоток в «звезду».

Решение:

Мощность, подводимую к двигателю

$$P_1 = P_{ном} / \eta_{ном} = 5000 / 0,745 = 6711 \text{ Вт}$$

Токи двигателя при соединении обмоток статора в «звезду»

$$I_\phi = P_1 / \sqrt{3} * U_1 * \cos\varphi = 6711 / 1,73 * 380 * 0,68 = 15 \text{ А}$$

в треугольник

$$I_\phi = P_1 / \sqrt{3} * U_1 * \cos\varphi = 6711 / 1,73 * 220 * 0,68 = 25,9 \text{ А}$$

Вращающий момент двигателя при номинальной нагрузке

$$M_{ном} = 9,55 * P_{ном} / n_{2ном} = 9,55 * 5000 / 940 = 50,8 \text{ Н*М}$$

Скольжение при номинальной нагрузке

$$s_{ном} = (n_1 - n_{2ном}) / n_1 = (1000 - 750) / 1000 = 0,25$$

Для определения сопротивления регулировочного реостата воспользуемся выражением

$$(R_2 + R_{рном}) / s = R_2 * s$$

откуда

$$R_{рном} = R_2 * (s / s_{ном} - 1)$$

Активное сопротивление фазы ротора из выражений

$$P_{р2} = 3 * I_{2ном}^2 * R_2$$

$$P_{р2} = \frac{P_{ном}}{9,55} * \frac{1}{3} = 9,55$$

откуда

$$R_2 = \frac{s_{ном} * M_{ном} * n_1}{9,55 * 3 * I_{2ном}^2} = 0,06 * \frac{50,8 * 1000}{28,65 * 152} = 0,47$$

Сопротивление регулировочного реостата

$$R_{рном} = R_2 * (s / s_{ном} - 1) = 0,47 * (0,25 / 0,06 - 1) = 1,49$$

3). Синхронные двигатели

Задачи по расчету синхронных двигателей находятся в файле MathCad «Синхронные двигатели».

4). Синхронные генераторы

Задачи по расчету синхронных генераторов находятся в файле MathCad «Синхронные генераторы».

8. ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНАМ И ОБРАЗЦЫ ЭКЗАМЕНАЦИОННЫХ БИЛЕТОВ

РАЗДЕЛ: ТРАНСФОРМАТОРЫ

1. Назначение и область применения трансформаторов.
2. Принцип действия и основные элементы конструкции трансформаторов.
3. Холостой ход идеализированного и реального трансформатора (уравнения электродвижущих сил, векторные диаграммы).
4. Намагничивающий ток и ток ХХ трансформатора.
5. Работа трансформатора под нагрузкой. Комплексные уравнения магнитодвижущих сил и токов, уравнения электродвижущих сил.
6. Приведенный трансформатор. Приведение параметров вторичной обмотки трансформатора.
7. Полная векторная диаграмма трансформатора под нагрузкой при активной, активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузках.
8. Схема замещения трансформатора.
9. Опытное определение параметров схемы замещения.
10. Характеристики ХХ КЗ трансформатора.
11. Упрощенная векторная диаграмма трансформатора.
12. Внешние характеристики трансформатора и изменение вторичного напряжения трансформатора.
13. Потери и КПД трансформатора.
14. Трехфазный трансформатор. Схемы и группы соединения.
15. Автотрансформатор.
15. Параллельная работа трансформаторов. Условия включения на параллельную работу. Распределение нагрузок.
16. Трехобмоточные трансформаторы.
17. Автотрансформаторы.
18. Принципы регулирования напряжения в трансформаторах.
19. Переходный процесс при включении трансформатора в сеть.
20. Переходный процесс при коротком замыкании вторичной обмотки.

РАЗДЕЛ: ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Основные принципы выполнения многофазных обмоток.
2. МДС и ЭДС обмоток переменного тока. Обмоточный коэффициент.
3. Создание вращающегося магнитного поля.

РАЗДЕЛ: СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

1. Принцип действия и основные элементы конструкции СГ.
2. Способы возбуждения СМ.
3. Работа СГ при ХХ.
4. СГ под нагрузкой. Реакция якоря.

5. Уравнения ЭДС и векторные диаграммы СГ (диаграмма Blondel).
Определение индуктивных сопротивлений СГ.
6. Практическая диаграмма ЭДС (диаграмма Потье).
7. Рабочие характеристики СГ.
8. Потери и КПД СМ.
9. Параллельная работа СМ с сетью. Способы синхронизации.
10. Регулирование активной и реактивной нагрузки СГ, включенного на параллельную работу.

11. Электромагнитная мощность (момент) СМ.

12. Статическая устойчивость.

13. Режим угловой характеристики.

14. Режим U - обратной характеристики.

РАЗДЕЛ: АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

1. Принцип действия и конструктивные основные типы АМ.

2. Магнитные поля и ЭДС АМ.

3. Основные уравнения (МДС, ЭДС и токов). Коэффициенты приведения по ЭДС, по току, приведение сопротивлений обмотки ротора. Векторная диаграмма АД.

4. Схема замещения. Ток ротора.

5. Основные энергетические соотношения. Энергетическая диаграмма АД.

6. Электромагнитный момент АМ (вывод формулы).

7. Механическая характеристика АМ. Возможные режимы работы. Механическая характеристика АД. Критическое скольжение. Максимальный и пусковой моменты. Перегрузочная способность, кратность пускового момента.

9. Искусственные характеристики АД.

10. Рабочие характеристики трехфазных АД.

11. Регулирование частоты вращения АД.

12. Способы пуска АД.

РАЗДЕЛ: МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Принцип действия генератора ПТ и двигателя ПТ.

2. Устройство электрической машины ПТ.

3. Способы возбуждения.

4. Электродвижущая сила обмотки якоря (вывод формулы).

5. Электромагнитный момент машины ПТ (вывод формулы).

6. Магнитная цепь электрической машины ПТ.

7. Реакция якоря машины ПТ.

8. Потери и КПД электрических машин ПТ.

9. Уравнения ЭДС, тока, момента двигателя ПТ. Частота вращения ДПТ.

10. Пуск двигателей ПТ.

11. Механические и эл.мех. (скоростные) характеристики ДПТ независимого (параллельного возбуждения).

12. Регулирование частоты вращения ДПТ.

13. Условия самовозбуждения генераторов ПТ параллельного возбуждения и их основные характеристики.

14. Коллекторные машины переменного тока.

Критерий экзаменационной оценки:

Для допуска к экзамену достаточными основаниями являются выполнение и защита РГР и всех лабораторных работ. Студент, не защитивший несколько лабораторных работ и (или) РГР, допускается к экзамену, но перед получением экзаменационного билета он должен ответить на вопросы, относящиеся к незащищенным лабораторным работам и РГР.

Для подготовки ответа студенту отводится 60 мин. Каждый билет содержит два теоретических вопроса, сопровождаемых задачами. Для получения студентом оценки «удовлетворительно» необходимо полностью решить обе задачи без теоретических выкладок по вопросам билета и иметь конспект разделов, предназначенных для самостоятельного изучения (по темам практических занятий). При этом результаты проверки текущей успеваемости и посещаемости (контрольные точки) должны быть положительными. Оценка «хорошо» выставляется студенту, правильно решившему обе задачи и полностью ответившему на один из теоретических вопросов, имеющему конспект самостоятельно проработанного материала (по темам практических занятий) и оценки «хорошо» и (или) «отлично» в контрольных точках аттестации. Оценка «отлично» выставляется студенту, выполнившему все задания билета, имеющему конспект самостоятельно проработанного материала (по темам практических занятий) и оценки «хорошо» и (или) «отлично» в контрольных точках аттестации. При устной форме экзамена экзаменатору предоставляется право задавать студенту дополнительные вопросы, а также, помимо теоретических вопросов, давать практические задания по программе данного курса, включающего проработанный и законспектированный студентом материал. При этом неправильные ответы на дополнительные вопросы могут служить основанием для снижения оценки. При невыполнении указанных выше требований студент получает оценку «неудовлетворительно». Порядок ликвидации студентами академической задолженности определяется положением о курсовых экзаменах и зачетах, принятом на заседании Ученого совета от 24.06.2004г., протокол № 15.

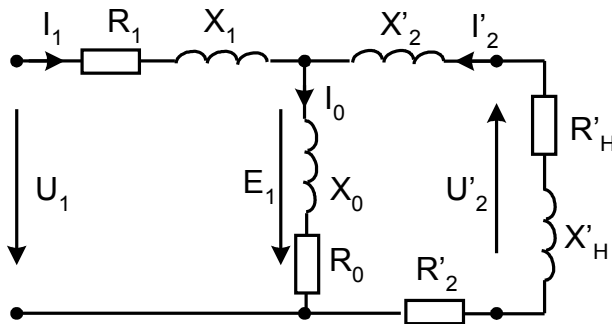
Образцы экзаменационных билетов 1-я часть

АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Утверждено на заседании кафедры
 " " декабря 200 г.
 Заведующий кафедрой
 Утверждаю: _____

Кафедра АППиЭ
 Энергетический фак-т
 Курс 3
 Дисциплина "Электро-
 механика"

Задача. На электрической схеме замещения трансформатора указаны электрические величины и параметры вторичной сети, приведённые к первичной обмотке. Определить их действительные значения, если известно первичное напряжение $U_1 = 5770$ В, величина напряжения на один виток $U_B = 6.79$ В/виток и число витков вторичной обмотки $W_2 = 34$. Сопротивления заданы в омах. Вычислить первичный ток и ЭДС взаимной индукции E_1 . Начальную фазу вторичного приведенного тока принять равной нулю.



Исходные данные:

| | | |
|-----------|------|----------------|
| $U'_2 :=$ | 5464 | B |
| $R_1 :=$ | 3 | $X_1 :=$ 1C |
| $X_2 :=$ | 10.8 | $R'_2 :=$ 1.6C |
| $R_0 :=$ | 20C | $X_0 :=$ 2500C |
| $R'_H :=$ | 301 | $X'_H :=$ 231 |

Задача. Амплитуда основной гармонической МДС обмотки якоря ГГ с расчетной величиной воздушного зазора $\delta' = 2$ см равна $F_{амн} = 9600$ А.
 2. МДС якоря при различных нагрузках в режиме синхронного генератора. Определить амплитуду индукции магнитного поля якоря по продольной и поперечной осям B_{adm} и B_{aqm} при активно-индуктивной нагрузке ($\beta = 50^\circ$) в предположении, что величина зазора по всей окружности одинакова и равна его значению под серединой полюса.

2-я часть

АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Утверждено на заседании кафедры
" " июнь 200 г.
Заведующий кафедрой
Утверждаю: _____

Кафедра АППиЭ
Энергетический фак-т
Курс 3 гр. 442,443,444,446
Дисциплина "Электро-
механика"

9. Контроль Экзаменационный билет №

*1. Уравнения напряжений обмотки статора и ротора АД.
Действующее значение ЭДС взаимной индукции в фазе ротора при неподвижном и при вращающемся роторе.*

Задача. Двухполюсный трехфазный асинхронный двигатель в номинальном режиме потребляет мощность $P_1 = 12,5$ кВт при частоте вращения $n = 2930$ об/мин. Частота сети 50 Гц. Построить механические характеристики двигателя по следующим данным: кратность максимального момента $M_m / M_H = 2,2$, КПД $\eta = 88$ %.

Определить частоту вращения ротора при номинальной нагрузке при снижении напряжения сети на 15%.

знаний

*2. Устройство и принцип действия генератора постоянного тока.
Роль коллектора.*

Задача. Дан двигатель параллельного возбуждения с номинальными данными:

$U_{НОМ} = 220$ В, $I_{НОМ} = 20$ А, частота вращения $n_{НОМ} = 1025$ об/мин, сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0,75$ Ом, сопротивление цепи возбуждения $R_{\text{в}} = 254$ Ом, $\eta = 0,82$. Определить ток возбуждения, номинальный ток якоря, мощность на валу, номинальный вращающий момент, противо- ЭДС и пусковой ток двигателя при пуске без реостата.

Промежуточный контроль знаний студентов по дисциплине предусматривает две контрольные точки в 5 и 6 семестрах, оценки по которым выставляются на основе информации о выполнении лабораторных работ, РГР, а также на основе тестирования теоретических знаний, полученных за прошедший период обучения. Предусмотрено тестирование по темам:

1. Схемы замещения трансформаторов – 5 семестр, 1-я контр. точка.

2. Векторные диаграммы синхронных машин – 5 семестр, 2-я контрольная точка.

3. Схемы замещения асинхронных машин – 6 семестр, 1-я контр. точка.

4. Генераторы постоянного тока – 7 семестр, 2-я контрольная точка.

Для оценки остаточных знаний предусмотрена контрольная работа, которая проводится на практических занятиях.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО ТРАНСФОРМАТОРАМ

1. Определить фазные и линейные значения напряжений и токов в номинальном режиме.

2. Определить параметры схемы замещения, приведенные к первичной обмотке, активную и реактивную составляющие напряжения короткого замыкания, начертить схему замещения трансформатора.

3. Определить число вольт на один виток.

4. Определить доленое значение нагрузки, соответствующее максимальному КПД.

5. Трансформатор включен на параллельную работу с другими такими же трансформаторами. Определить распределение нагрузок и допустимую суммарную нагрузку при $\cos\phi = 0,8$ для следующих случаев:

а) один из трансформаторов включен на ответвление +5%, т.е. коэффициент трансформации увеличен на 5%; другой – на ответвление, соответствующее номинальному напряжению;

б) напряжение короткого замыкания одного из трансформаторов равно 1,2 номинального напряжения короткого замыкания другого трансформатора.

6. Рассчитать наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания.

Примечание. Первичной обмоткой, присоединенной к питающей сети, считать обмотку высшего напряжения.

Рекомендации по выбору исходных данных:

1. Вариант задания на контрольную работу студент выбирает в соответствии с таблицей. Мощность трансформатора берётся по последней цифре шифра, а первичное напряжение – с учётом последней и предпоследней цифр шифра. Шифр студента определяется двумя последними цифрами номера зачётной книжки.

2. При вторичном напряжении $U_2 = 0,525; 3,15; 6,3; 11$ кВ группа соединений $Y/\Delta - 11$;

при $U_2 = 0,4; 0,69$ кВ группа соединений $Y/Y - 0$.

3. Для нечётных предпоследних цифр шифра $u_k = 5,5 \%$; для чётных, в том числе и для нуля, предпоследних цифр шифра $u_k = 6,5 \%$.

4. При расчёте допустимой нагрузки параллельно включённых трансформаторов (п.5 задания) следует исходить из того, что ток наиболее нагруженного трансформатора не должен превышать номинальную величину.

5. При расчёте наибольшего мгновенного значения тока короткого замыкания (п.6 задания) следует иметь ввиду, что фаза первичного напряжения в момент короткого замыкания наиболее неблагоприятна (мгновенное напряжение в момент короткого замыкания равно нулю) и максимум тока наступает через $t = 0,01$ с после короткого замыкания.

Таблица – Исходные данные для контрольной работы по трансформаторам

| Исходные данные | Мощность S , кВ·А | Потери холостого хода P_0 , Вт | Потери короткого замыкания P_k , Вт | Ток холостого хода i_0 , % | Сечение стержня P_c , см ² | Напряжение U_1/U_2 , кВ | | | | | |
|-----------------------|---------------------------|--|--|---------------------------------|---|---------------------------|----------|----------|----------|----------|---------|
| | | | | | | Предпоследняя цифра шифра | | | | | |
| | | | | | | 0,1 | 2,3 | 4,5 | 6,7 | 8,9 | |
| Последняя цифра шифра | 0. | 25 | 105 | 600 | 3,2 | 70 | 10/0,4 | 3/0,525 | 6/0,525 | 10/0,525 | 6/0,4 |
| | 1. | 40 | 150 | 880 | 3,0 | 88 | 10/0,525 | 3/0,69 | 6/0,4 | 10/0,69 | 3/0,525 |
| | 2. | 63 | 220 | 1 280 | 2,8 | 112 | 3/0,69 | 10/0,4 | 6/0,525 | 35/0,69 | 20/0,4 |
| | 3. | 100 | 310 | 1 970 | 2,6 | 140 | 20/0,69 | 3/0,525 | 10/0,4 | 6/0,4 | 35/0,69 |
| | 4. | 160 | 460 | 2 650 | 2,4 | 178 | 20/0,4 | 10/0,525 | 6/0,69 | 35/0,4 | 3/0,69 |
| | 5. | 400 | 920 | 5550 | 2,1 | 280 | 10/0,69 | 20/0,4 | 35/0,525 | 3/0,4 | 6/0,525 |
| | 6. | 1000 | 2 100 | 12200 | 1,4 | 435 | 35/11 | 20/3,15 | 6/0,525 | 10/0,69 | 3/0,69 |
| | 7. | 2500 | 3 900 | 25000 | 1,0 | 700 | 20/6,3 | 35/3,15 | 3/0,69 | 35/11 | 10/3,15 |
| | 8. | 4000 | 5 450 | 33500 | 1,0 | 880 | 35/11 | 20/3,15 | 6/3,15 | 10/0,69 | 3/0,525 |
| 9. | 6300 | 7 650 | 46500 | 0,9 | 1 100 | 20/11 | 35/6,3 | 10/3,15 | 35/11 | 20/3,15 | |

Ниже приведён листинг примера расчёта трансформатора, выполненный в программе Mathcad, рекомендуемый студентам при выполнении контрольной работы.

ПРИМЕР РАСЧЁТА

Exercice 1

Donnée

$$S := 6300$$

Donnée

$$P_0 := 7600$$

Donnée

$$P_k := 46500$$

Donnée %

$$i_0 := 0.8$$

Donnée cm^2

$$\Gamma_c := 1000$$

Donnée

$$U_1 := 35$$

Donnée

$$U_2 := 3.15$$

Donnée %

$$u_k := 7.5$$

Donnée

$$Y/\Delta - 11$$

Частота, Å

$$f := 50$$

Donnée

$$B_c := 1.6$$

Exercice 2

- Donnée

$$U_{\phi 1} := \frac{U_1}{\sqrt{3}}$$

$$U_{\phi 1} = 20.2$$

$$U_{\phi 2} := U_2$$

$$U_{\phi 2} = 3.2$$

Donnée

$$I_{r1} := \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_1}$$

$$I_{r1} = 103.9$$

$$I_{\phi 1} := I_{r1}$$

$$I_{\phi 1} = 103.9$$

Donnée

$$I_{r2} := \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_2}$$

$$I_{r2} = 1155$$

$$I_{\phi 2} := \frac{I_{r2}}{\sqrt{3}}$$

$$I_{\phi 2} = 667$$

2. Înălțimea câmpului magnetic în miez este:

Înălțimea miezului este:

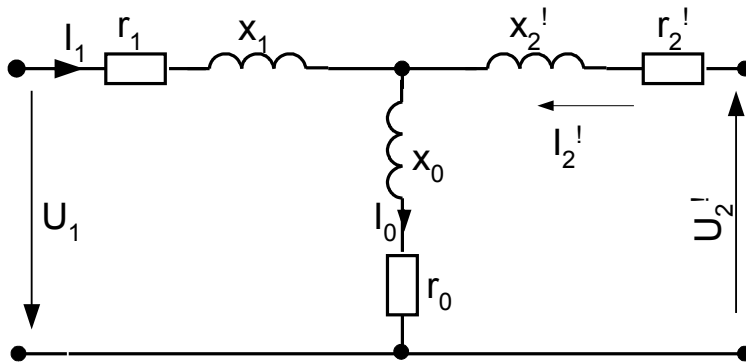


Схема замещения трансформатора

Debitul de aer:

$$I_0 := \frac{i_0}{100} \cdot I_{\phi 1}$$

$$I_0 = 0.831$$

Împedența de sarcină:

$$r_M := \frac{P_0}{3 \cdot I_0^2}$$

$$r_M = 3665$$

$$z_M := \frac{U_{\phi 1} \cdot 10^3}{I_0}$$

$$z_M = 24306$$

$$x_M := \sqrt{z_M^2 - r_M^2}$$

$$x_M = 24028$$

Înălțimea câmpului, A:

$$U_k := \frac{u_k}{100} \cdot U_{\phi 1} \cdot 10^3$$

$$U_k = 1516$$

Înălțimea câmpului, A:

$$z_k := \frac{U_k}{I_{\phi 1}}$$

$$z_k = 14.58$$

Όλο φορτίο Α

$$I_y := I_{y0} \cdot I_{\phi} \quad I_y = 222.2$$

α) Ισχύς εισόδου στα καλώδια 1.2 το μήκος των καλωδίων

$$\Sigma := \frac{S}{u_k} + \frac{S}{1.2 \cdot u_k} \quad \Sigma = 1540$$

$$S_1 := S \cdot \frac{2 \cdot S}{u_k \cdot \Sigma} \quad S_1 = 6873 \quad \text{κΒ} \cdot \text{Α}$$

$$S_2 := S \cdot \frac{2 \cdot S}{1.2 \cdot u_k \cdot \Sigma} \quad S_2 = 5727 \quad \text{κΒ} \cdot \text{Α}$$

Ισχύς εισόδου στα καλώδια, από-ισχύς. Αυτή η ισχύς εισέρχεται στα καλώδια και ούτως ή άλλως παύει να προκύπτει από αυτά

$$S_{\text{π.στ}} := \frac{2 \cdot S}{\frac{2 \cdot S}{u_k \cdot \Sigma}} \quad S_{\text{π.στ}} = 11550 \quad \text{κΒ} \cdot \text{Α}$$

Οπότε, ισχύς εισόδου

$$S_{\text{η.ε.δ}} := 2 \cdot S - S_{\text{π.στ}} \quad S_{\text{η.ε.δ}} = 1050 \quad \text{κΒ} \cdot \text{Α}$$

6. Ισχύς εισόδου στα καλώδια:

Όλο φορτίο

$$k_{y\text{δ}} := 1 + \exp\left(-\pi \cdot \frac{r_k}{x_k}\right) \quad k_{y\text{δ}} = 1.73$$

Όλο φορτίο

$$i_{y\text{δ}} := \frac{100}{u_k} \cdot k_{y\text{δ}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\phi 1} \quad i_{y\text{δ}} = 3396 \quad \text{Α}$$

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Принцип действия трансформатора. Части, из которых состоит главный магнитный поток трансформатора. Какие ЭДС наводятся в обмотках трансформатора главным магнитным потоком? Записать выражения для комплексов этих ЭДС через амплитуду магнитной индукции и амплитуду главного магнитного потока.
2. Причина набора сердечника из листовой стали. Из каких частей состоят магнитные потери трансформатора и от чего они зависят?
3. Коэффициент трансформации и его определение.
4. Влияние насыщения стали сердечника на форму кривой тока холостого хода. Гармонический состав тока.
5. Почему в трехфазном трансформаторе обычного стержневого типа токи холостого хода крайних фаз больше тока средней фазы?
6. Влияние увеличения зазора в стыке между стержнем и якорем на величину тока холостого хода при постоянном действующем значении напряжения и неизменной частоте?
7. Причина отличия формы кривой холостого хода от синусоидальной формы при подведении синусоидального напряжения к первичной обмотке трансформатора.
8. Влияние схем соединения фаз на величину высших гармоник в кривой тока при холостом ходе.
9. Потери трансформатора при холостом ходе и нагрузке.
10. Причина неизменности магнитного потока при переходе от холостого хода к основной нагрузке.
11. Отличие приведенного трансформатора от реального трансформатора. Преимущества при анализе электромагнитных процессов приведенного трансформатора.
12. Физический смысл всех параметров схемы замещения трансформатора при нагрузке. Методы их опытного определения.
13. Напряжение короткого замыкания.
14. Почему при чисто активной нагрузке, подключенной к трансформатору, коэффициент мощности в первичной цепи меньше единицы?
15. Нагрузка, при которой трансформатор имеет максимальный КПД.
16. Явления в трансформаторе, вызывающие токи внезапного короткого замыкания.
17. Группы соединения трансформатора.

ОБРАЗЕЦ БИЛЕТА ДЛЯ ПРОВЕРКИ ОСТАТОЧНЫХ
ЗНАНИЙ

АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Утверждено на заседании кафедры
" " июня 2007 г.
Заведующий кафедрой
Утверждаю: _____

Кафедра АГПиЭ
Энергетический фак-т
Курс 3
Дисциплина: **Электромеханика**

Экзаменационный билет №

1. При замкнутой накоротко вторичной обмотке однофазного трансформатора к обмотке ВН подведено напряжение $U_{1к} = 38$ кВ. В обмотках протекают номинальные токи $I_{1Н} = I_{2Н} = 1100$ А. Потребляемая мощность $P_{1к} = 950$ кВт*. Какие параметры и величины, характеризующие работу трансформатора, можно определить по измеренным данным? Определить эти параметры и величины.

2. Вычислить величину ЭДС возбуждения турбогенератора в режиме номинальной нагрузки при номинальном напряжении $U_{нф} = 230$ В, номинальном токе $I_n = 1800$ А и коэффициенте мощности $\cos\varphi = 0,8$. Активное сопротивление фазы обмотки якоря $R = 0,00162$ Ом. Полное индуктивное сопротивление обмотки якоря $X_l = 0,211$ Ом. Влиянием насыщения пренебречь.

3. Кратко охарактеризовать режимы работы трехфазной асинхронной машины. Как перейти от одного режима к другому?

4. Дан двигатель параллельного возбуждения с номинальными данными:

$U_{ном} = 220$ В, $I_{ном} = 20$ А, частота вращения $n_{ном} = 1025$ об/мин, сопротивление обмотки якоря $R_{я} = 0.75$ Ом, сопротивление цепи возбуждения $R_{в} = 254$ Ом, $\eta = 0.82$. Определить ток возбуждения, номинальный ток якоря, мощность на валу, номинальный вращающий момент, противо- ЭДС и пусковой ток двигателя при пуске без реостата.

Критерий оценки при проверке остаточных знаний.

Для подготовки ответа студенту отводится 120 мин. Каждый билет содержит три теоретических вопроса, сопровождаемых задачами и один теоретический вопрос. Для получения студентом оценки «удовлетворительно» необходимо полностью решить две задачи без теоретических выкладок по вопросам билета и частично ответить на теоретический вопрос. Оценка «хорошо» выставляется студенту, правильно решившему три задачи. Оценка «отлично» выставляется студенту, выполнившему все задания билета. При невыполнении указанных выше требований студент получает оценку «неудовлетворительно».