

Федеральное агентство по образованию  
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГОУВПО «АмГУ»

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой АТППиЭ  
\_\_\_\_\_ А.Н. Рыбалев  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2007 г.

«Электротехника. Электрические машины»  
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ  
для специальности: 140101– Тепловые электрические станции

Составитель: В.М. Пейзель

Благовещенск

2007 г.

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

В.М. Пейзель

Учебно-методический комплекс по дисциплине «Электротехника. Электрические машины» для студентов очной формы обучения специальности 140101– «Тепловые электрические станции» – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2007.

Учебно-методический комплекс ориентирован на оказание помощи студентам очной формы обучения по специальности 140101– «Тепловые электрические станции» для формирования специальных знаний в области эксплуатации электрических машин различного назначения и типов.

© Амурский государственный университет, 2007  
© В.М. Пейзель

### *Аннотация*

Настоящий УМКД предназначен в помощь студентам всех форм обучения теплоэнергетических специальностей при изучении дисциплины «Электротехника. Электрические машины».

При его написании учитывались рекомендации из положения «Об учебно-методическом комплексе дисциплины». УМКД разрабатывался на основе утвержденных в установленном порядке Государственного образовательного стандарта, типовых учебных планов и рабочей программы дисциплины, а также нормативных документов Министерства образования и науки Российской Федерации по вопросам организации учебно-воспитательного процесса. Исключением стали следующие пункты, которые не предусматриваются рабочей программой дисциплины:

- примерная рабочая программа дисциплины
- методические указания по выполнению курсовых проектов (работ);
- комплекты заданий для лабораторных работ, контрольных работ, домашних заданий.
- комплекты заданий для выполнения курсового проекта
- перечень программных продуктов, реально используемых в практике деятельности выпускников и соответствующее учебно-методическое пособие, раскрывающее особенности и перспективы использования данных программных продуктов.

## *Содержание*

1. Рабочая программа дисциплины.....	5
2. График самостоятельной работы студентов по дисциплине на каждый семестр с указанием ее содержания, объема в часах, сроков и форм контроля... .....	24
3. Методические рекомендации по проведению практических и семинарских занятий .....	35
4. Методические рекомендации по проведению лабораторных работ .....	37
5. Конспект лекций.....	39
6. Методические указания по проведению лабораторных работ.....	157
7. Методические указания по проведению практических и семинарских занятий .....	158
8. Методические указания по применению современных информационных технологий для преподавания учебной дисциплины.....	210
9. Методические указания профессорско-преподавательскому составу по организации межсессионного и экзаменационного контроля знаний студентов (материалы по контролю качества образования).....	210
10. Тестовые задания для проверки качества обучения.....	211
11. Контрольные вопросы к зачету(экзамену).....	258
12. Карта обеспеченности дисциплины кадрами профессорско-преподавательского состава.....	261

**1. Программа дисциплины, соответствующая требованиям  
государственного образовательного стандарта.**

Федеральное агентство по образованию РФ  
Амурский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по УНР  
\_\_\_\_\_ Е.С. Астапова

"\_\_" \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

по дисциплине «Электротехника. Электрические машины»  
для специальности 140101– Тепловые электрические станции

Курс 3

Семестр 5

Лекции – 54 часа

Зачет – 5 семестр

Практические занятия –18 часов

Лабораторные работы – 18 часов

Самостоятельная работа – часов

Всего часов –

Составитель: Пейзель В.М., старший преподаватель

Факультет - Энергетический

Кафедра Автоматизации производственных процессов и энергетики

2006 г.

Рабочая программа составлена на основании Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению «Теплоэнергетика» для специальности 100500 – Тепловые электрические станции.

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры энергетики

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_ г. (протокол № \_\_\_\_\_)

Зав.кафедрой \_\_\_\_\_ (А.Н. Рыбалев)

Рабочая программа одобрена на заседании учебно-методического совета направления (специальности) \_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_ г. (протокол № \_\_\_\_\_)

Председатель УМС \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_)

**СОГЛАСОВАНО**  
**Начальник УМУ**

**СОГЛАСОВАНО**  
**Начальник УМС факультета**

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_ г.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_ г.

**СОГЛАСОВАНО**  
**Заведующий выпускающей**  
**кафедры**

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_ г.

## **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ, ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ**

### **1.1 Цель преподавания дисциплины**

Целью изучения раздела «Электрические машины» курса «Электротехника» для специальности 140101. является теоретическая и практическая подготовка специалистов для приобретения необходимых в профессиональной деятельности знаний в области эксплуатации электрических машин различного назначения и типов.

### **1.2 Задачи изучения дисциплины**

1. Ознакомление с конструктивным устройством и принципом действия электрических машин различных типов.
2. Ознакомление с эксплуатационными особенностями электрических машин в различных режимах работы.
3. Ознакомление с электрическими и механическими параметрами электрических машин.
4. Ознакомление с принципами управления электрическими машинами.

### **1.3 Дисциплины, освоение которых необходимо при изучении данной дисциплины:**

«Высшая математика»

«Физика»

«Теоретическая и прикладная механика»

«Общая электротехника»

## **2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **2.1 Стандарт: ОПД.Ф.04 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА.**

Общая электротехника: электрические цепи постоянного тока; электрические цепи переменного тока; трехпроводные и четырехпроводные трехфазные цепи; переходные процессы в электрических цепях; линейные и нелинейные цепи; магнитные цепи; *электрические машины постоянного тока; асинхронные машины;*

*синхронные машины; трансформаторы;* основы электропривода и электроснабжения; основы электроники и импульсных устройств.

## **2.2 Наименование тем, их содержание и объем в часах.**

### **Тема 1.**

#### **Общие сведения об электрических машинах (4 часа).**

Назначение и принципы действия электрических машин. Закон электромагнитной индукции. Закон Ампера. Классификация электрических машин. Преобразование энергий в электрических машинах. Обратимость электрических машин. Техничко – экономические требования к электрическим машинам. Характеристики электрических машин. Понятие об устойчивой работе электрических машин.

### **Тема 2.**

#### **Стандартизация основных параметров и качество электрических машин. ( 6 часов).**

Номинальные данные электрических машин. Стандартизация основных параметров электрических машин. Нагревание электрических машин. Способы охлаждения электрических машин. Конструктивные формы исполнения электрических машин. Материалы, применяемые в электрических машинах. Качество и надежность электрических машин. Вибрация электрических машин. Шумы в электрических машинах. Серии электрических машин.

### **Тема 3.**

#### **Трансформаторы. (10 часов).**

Назначение и область применения трансформаторов. Принцип действия трансформатора. Конструкция трансформатора. Схемы соединения обмоток трансформатора. Номинальные параметры трансформатора. Режимы работы трансформатора. Процессы в трансформаторе при холостом ходе. Работа

трансформатора под нагрузкой. Опыт короткого замыкания. Схема замещения трансформатора. Векторная диаграмма трансформатора. Группы соединения трансформатора. Расчетное определение параметров трансформатора. Внешняя характеристика трансформатора. Коэффициент полезного действия трансформаторов. Регулирование вторичного напряжения трансформаторов. Параллельная работа трансформаторов. Многообмоточные трансформаторы и автотрансформаторы.

#### **Тема 4.**

##### **Асинхронные машины (16 часов).**

Назначение и области применения асинхронных машин. Устройство и принцип действия асинхронных машин. Потери и КПД асинхронной машины. Электромагнитный момент асинхронной машины. Конструкция и трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Конструкция трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором. Основные уравнения и электрическая схема замещения асинхронного двигателя. Механическая характеристика трехфазного асинхронного двигателя. Рабочие характеристики трехфазных асинхронных двигателей. Пусковые свойства асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Асинхронные двигатели в тормозных режимах. Однофазные и конденсаторные асинхронные двигатели. Асинхронные машины нетрадиционной конструкции: индукционный регулятор напряжения и фазорегулятор, асинхронный двигатель с экранированными полюсами, линейный асинхронный двигатель. Автоматическое управление асинхронными двигателями.

#### **Тема 5.**

##### **Синхронные машины. (12 часов).**

Назначение и области применения синхронных машин. Способы возбуждения синхронных машин. Типы синхронных машин и их конструктивные

особенности. Устройство и принцип действия синхронного генератора. Основные уравнения и характеристики синхронных генераторов. Серии синхронных генераторов. Синхронные двигатели и компенсаторы. Принцип работы и пуск синхронного двигателя. Характеристики синхронных двигателей. Серии синхронных двигателей. Назначение и принцип работы синхронных компенсаторов. Серии синхронных компенсаторов. Синхронные машины нетрадиционной конструкции: индукторные синхронные машины, синхронные генераторы с когтеобразными полюсами, синхронные машины с постоянными магнитами, синхронные реактивные двигатели, гистерезисные двигатели, реактивные двигатели.

### **Тема 6.**

#### **Машины постоянного тока. - 6 часов.**

Устройство и принцип действия машин постоянного тока. Обмотки якорей машин постоянного тока. Генераторы постоянного тока. Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения. Двигатели постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения. Двигатели постоянного тока смешанного возбуждения. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока. Универсальные коллекторные двигатели. Машины постоянного тока нетрадиционной конструкции: машины постоянного тока с постоянными магнитами, вентильные двигатели постоянного тока. Серии электрических машин постоянного тока общего назначения.

### **2.3 Практические занятия (18 часов)**

№ темы	Название темы	Кол-во часов
1	Электромагнитные процессы в трансформаторе.	2
2	Параметры, векторная диаграмма и схемы замещения трансформаторов.	2
3	Работа асинхронной машины под нагрузкой. Схема замещения асинхронной машины.	2
4	Расчет электромеханических характеристик асинхронной машины .	2

5	Расчет потерь энергии, активного и индуктивного сопротивления, частоты вращения ротора при номинальной и максимальной нагрузках асинхронного двигателя	2
6.	Синхронные машины. Основные уравнения и векторная диаграмма синхронного генератора.	2
7.	Характеристики синхронных двигателей.	2
8.	Характеристики генераторов постоянного тока	2
9.	Пуск, изменение режима работы и регулирование скорости двигателя постоянного тока	2

Цель практических занятий – научить студентов выполнять расчеты параметров и характеристик электрических машин при нормальных и особых режимах работы. Практические занятия проводятся по учебным пособиям [1].

#### 2.4 Лабораторные работы

№ темы	Название темы	Кол-во часов
1.	Общее ознакомление с лабораторными стендами лаборатории электрических машин. Правила выполнения и оформления лабораторных работ на установках. Правила техники безопасности при работе в лаборатории электрических машин.	2
2.	Исследование однофазного трансформатора	4 часа
3.	Исследование синхронного генератора	4 часа
4.	Исследование механических характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	4 часа
5.	Исследование двигателя постоянного тока	4 часа

#### 2.4 Самостоятельная работа студентов

Тематика и распределение времени на самостоятельную работу студентов представлена в разделе 4.

#### 2.5. Перечень и темы промежуточных форм контроля знаний

К промежуточным формам контроля знаний относятся:

- блиц-опрос на лекциях по пройденному материалу;
- решение домашних заданий с последующей их проверкой на практических занятиях;
- тестирование по темам в течение семестра для оценки знаний на дату контрольной точки

- трансформаторы
- асинхронные и синхронные машины

## **2.6. Вопросы к зачету.**

1. Назначение и принципы действия электрических машин .
2. Закон электромагнитной индукции. Закон Ампера.
3. Классификация электрических машин.
4. Преобразование энергий в электрических машинах.
5. Обратимость электрических машин.
6. Техничко – экономические требования к электрическим машинам.
7. Характеристики электрических машин.
8. Понятие об устойчивой работе электрических машин.
9. Номинальные данные электрических машин.
10. Стандартизация основных параметров электрических машин.
11. Нагревание электрических машин.
12. Способы охлаждения электрических машин.
13. Конструктивные формы исполнения электрических машин.
14. Материалы, применяемые в электрических машинах.
15. Качество и надежность электрических машин.
16. Вибрация электрических машин.
17. Шумы в электрических машинах.
18. Серии электрических машин.
19. Назначение и область применения трансформаторов.
20. Принцип действия трансформатора.
21. Конструкция трансформатора.
22. Схемы соединения обмоток трансформатора.
23. Номинальные параметры трансформатора.
24. Режимы работы трансформатора.
25. Процессы в трансформаторе при холостом ходе.
26. Работа трансформатора под нагрузкой.
27. Опыт короткого замыкания.

28. Схема замещения трансформатора.
29. Векторная диаграмма трансформатора.
30. Группы соединения трансформатора.
31. Расчетное определение параметров трансформатора.
32. Внешняя характеристика трансформатора.
33. Коэффициент полезного действия трансформаторов.
34. Регулирование вторичного напряжения трансформаторов.
35. Параллельная работа трансформаторов.
36. Многообмоточные трансформаторы и автотрансформаторы.
37. Назначение и области применения асинхронных машин.
38. Устройство и принцип действия асинхронных машин.
39. Потери и КПД асинхронной машины.
40. Электромагнитный момент асинхронной машины.
41. Конструкция и трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
42. Конструкция трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором.
43. Основные уравнения и электрическая схема замещения асинхронного двигателя.
44. Механическая характеристика трехфазного асинхронного двигателя.
45. Рабочие характеристики трехфазных асинхронных двигателей.
46. Пусковые свойства асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором.
47. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.
48. Асинхронные двигатели в тормозных режимах.
49. Однофазные и конденсаторные асинхронные двигатели.
50. Асинхронные машины нетрадиционной конструкции: индукционный регулятор напряжения и фазорегулятор, асинхронный двигатель с экранированными полюсами, линейный асинхронный двигатель.
51. Автоматическое управление асинхронными двигателями.
52. Назначение и области применения синхронных машин.

53. Способы возбуждения синхронных машин.
54. Типы синхронных машин и их конструктивные особенности.
55. Устройство и принцип действия синхронного генератора.
56. Основные уравнения и характеристики синхронных генераторов.
57. Серии синхронных генераторов.
58. Синхронные двигатели и компенсаторы.
59. Принцип работы и пуск синхронного двигателя.
60. Характеристики синхронных двигателей.
61. Серии синхронных двигателей.
62. Назначение и принцип работы синхронных компенсаторов.
63. Серии синхронных компенсаторов.
64. Синхронные машины нетрадиционной конструкции: индукторные синхронные машины, синхронные генераторы с когтеобразными полюсами, синхронные машины с постоянными магнитами, синхронные реактивные двигатели, гистерезисные двигатели, реактивные двигатели.
65. Устройство и принцип действия машин постоянного тока.
66. Обмотки якорей машин постоянного тока.
67. Генераторы постоянного тока.
68. Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения.
69. Двигатели постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения.
70. Двигатели постоянного тока смешанного возбуждения.
71. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока.
72. Универсальные коллекторные двигатели.
73. Машины постоянного тока нетрадиционной конструкции: машины постоянного тока с постоянными магнитами, вентильные двигатели постоянного тока.
74. Серии электрических машин постоянного тока общего назначения.

### **3. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

#### **3.1 Основная литература**

1. Кацман М.М. «Электрические машины» Учебник для ВУЗов М., Высшая школа, 2001 – 463 с.
2. Кацман М.М. «Справочник по электрическим машинам» М., Издательский центр «Академия». 2005 - 480 с.
3. Березкина Т.Ф., Гусев Н.Г., Масленников В.В. «Задачник по общей электротехнике с основами электроники» М., Высшая школа, 2001-377 с.
4. М.М. Кацман «Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу» М., Высшая школа. 2000 – 214 с.
5. А.И. Вольдек, В.В. Попов «Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы.- СПб.: Питер, 2007.- 320 с.
6. А.И. Вольдек, В.В. Попов «Электрические машины. Машины переменного тока.- СПб.: Питер, 2007.- 350 с.
7. В.И. Читечан. «Электрические машины: Сборник задач».- М.: Высшая школа, 1988.-231с.

#### **3.2 Дополнительная литература**

1. Токарев Б.Ф. «Электрические машины» М., Энергоатомиздат, 1990 – 623 с.
2. Шпанненберг Х. «Электрические машины. 1000 понятий для практиков: Справочник».- М.: Энергоатомиздат, 1988.-252с.

#### **3.3 Методические и наглядные материалы, используемые в учебном процессе**

##### **3.3.1 Методические пособия**

- В.И. Усенко, В.Л. Русинов, А.С. Истомин «Трансформаторы: теория, задачи и решения» Учебное пособие. Благовещенск, Амурский государственный университет, 2005 – 144 с.

### 3.3.2 Технические средства обучения 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. Истомин. 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

#### 4 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА ДИСЦИПЛИНЫ

№ недели	№ темы	Вопросы, изучаемые на лекции	Занятия (номера)		Используемые наглядные и методические пособия	Самостоятельная работа студентов		Формы контроля
			Практич.	лаборат		Содержание	Час	
1	2	3	4		5	6	7	8
1	1	Назначение и принципы действия электрических машин .Закон электромагнитной индукции. Закон Ампера. Классификация электрических машин.	№1	№1	Учебное пособие к практическим занятиям	Подготовка к опросу по входному контролю знаний	2	Зачет
	1	Преобразование энергий в электрических машинах. Обратимость электрических машин. Техничо – экономические требования к электрическим машинам. Характеристики электрических машин. Понятие об устойчивой работе электрических машин.				Подготовка к блиц - опросу по теме 1	2	Зачет
2	2	Номинальные данные электрических машин. Стандартизация основных параметров электрических машин.				Подготовка к лабораторной работе	2	Опрос по теме 1 Зачет
3	2	Нагревание электрических машин. Способы охлаждения электрических машин. Конструктивные формы исполнения электрических машин. Материалы, применяемые в	№2	№2	Учебное пособие к лабораторным работам  Учебное пособие к	Решение задач	4	Проверка самостоятельно решенных задач у доски Зачет

		электрических машинах.			практическим занятиям			
	2	Качество и надежность электрических машин. Вибрация электрических машин. Шумы в электрических машинах. Серии электрических машин.				Подготовка к опросу по теме 2	2	Зачет
4	3	Конструкция трансформатора. Схемы соединения обмоток трансформатора. Номинальные параметры трансформатора.				Подготовка отчета по лабораторной работе  Подготовка к лабораторной работе Решение задач	2  2 2	Опрос по теме 2 Зачет
5	3	Процессы в трансформаторе при холостом ходе. Работа трансформатора под нагрузкой.	№3	№3	Учебное пособие к лабораторным работам  Учебное пособие к практическим занятиям			Прием отчета по лабораторной работе Проверка самостоятельно решенных задач у доски Зачет
	3	Схема замещения трансформатора. Векторная диаграмма трансформатора. Опыт короткого замыкания.						Тестирование по карточкам с выставлением оценок по пятибалльной системе Зачет
6	3	Группы соединения трансформатора. Расчетное определение параметров				Подготовка к лабораторной работе.	2	Зачет

		трансформатора. Внешняя характеристика трансформатора. Коэффициент полезного действия трансформаторов.				Подготовка отчета по лабораторной работе Решение задач	2 2	
7	3	Регулирование вторичного напряжения трансформаторов. Параллельная работа трансформаторов. Многообмоточные трансформаторы и автотрансформаторы.	№4	№4	Учебное пособие к лабораторным работам  Учебное пособие к практическим занятиям	Подготовка к опросу по теме 3	4 4	Прием отчета по лабораторной работе  Проверка самостоятельно решенных задач у доски Зачет
	4	Назначение и области применения асинхронных машин. Устройство и принцип действия асинхронных машин.						Опрос по теме 3 Зачет
8	4	Потери и КПД асинхронной машины. Электромагнитный момент асинхронной машины.				Подготовка к лабораторной работе  Подготовка отчета по лабораторной работе  Решение задач	2  2 2	Зачет
9	4	Конструкция и трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Конструкция трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором.	№5	№5	Учебное пособие к лабораторным работам  Учебное пособие к практическим занятиям			Прием отчета по лабораторной работе  Проверка самостоятельно решенных задач у доски

								Зачет
	4	Основные уравнения и электрическая схема замещения асинхронного двигателя. Механическая характеристика трехфазного асинхронного двигателя. Рабочие характеристики трехфазных асинхронных двигателей.						Зачет
10	4	Пусковые свойства асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором.				Подготовка к лабораторной работе	2	Зачет
					Подготовка отчета по лабораторной работе	2		
					Решение задач	2		
11	4	Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Асинхронные двигатели в тормозных режимах.	№6	№6	Учебное пособие к лабораторным работам  Учебное пособие к практическим занятиям			Прием отчета по лабораторной работе Проверка самостоятельно решенных задач у доски Зачет
	4	Однофазные и конденсаторные асинхронные двигатели. Асинхронные машины нетрадиционной конструкции: индукционный регулятор напряжения и фазорегулятор, асинхронный двигатель с экранированными						Зачет

		полюсами, линейный асинхронный двигатель.						
12	4	Автоматическое управление асинхронными двигателями.				Подготовка к лабораторной работе	2	Зачет
						Подготовка отчета по лабораторной работе	2	
						Решение задач	2	
13	5	Назначение и области применения синхронных машин. Способы возбуждения синхронных машин. Типы синхронных машин и их конструктивные особенности.	№7	№7	Учебное пособие к лабораторным работам  Учебное пособие к практическим занятиям	Подготовка к опросу по теме 4	4	Прием отчета по лабораторной работе Проверка самостоятельно решенных задач у доски Зачет
	5	Устройство и принцип действия синхронного генератора. Основные уравнения и характеристики синхронных генераторов.						Опрос по теме 4 Тестирование по карточкам с выставлением оценок по пятибалльной системе Зачет
14	5	Серии синхронных генераторов. Синхронные двигатели и компенсаторы.				Подготовка к лабораторной работе	2	Зачет
						Подготовка отчета по лабораторной работе	2	
						Решение задач	2	

15	5	Синхронные двигатели и компенсаторы. Принцип работы и пуск синхронного двигателя. Характеристики синхронных двигателей. Серии синхронных двигателей.	№8	№8	Учебное пособие к лабораторным работам  Учебное пособие к практическим занятиям			Прием отчета по лабораторной работе Проверка самостоятельно решенных задач у доски Зачет
	5	Назначение и принцип работы синхронных компенсаторов. Серии синхронных компенсаторов.						Зачет
16	5	Синхронные машины нетрадиционной конструкции: индукторные синхронные машины, синхронные генераторы с когтеобразными полюсами, синхронные машины с постоянными магнитами, синхронные реактивные двигатели, гистерезисные двигатели, реактивные двигатели.				Подготовка к лабораторной работе Подготовка отчета по лабораторной работе Решение задач Подготовка к опросу по теме 5	2  2  2 4	Зачет
17	6	Устройство и принцип действия машин постоянного тока. Обмотки якорей машин постоянного тока. Генераторы постоянного тока. Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения. Двигатели постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения. Двигатели	№9	№9	Учебное пособие к лабораторным работам  Учебное пособие к практическим занятиям			Прием отчета по лабораторной работе  Проверка самостоятельно решенных задач у доски Опрос по теме 5 Зачет

		постоянного тока смешанного возбуждения..						
	6	Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока. Универсальные коллекторные двигатели.						Зачет
18	8	Машины постоянного тока нетрадиционной конструкции: машины постоянного тока с постоянными магнитами, вентильные двигатели постоянного тока. Серии электрических машин постоянного тока общего назначения.						Зачет

**2. График самостоятельной работы студентов по дисциплине на каждый семестр с указанием ее содержания, объема в часах, сроков и форм контроля.**

№ недели	№ темы	Тема	Самостоятельная работа студентов		Формы контроля
			Содержание	Час	
1	2	3	4	5	6
1	1	Назначение и принципы действия электрических машин .Закон электромагнитной индукции. Закон Ампера. Классификация электрических машин.	Подготовка к опросу по входному контролю знаний	2	Зачет
	1	Преобразование энергий в электрических машинах. Обратимость электрических машин. Технико – экономические требования к электрическим машинам. Характеристики электрических машин. Понятие об устойчивой работе электрических машин.	Подготовка к блиц - опросу по теме 1	2	Зачет

2	2	Номинальные данные электрических машин. Стандартизация основных параметров электрических машин.	Подготовка к лабораторной работе	2	Опрос по теме 1 Зачет
3	2	Нагревание электрических машин. Способы охлаждения электрических машин. Конструктивные формы исполнения электрических машин. Материалы, применяемые в электрических машинах.	Решение задач	4	Проверка самостоятельно решенных задач у доски Зачет
	2	Качество и надежность электрических машин. Вибрация электрических машин. Шумы в электрических машинах. Серии электрических машин.	Подготовка к опросу по теме 2	2	Зачет
4	3	Конструкция трансформатора. Схемы	Подготовка отчета по	2	Опрос по

		соединения обмоток трансформатора. Номинальные параметры трансформатора.	лабораторной работе  Подготовка к лабораторной работе Решение задач	2  2	теме 2 Зачет
5	3	Процессы в трансформаторе при холостом ходе. Работа трансформатора под нагрузкой.			Прием отчета по лабораторной работе Проверка самостоятельно решенных задач у доски Зачет
	3	Схема замещения трансформатора. Векторная диаграмма трансформатора. Опыт короткого замыкания.			Тестирование по карточкам с выставлением оценок по пятибалльной

					ой системе Зачет
6	3	Группы соединения трансформатора. Расчетное определение параметров трансформатора. Внешняя характеристика трансформатора. Коэффициент полезного действия трансформаторов.	Подготовка к лабораторной работе. Подготовка отчета по лабораторной работе Решение задач	2  2  2	Зачет
7	3	Регулирование вторичного напряжения трансформаторов. Параллельная работа трансформаторов. Многообмоточные трансформаторы и автотрансформаторы.	Подготовка к опросу по теме 3	4  4	Прием отчета по лабораторной работе  Проверка самостоятельно решенных задач у доски Зачет

	4	Назначение и области применения асинхронных машин. Устройство и принцип действия асинхронных машин.			Опрос по теме 3 Зачет
8	4	Потери и КПД асинхронной машины. Электромагнитный момент асинхронной машины.	Подготовка к лабораторной работе  Подготовка отчета по лабораторной работе  Решение задач	2  2  2	Зачет
9	4	Конструкция и трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Конструкция трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором.			Прием отчета по лабораторной работе  Проверка самостоятельно решенных задач у доски Зачет

	4	Основные уравнения и электрическая схема замещения асинхронного двигателя. Механическая характеристика трехфазного асинхронного двигателя. Рабочие характеристики трехфазных асинхронных двигателей.			Зачет
10	4	Пусковые свойства асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором.	Подготовка к лабораторной работе  Подготовка отчета по лабораторной работе  Решение задач	2  2  2	Зачет
11	4	Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Асинхронные двигатели в тормозных режимах.			Прием отчета по лабораторной работе Проверка самостоятел

					бно решенных задач у доски Зачет
	4	Однофазные и конденсаторные асинхронные двигатели. Асинхронные машины нетрадиционной конструкции: индукционный регулятор напряжения и фазорегулятор, асинхронный двигатель с экранированными полюсами, линейный асинхронный двигатель.			Зачет
12	4	Автоматическое управление асинхронными двигателями.	Подготовка к лабораторной работе	2	Зачет
			Подготовка отчета по лабораторной работе	2	
			Решение	2	

			задач		
13	5	Назначение и области применения синхронных машин. Способы возбуждения синхронных машин. Типы синхронных машин и их конструктивные особенности.	Подготовка к опросу по теме 4	4	Прием отчета по лабораторной работе Проверка самостоятельности решенных задач у доски Зачет
	5	Устройство и принцип действия синхронного генератора. Основные уравнения и характеристики синхронных генераторов.			Опрос по теме 4 Тестирование по карточкам с выставлением оценок по пятибалльной системе Зачет
14	5	Серии синхронных генераторов. Синхронные двигатели и компенсаторы.	Подготовка к лабораторной работе	2	Зачет

			Подготовка отчета по лабораторной работе	2	
			Решение задач	2	
15	5	Синхронные двигатели и компенсаторы. Принцип работы и пуск синхронного двигателя. Характеристики синхронных двигателей. Серии синхронных двигателей.			Прием отчета по лабораторной работе Проверка самостоятельно решенных задач у доски Зачет
	5	Назначение и принцип работы синхронных компенсаторов. Серии синхронных компенсаторов.			Зачет
16	5	Синхронные машины нетрадиционной конструкции: индукторные синхронные машины, синхронные	Подготовка к лабораторной работе	2	Зачет
			Подготовка	2	

		генераторы с когтеобразными полюсами, синхронные машины с постоянными магнитами, синхронные реактивные двигатели, гистерезисные двигатели, реактивные двигатели.	а отчета по лабораторной работе Решение задач Подготовк а к опросу по теме 5	2 4	
17	6	Устройство и принцип действия машин постоянного т ока. Обмотки якорей машин постоянного тока Генераторы постоянного тока. Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения. Двигатели постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения. Двигатели постоянного тока смешанного возбуждения..			Прием отчета по лабораторной работе  Проверка самостоятельно решенных задач у доски Опрос по теме 5 Зачет
	6	Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока.			Зачет

		Универсальные коллекторные двигатели.			
18	8	Машины постоянного тока нетрадиционной конструкции: машины постоянного тока с постоянными магнитами, вентильные двигатели постоянного тока. Серии электрических машин постоянного тока общего назначения.			Зачет

### **3. Методические рекомендации по проведению семинарских и практических занятий.**

Практические занятия предусмотрены в рабочей программе в объеме 18 часов. Тематика практических занятий представлена в таблице.

№ темы	Название темы	Кол-во часов
1	Электромагнитные процессы в трансформаторе.	2
2	Параметры, векторная диаграмма и схемы замещения трансформаторов.	2
3	Работа асинхронной машины под нагрузкой. Схема замещения асинхронной машины.	2
4	Расчет электромеханических характеристик асинхронной машины .	2
5	Расчет потерь энергии, активного и индуктивного сопротивления, частоты вращения ротора при номинальной и максимальной нагрузках асинхронного двигателя	2
6.	Синхронные машины. Основные уравнения и векторная диаграмма синхронного генератора.	2
7.	Характеристики синхронных двигателей.	2
8.	Характеристики генераторов постоянного тока	2
9.	Пуск, изменение режима работы и регулирование скорости двигателя постоянного тока	2

Цель практических занятий – научить студентов выполнять расчеты параметров и характеристик электрических машин при нормальных и особых режимах работы. Практические занятия проводятся по учебным пособиям: .

8. Березкина Т.Ф., Гусев Н.Г., Масленников В.В. «Задачник по общей электротехнике с основами электроники» М., Высшая школа, 2001-377 с.
9. В.И. Читечан. «Электрические машины: Сборник задач».- М.: Высшая школа, 1988.-231с.
- 10.В.И. Усенко, В.Л. Русинов, А.С. Истомина «Трансформаторы: теория, задачи и решения» Учебное пособие. Благовещенск, Амурский государственный университет, 2005 – 144 с.

В УМКД «Методические указания к практическим занятиям» приведены задачи с решениями по всем темам курса.

№ темы	№ задач	Вопросы для самостоятельной работы
3	1-10 раздела «Трансформаторы»	Процессы в трансформаторе при холостом ходе. Работа трансформатора под нагрузкой. Опыт короткого замыкания. Схема замещения трансформатора. Векторная диаграмма трансформатора. Группы соединения трансформатора. Расчетное определение параметров трансформатора. Внешняя характеристика трансформатора. Коэффициент полезного действия трансформаторов.
4	1-4 раздела «Асинхронные машины»	Потери и КПД асинхронной машины. Электромагнитный момент асинхронной машины. Основные уравнения и электрическая схема замещения асинхронного двигателя.
5	1-10 раздела «Синхронные машины»	Режимы работы СМ. Характеристики СМ. Основные уравнения СМ . Потери и кпд СМ
6.	1-10 раздела «Машины постоянного тока»	Генераторы постоянного тока. Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения. Двигатели постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения. Двигатели постоянного тока смешанного возбуждения. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока Потери и кпд машин постоянного тока.

При подготовке ответов на вопросы для самостоятельной работы студентам рекомендуется пользоваться программой MathCAD для построения графиков и выполнения серий расчетов.

#### **4. Методические рекомендации по проведению лабораторных занятий.**

Лабораторные занятия предусмотрены в рабочей программе в объеме 18 часов. Тематика лабораторных занятий представлена в таблице.

№ темы	Название темы	Кол-во часов
1.	Общее ознакомление с лабораторными стендами лаборатории электрических машин. Правила выполнения и оформления лабораторных работ на установках. Правила техники безопасности при работе в лаборатории электрических машин.	2
2.	Исследование однофазного трансформатора	4 часа
3.	Исследование синхронного генератора	4 часа
4.	Исследование механических характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	4 часа
5.	Исследование двигателя постоянного тока	4 часа

Лабораторные занятия проводятся по учебным пособиям:

1. Я.В. Кривохижа, А.С. Истомина, А.Е. Серов «Машины постоянного тока». Учебное пособие. Благовещенск, Амурский государственный университет, 2002

2. Я.В. Кривохижа, А.Е. Серов «Трансформаторы: Лабораторные работы». Учебное пособие. Благовещенск, Амурский государственный университет, 2002

3. Я.В. Кривохижа, А.Е. Серов «Электрические машины переменного тока». Учебное пособие. Благовещенск, Амурский государственный университет, 2001

Лабораторные работы проводятся в следующей последовательности:

1. Инструктаж по технике безопасности.
2. Теоретический опрос и допуск к работе.
3. Проведение экспериментов на лабораторных стендах.
4. Предварительная обработка результатов экспериментов.

5. Выводы по проделанной работе.
6. Защита отчетов.
7. Оформление отчетов.

#### Список рекомендуемой литературы

11. М.М. Кацман «Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу» М., Высшая школа. 2000 – 214 с.
12. А.И. Вольдек, В.В. Попов «Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы.- СПб.: Питер, 2007.- 320 с.
13. А.И. Вольдек, В.В. Попов «Электрические машины. Машины переменного тока.- СПб.: Питер, 2007.- 350 с.

## 5. Краткий конспект лекций

### Тема 1.

#### 1. Общие сведения об электрических машинах

##### *1.1. Основные этапы развития электромашиностроения.*

Основы создания электрических машин были заложены в начале девятнадцатого века М. Фарадеем, открывшим закон электромагнитной индукции и установившим возможность взаимного преобразования электрической и механической энергий.

Важную роль в создании электрических машин имели работы П. Барлоу, Ф. Араго, Д. Максвелла и Э. Ленца, установившего принцип обратимости электрических машин.

Русским учеными Б.С. Якоби и М.О. Доливо – Добровольским были разработаны и созданы конструкции электродвигателей, являющихся прототипами современных электрических машин.

В начале двадцатого века были созданы основные типы электрических машин и разработаны ключевые положения теории электромашиностроения. Большое значение в этот период имели работы Э. Арнольда, А. Блонделя, Л. Дрейфуса, К.А. Круга, Кулебякина, К.И. Шенфера, а также, советских ученых: Касьянова, Пиотровского, Костенко, Петрова, Вольдека и других.

##### *1.2. Назначение электрических машин*

***Электрическая машина*** представляет собой ***электромеханическое устройство***, предназначенное для преобразования либо механической энергии в электрическую (электрический ***генератор***), либо электрической энергии в механическую (электрический ***двигатель***).

К электрическим машинам следует отнести также ***трансформатор***. Строго говоря, трансформатор не является электрической машиной, т.к. в нем не происходит превращение одного вида энергии в другой, однако физические процессы, происходящие в трансформаторе, и уравнения, описывающие эти процессы, аналогичны процессам, происходящим в во вращающихся электрических машинах.

Преобразование электрической энергии одного напряжения в электроэнергию другого напряжения посредством электромагнитной индукции осуществляется с помощью электромагнитного устройства, называемого ***трансформатором***.

Диапазон мощностей электрических машин очень широк – от долей ватта до тысяч мегаватт. Большинство электрических машин используется в качестве электродвигателей, трансформаторов, меньшая часть – в качестве генераторов.

***Трансформаторы*** широко используются для передачи и распределения электроэнергии, вырабатываемой на электростанциях (силовые трансформаторы), для питания электродуговых печей (сварочные), для

измерения электрических величин (измерительные), для преобразования числа фаз и частоты, в устройствах связи, радио, телевидения, системах автоматики.

**Электродвигатели** являются основным элементом электропривода рабочих машин. Хорошая управляемость электрической энергии, простота ее распределения, доставки и преобразования в механическую привели к тому, что электрический привод стал преобладающим по сравнению с другими видами привода. Электродвигатели широко применяются на транспорте в качестве тяговых, приводящих во вращение колесные пары электровозов, электропоездов, троллейбусов и т.д.

**Генераторы переменного тока** используются главным образом на электростанциях, обычно это машины весьма большой единичной мощности, измеряемой десятками, сотнями и даже тысячами мегаватт.

За последнее время резко возросло применение **электрических машин малой мощности – микромашин** мощностью от долей до нескольких сотен ватт, использующиеся в приборостроении, автоматических системах, в бытовой технике (в пылесосах, холодильниках, вентиляторах и т.д.).

Использование электрических машин в качестве **генераторов и двигателей** является их главным назначением, т.к. оно связано исключительно с целью взаимного преобразования электрической и механической энергий.

В настоящее время, помимо своего основного назначения, вращающиеся электрические машины широко используются также:

для усиления мощности электрических сигналов – **электромашинные усилители**.

для регулирования коэффициента мощности - **синхронные компенсаторы**

для регулирования напряжения переменного тока – **индукционные регуляторы**

для преобразования частоты вращения в электрический сигнал – **тахогенераторы**

для получения электрических сигналов, пропорциональных углу поворота вала – **сельсины**

Высокие энергетические показатели, удобство подвода и отвода энергии, экологическая чистота процессов преобразования энергий, возможность изготовления машин широкого диапазона единичной мощности, простота и удобство обслуживания и управления – основные причины широкого применения электрических машин во всех областях жизнедеятельности человека.

### **1.3. Обобщенная конструкция и принцип действия электрической машины.**

#### **1.3.1. Электромеханическое устройство (электрический генератор, электрический двигатель)**

В настоящее время существуют разнообразные конструктивные формы электрических машин, но подавляющее их большинство построено на

принципе вращательного движения подвижной части относительно неподвижной.

Обобщенная конструкция такой электрической машины представлена на рис.1.1.

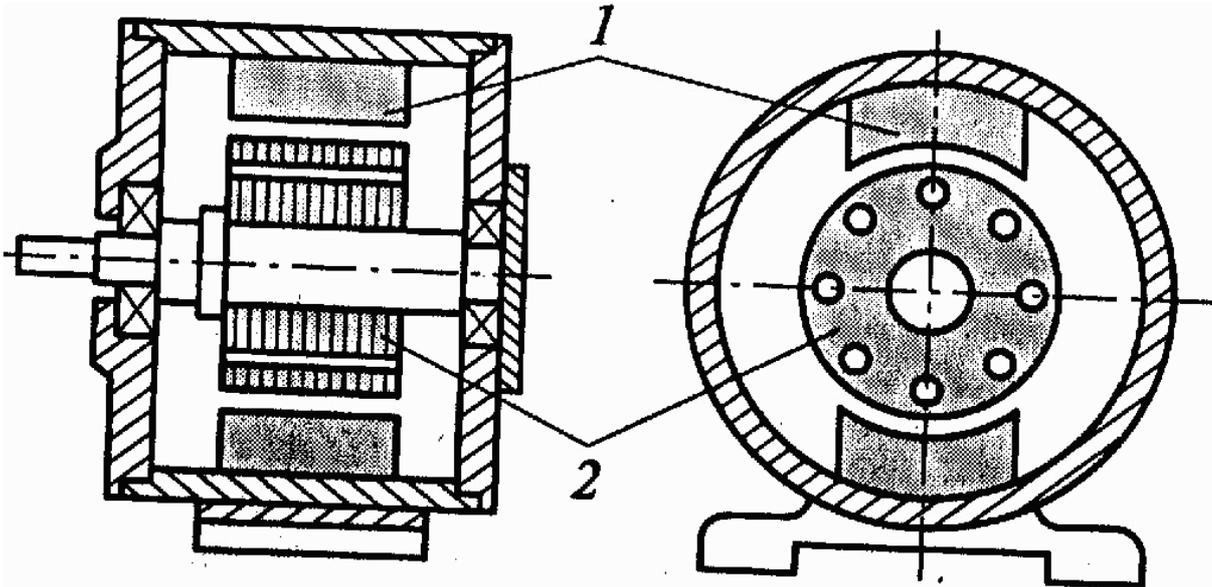


рисунок 1.1.

Она состоит из неподвижной части 1, называемой *статором*, и вращающейся части 2, называемой *ротором*.

Ротор располагается в расточке статора и отделен от него воздушным зазором.

Одна из указанных частей машины снабжена элементами, возбуждающими в машине магнитное поле, а другая имеет обмотку, которую можно условно назвать рабочей обмоткой машины.

Как неподвижная часть машины, так и подвижная часть имеют сердечники, выполненные из магнитомягкого материала и обладающие небольшим магнитным сопротивлением.

Если электрическая машина работает в режиме *генератора*, то при вращении *ротора* (под воздействием приводного двигателя) в рабочей обмотке наводится *ЭДС* и при подключении к ней потребителя появляется электрический ток.

При этом *механическая энергия* приводного двигателя преобразуется в *электрическую энергию*, потребляемую потребителем.

Если электрическая машина работает в режиме *двигателя*, то рабочая обмотка машины подключается к сети. При этом *ток*, подаваемый в эту обмотку, взаимодействует с *магнитным полем возбуждения*, и на роторе возникают *электромагнитные силы*, приводящие ротор во вращение.

При этом *электрическая энергия*, потребляемая двигателем из сети, преобразуется в *механическую*, затрачиваемую на приведение в действие какого – либо механизма.

**Принцип действия** электрических машин основан на *законах электрических и магнитных явлений*, а именно – *законе электромагнитной индукции и законе Ампера*.

Сущность закона *электромагнитной индукции* применительно к электрической машине состоит в том, что при движении проводника в магнитном поле со скоростью  $v$  и направлении перпендикулярном вектору магнитной индукции  $B$ , в нем индуцируется ЭДС.

$$E = B * l * v \quad (1.1.)$$

где  $l$  - активная длина проводника, т.е. часть его общей длины, находящейся в магнитном поле.

Если же проводник замкнуть, то в этом проводнике появится электрический ток.

В результате взаимодействия этого тока с внешним магнитным полем на проводник начнет действовать *электромагнитная сила*, определяемая *законом Ампера*.

$$F_{эм} = B * l * I \quad (1.2.)$$

Эта сила направлена встречно внешней силе, вызвавшей движение проводника.

При равномерном движении проводника силы, действующие на проводник, равны

$$F = F_{эм}$$

Умножив обе части равенства на скорость движения проводника, получим равенство

$$F * v = F_{эм} * v$$

Подставив в это выражение значение по (1.2.), получим

$$F * v = B * l * I * v \quad (1.3.)$$

Левая часть равенства (1.3.) определяет значение *механической мощности*, затрачиваемой на перемещение проводника в магнитном поле правая часть – значение *электрической мощности*, развиваемой в замкнутом контуре электрическим током.

Знак равенства между этими частями подтверждает, что в генераторе механическая мощность затрачивается на перемещение проводника в

магнитном поле и преобразуется в электрическую мощность. При этом проводник перемещается перпендикулярно вектору магнитной индукции.

В *электрическом двигателе* от источника электроэнергии к нему подводится напряжение  $U$ .

При этом на проводник действует только электромагнитная сила, под действием которой проводник движется в магнитном поле и в нем индуцируется ЭДС  $E$  направлением, противоположным напряжению  $U$ .

Таким образом, часть напряжения  $U$ , приложенного к проводнику, уравновешивается ЭДС  $E$ , наведенной в этом проводнике, а другая часть составляет падение напряжения в этом проводнике.

$$U = E + I \cdot r \quad (1.4)$$

где  $r$  – электрическое сопротивление проводника.  
Умножив обе части равенства на ток  $I$ , получим

$$U \cdot I = E \cdot I + I^2 \cdot r$$

Подставляя вместо  $E$  значение ЭДС по (1.1.), получим

$$U \cdot I = B \cdot l \cdot v \cdot I + I^2 \cdot r$$

или согласно (1.2.)

$$U \cdot I = F \cdot v + I^2 \cdot r \quad (1.5)$$

Из этого равенства следует, что электрическая мощность ( $UI$ ), поступающая в электрический двигатель из сети, частично преобразуется в механическую мощность ( $F_{эм} \cdot v$ ), а частично расходуется на покрытие электрических потерь в проводнике ( $I^2 \cdot r$ ).

Изложенное выше позволяет сделать вывод:

- для любой электрической машины обязательно наличие *электропроводящей среды (проводников)* и *магнитного поля*, имеющих возможность взаимного перемещения (1.1.).

- при работе электрической машины в режимах генератора или двигателя одновременно наблюдается как процесс *индуцирования ЭДС*, определяемой *законом электромагнитной индукции*, так и явлением возникновения *электромагнитных сил*, определяемых *законом Ампера* (1.2.).

### 1.3.2. Электромагнитное устройство ( трансформатор)

*Обобщенная конструкция* трансформатора состоит из двух (иногда – больше) взаимно неподвижных электрически не связанные *обмоток*, расположенные на ферромагнитном *магнитопроводе* (рис.1.2)

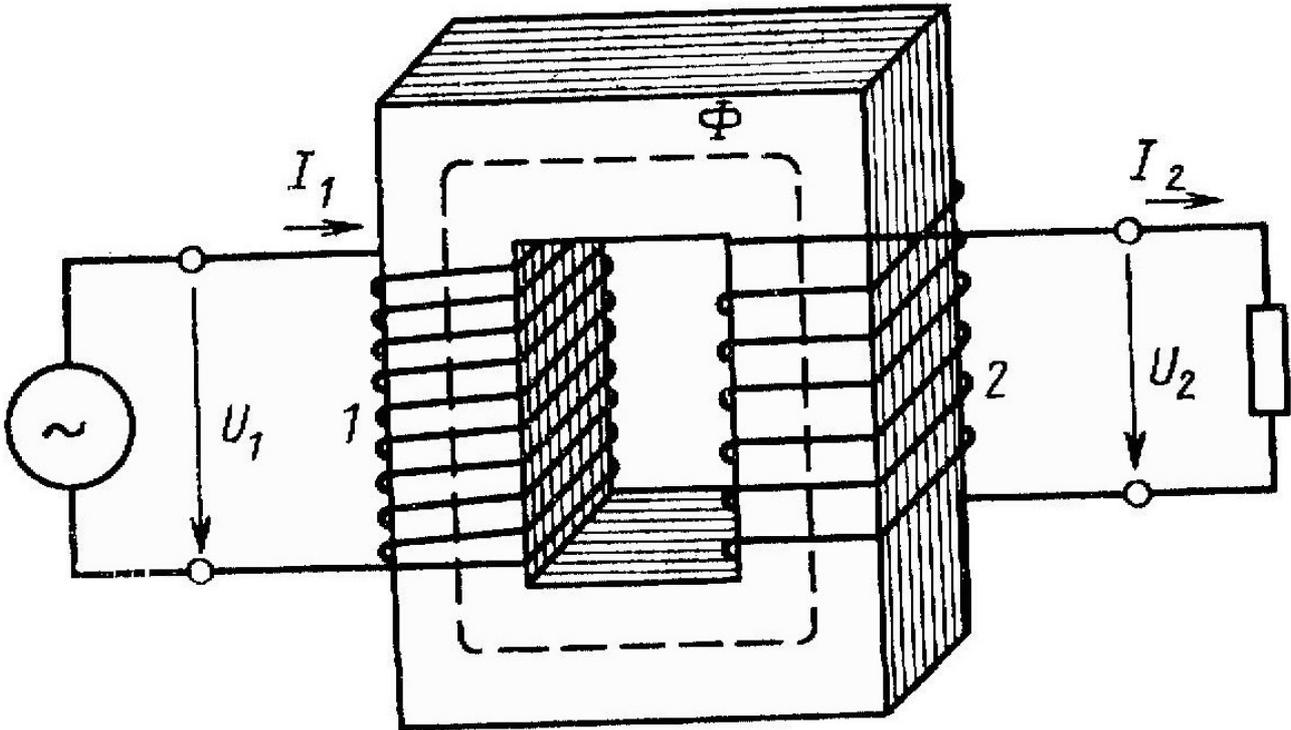


Рисунок 1. 2.

Обмотки имеют между собой *магнитную связь*, осуществляемую *переменным электрическим полем*.

Ферромагнитный магнитопровод предназначен для усиления магнитной связи между обмотками.

Обмотка трансформатора, потребляющая энергию из сети, называется *первичной*, а обмотка, отдающая энергию в сеть, *вторичной*.

**Принцип действия** трансформатора основан на явлении *взаимной индукции*.

Если одну из обмоток трансформатора подключить к источнику переменного напряжения, то по этой обмотке потечет *переменный ток*  $I_1$ , который создаст в сердечнике *переменный магнитный поток*  $\Phi$ .

Этот поток сцеплен как с одной, так и с другой обмоткой и, изменяясь, будет индуцировать в них *ЭДС*.

Так как обмотки имеют различное число витков, то и индуцируемые в них ЭДС будут отличаться по значению.

Индуцируемая в первичной обмотке ЭДС примерно равна приложенному напряжению  $U_1$  и будет его уравновешивать.

Ко вторичной обмотке подключаются потребители, являющиеся нагрузкой для трансформатора. В этой обмотке под действием индуцированной в ней ЭДС возникнет ток  $I_2$ , а на ее выводах установится напряжение  $U_2$ , которые отличаются от тока и напряжения первичной обмотки.

Следовательно, в трансформаторе происходит *изменение параметров энергии*: подводимая к первичной обмотке от сети электрическая энергия с

напряжением  $U_1$  и током  $I_1$  посредством магнитного поля передается во вторичную обмотку с напряжением  $U_2$  и током  $I_2$

#### **1.4. Классификация электрических машин.**

Рассмотрим классификацию вращающихся электрических машин по **принципу действия**, согласно которой все вращающиеся электрические машины **разделяются на коллекторные и бесколлекторные**, различающиеся как принципом действия, так и конструкцией.

**Бесколлекторные машины** – это машины переменного тока - **асинхронные и синхронные**. Асинхронные машины применяют преимущественно в качестве двигателей, а синхронные – как в качестве двигателей, так и генераторов.

**Коллекторные машины** используют главным образом для работы на **постоянном токе** в качестве генераторов и двигателей. Лишь коллекторные машины **небольшой мощности** делают **универсальными двигателями**, способными работать как от сети постоянного, так и от сети переменного тока.

Электрические машины одного типа различаются **способами включения** – **трехфазные** (включаемые в трехфазную сеть) и **однофазные** (включаемые в однофазную сеть).

**Асинхронные машины** в зависимости от **конструкции обмотки ротора** подразделяются на машины с **короткозамкнутым и фазным ротором**.

Синхронные машины и машины постоянного тока в зависимости от **способа создания в них магнитного поля** разделяют на машины с **обмоткой возбуждения и машины с постоянными магнитами**.

В зависимости от **условий эксплуатации** машины конструктивно различаются по степени защиты от воздействия факторов окружающей среды и рабочими свойствами – **машины общего и специального назначения**.

#### **1.3. КПД электрических машин**

В электрической машине процесс взаимного преобразования энергий неминуемо связан с возникновением третьего вида энергии – тепловой, причиной чего являются **потери**, сопровождающие работу любой электрической машины.

Основными являются **магнитные потери** (потери на гистерезис и вихревые токи) в магнитопроводе электрической машины, **электрические потери** в обмоточных проводах машины, обусловленные нагревом проходящим по этим обмоткам токам, и **механические потери**, вызванные силами трения в движущихся частях машины.

Все эти потери преобразуются в **теплоту**.

Количество выделенной в машине **теплоты  $Q$**  пропорционально **мощности потерь**.

Эта **теплота** идет на **нагрев машины** до некоторой **установившейся температуры** и частично **рассеивается** в окружающую среду.

Таким образом, **потребляемая** электрической машиной мощность всегда больше **отдаваемой (полезной)** мощности на величину суммарных **потерь мощности**.

Из этого следует, что **коэффициент полезного действия (кпд)** электрической машины всегда меньше 100%.

Однако по сравнению с другими видами машин (например, тепловыми), электрические машины в настоящее время являются наиболее совершенными преобразователями энергии, т.к. их **кпд** достигает **99,5%** в машинах **большой мощности** и **70 – 90%** в машинах **средней мощности**.

Исключение составляют машины **малой мощности**, у которых кпд может составлять **20 – 60%**, но даже при этом он выше, чем в машинах другого принципа действия.

Таким образом, любая электрическая при работе нагревается. Для надежной работы в течение установленного срока эксплуатации необходимо, чтобы температура нагрева машины (в первую очередь, ее обмоток) не превышала допустимых значений, что влечет за собой ограничение мощности машины при заданных ее габаритах и способах охлаждения. В итоге получается, что чем больше мощность электрической машины, тем больше ее габариты или в ней должны быть применены более эффективные способы охлаждения. В электрических машинах используются оба эти способа.

#### **1.4. Активные и конструктивные части электрической машины.**

Преобразование энергии в электрической машине происходит в пространстве действия основного магнитного поля при наличии в нем проводников с электрическим током.

Части электрической машины, непосредственно участвующие в энергопреобразовательном процессе, называются **активными**.

Для реализации энергопреобразовательных процессов необходимы элементы, без которых работа электрической машины невозможна. Эти элементы называются **конструктивными**. Конструктивные части выполняют следующие функции:

- обеспечивают активным частям требуемое пространственное расположение и их взаимное перемещение ;
- подводят электрическую энергию из сети или в сеть;
- передают механическую энергию от электрической машины к рабочей и наоборот;
- охлаждают машину, не допуская ее перегрева свыше допустимого значения;
- защищают машину от повреждений при воздействии внешних факторов;
- защищают обслуживающий персонал от соприкосновения с токоведущими частями;
- обеспечивают монтаж машины в месте ее установки.

#### **1.5. Техничко – экономические требования к электрическим машинам**

Комплекс требований к технико – экономическим требованиям разделяют на два вида: **технические** требования и **экономические** требования.

##### **Технические требования:**

Электрическая машина должна **надежно** работать в **условиях**, для которых она предназначена, в течение **срока**, не менее установленного в

технических условиях (ТУ), развивая при этом требуемую **мощность** при **номинальных** значениях напряжения, частоты вращения, КПД и других **параметров**, установленных в **паспорте** машины при соблюдении **условий безопасной эксплуатации**.

Конкретные требования (допускаемые отклонения параметров от номинальных, допускаемых значениях температуры и влажности и т.д.) изложены в соответствующих государственных стандартах.

Например, **ГОСТ 183-74 «Машины электрические вращающиеся»** определяет общие технические требования ко всем вращающимся машинам (кроме машин для бортовых систем подвижных средств транспорта).

Они дополняются **техническими требованиями** других **стандартов** в зависимости от назначения электрической машины (двигатель, генератор), мощности, условий эксплуатации, напряжения.

Отдельные отрасли предъявляют к электрическим машинам дополнительные технические требования, которые регламентируются **отраслевыми нормами или стандартами и техническими условиями**.

Такое разнообразие требований привело к необходимости их деления на два вида: электрические машины **общего вида** и электрические машины **специального назначения**.

**Электрические машины общего назначения** – это машины, свойства которых удовлетворяют совокупности технических требований, общих для большинства случаев их применения.

**Электрические машины специального назначения** – это машины, выполненные с учетом специальных требований, обусловленных особенностями эксплуатации (повышенная температура окружающей среды, взрывозащитные, погружные, режим частого пуска, торможения, реверса и т.д.)

### **Экономические требования**

Экономические требования сводятся к тому, чтобы **процесс преобразования** энергии данной электрической машиной давал большую **экономия**, чем это было при применении старой машины, либо при применении другого принципа реализации заданного процесса.

Главным **критерием** экономичности применения новой электрической машины, т.о., является снижение как **капитальных**, так и **эксплуатационных затрат** (удобство монтажа, простота управления, энергетические показатели).

### **1.6. Характеристики электрических машин.**

Свойства электрических машин описываются математическими формулами и уравнениями, многие из которых можно представить в виде графически выраженных функциональных зависимостей, построенных в системе координат  $y = f(x)$ . Такие графики называются **характеристиками**.  
**электрические генераторы:**

1. **Внешняя характеристика** – зависимость напряжения на выходе генератора от тока нагрузки при неизменных токах возбуждения и частоты вращения

$$U = f(I_e); I = const; n = const$$

2. **Характеристика холостого хода** – зависимость напряжения на выходе генератора от тока возбуждения в режиме холостого хода и неизменной частоты вращения

$$U = f(I_e); I = 0; n = const$$

3. **Регулировочная характеристика** – зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при неизменной частоте вращения и напряжении на выходе генератора

$$I_e = f(I); U = const; n = const$$

### электрические двигатели

1. **Механическая характеристика** – зависимость частоты вращения от момента нагрузки на валу двигателя при неизменных значениях напряжения питания двигателя, тока возбуждения и сопротивления в цепи рабочей обмотки.

$$n = f(M); U = const; I_e = const; R_{p.o.} = const;$$

для асинхронных двигателей зависимость момента на валу от скольжения при неизменных значениях напряжения и сопротивления в цепях обмоток ротора и статора.

$$M = f(s); U = const; R_{p.o.} = const;$$

2. **Электромеханическая характеристика** – зависимость частоты вращения от тока нагрузки при неизменных значениях напряжения и сопротивления в цепях статора и ротора.

$$n = f(I); U = const; R_{p.o.} = const;$$

3. **Регулировочная характеристика** – зависимость частоты вращения от регулирующего параметра – тока возбуждения или напряжения питания

$$n = f(I_e) \text{ или } n = f(U) R_{p.o.} = const;$$

4. **Рабочие характеристики** – зависимость КПД, коэффициента мощности, рабочего тока, частоты вращения от нагрузки двигателя (полезной мощности )

$$\eta = f(P_2) ; \cos\varphi = f(P_2); n = f(P_2); I = f(P_2)$$

**трансформаторы:**

1. **Внешняя характеристика** – зависимость напряжения на выводах вторичной обмотки от тока этой обмотки при условии постоянства коэффициента мощности нагрузки, первичного напряжения и частоты.

$$U_2 = f(I_2); \cos\varphi = \text{const}; U_1 = \text{const}; f = \text{const}.$$

**1.7. Понятие об устойчивой работе электрических машин**

При передаче вращательного движения рабочему механизму двигатель испытывает сопротивление со стороны этого механизма, определяемое статическим **моментом сопротивления  $M$** .

**Установившийся режим** двигателя и рабочей машины – совместная работа при неизменных значениях частоты вращения и электромагнитного момента. Этому режиму соответствует точка на механической характеристике, в которой имеет место равенство **вращающего момента двигателя и статического момента сопротивления рабочего механизма**.

Электрический двигатель должен обладать **устойчивостью**, т.е. в нем должна автоматически поддерживаться заданная частота вращения при воздействии каких – либо возмущающих факторов.

## Тема 2.

### Стандартизация основных параметров и качество электрических машин

#### *2.1. Номинальные данные электрических машин*

**Номинальные** данные электрических машин – это **совокупность числовых значений** электрических и механических **параметров**, обусловленных изготовителем, которым удовлетворяет машина в **заданных условиях эксплуатации**:

- номинальная мощность, (кВт или Кв\*А
- номинальное напряжение (В)
- номинальный ток (А)
- номинальная частота вращения (об/мин)
- номинальные КПД (%), коэффициент мощности, номинальная частота переменного тока (Гц), число фаз, режим работы машины.

Возможны и другие номинальные величины, определяющие свойства электрической машины, значения которых влияют на надежную устойчивую ее работу в течение установленного срока эксплуатации.

Основные номинальные данные нанесены на металлическую пластину, прикрепленную к корпусу машины.

Полный перечень номинальных данных приводится в **паспорте (каталоге)** машины.

**Режим** работы электрической машины, при котором значение каждого из параметров равно **номинальному**, называется **номинальным режимом**.

Электрическая машина может работать и в ненормальном режиме.

При работе с **недогрузкой** энергетические показатели машины (КПД и коэффициент мощности) могут оказаться ниже номинальных.

Возможна работа с **перегрузкой**, но ее величина и продолжительность не должны превышать значений, записанных в паспорте, если перегрузка допускается.

#### *2.2. Стандартизация основных параметров.*

Стандартизация основных параметров относится в первую очередь к номинальной мощности, номинальному напряжению и номинальной частоте вращения.

В целях удобства производства электрических машин, комплектования ими энергоустановок и электропривода стандартизируются установочные и присоединительные размеры.

Стандартизация указанных параметров позволяет избежать неоправданного увеличения типоразмеров, а также, необходима для международной торговли

электрическими машинами и различным оборудованием, совместно с которым эксплуатируются электрические машины.

### 2.3. Нагревание электрических машин

Условно принято считать, что нагрев происходит равномерно по всему объему машины, а рассеивание теплоты – равномерно по всей ее поверхности.

В этих условиях уравнение теплового баланса имеет вид

$$q \cdot dt = m \cdot c \cdot d\tau + S \cdot \lambda \cdot \tau \cdot dt$$

где

-  $q$  – количество теплоты, выделяемой в машине в единицу времени.

$$q = Q/dt = \sum P$$

$\sum P$ - суммарные потери мощности в машине, вТ.

-  $m \cdot c \cdot d\tau$  – количество теплоты, расходуемое на нагревание машины

$m$ - масса нагреваемой машины,

$n$ -  $c$  – удельная теплоемкость материала машины, т.е. количество теплоты, необходимое для нагревания единицы массы этого материала на 1С

$\tau$  – превышение температуры нагрева машины над температурой окружающей среды

**$S \cdot \lambda \cdot \tau$  – количество теплоты, рассеиваемой с поверхности машины в окружающее пространство в единицу времени**

$\lambda$  – коэффициент теплового рассеяния. т.е. количество теплоты, рассеиваемой с единицы поверхности машины в 1 сек при превышении температуры на 1°С.

$S$  – площадь поверхности машины

В начальный момент работы машина имеет температуру нагрева, не отличающуюся от температуры окружающей среды  $\theta_1$ , т.е.  $\tau = 0$ .

В этом случае рассеяния теплоты в окружающую среду не происходит

$$S \cdot \lambda \cdot \tau \cdot dt = 0$$

и вся выделяемая в машине теплота идет на ее нагрев.

Затем, когда температура нагрева машины начинает превышать температуру окружающей среды, т.е.  $\tau > 0$ , часть теплоты, выделяемой в машине, начинает рассеиваться в окружающую среду.

Когда температура нагрева машины достигает установившегося значения  $\theta_{уст} = const$ , вся выделяемая в машине теплота рассеивается в окружающую среду, т.е. наступает режим теплового равновесия.

$$q * dt = S * \lambda * \tau_{уст} * dt$$

где

$$\tau_{уст} = \theta_{уст} - \theta_1$$

Установившаяся температура перегрева, С

$$\tau_{уст} = q / (S * \lambda)$$

Из этого выражения следует:

- **установившаяся температура** перегрева не зависит от массы электрической машины, а определяется количеством теплоты, выделяемой в единицу времени, которая эквивалентна **мощности потерь**  $\Sigma P$ .

- установившаяся температура перегрева обратно пропорциональна **площади охлаждаемой поверхности S** и **коэффициенту теплового рассеяния  $\lambda$** , т.е. зависит от интенсивности охлаждения машины. Так, у машин со специальными способами охлаждения установившаяся температура перегрева меньше, чем у машин с естественным охлаждением при одинаковых конструкциях и условиях работы. Процессы нагревания и охлаждения машины определяются скоростью тепловых процессов, которые характеризуются постоянной времени нагревания ( $T_n$ ) и постоянной времени охлаждения ( $T_o$ ).

**Постоянная времени нагревания ( $T_n$ )** показывает **время**, необходимое для нагревания машины до **установившейся температуры** при отсутствии **рассеяния** с ее поверхности. Принято считать, что в реальных условиях температура перегрева достигает установившегося значения за время нагревания  $(4-5) * T_n$ .

**Постоянная времени охлаждения ( $T_o$ )** показывает **время**, необходимое для **остывания** машины до температуры **окружающей среды** при ее отключении (температура перегрева равна нулю). Принято считать, что в реальных условиях температура перегрева достигает нулевого значения за время нагревания  $(4-5) * T_o$ .

Температура какой – либо части машины  $\theta_2$  при известной температуре окружающей среды  $\theta_1$  и известной температуре перегрева  $\tau_{уст}$

$$\theta_2 = \tau_{уст} + \theta_1$$

Наиболее чувствительной к перегреву является изоляция обмоток., т.к. под воздействием температур, превышающих допустимые значения, ускоряется процесс теплового старения изоляции.

Электроизоляционные материалы разделяются на 7 классов нагревостойкости, обозначаемых (У А Е В F Н С), каждому из которых соответствует своя предельно допустимая температура перегрева.

Действующим стандартом ГОСТ – 183-74 установлены предельно допустимые температуры перегрева для частей машины.

## 2.4 Способы охлаждения электрических машин.

По способам охлаждения электрические машины разделяют на два вида: машины с естественным охлаждением и машины с искусственным охлаждением.

### ***Естественное охлаждение***

Эти машины не имеют вентиляторов или каких – либо других устройств, способствующих охлаждению машины. Охлаждение происходит естественным путем за счет теплопроводности и конвекции.

***Теплопроводность*** – передача теплоты внутри твердого тела от более нагретых к менее нагретым слоям.

***Конвекция*** состоит в том, что частицы газа (воздуха), соприкасающиеся с поверхностью нагретого тела, нагреваются, становятся легче и поднимаются вверх, уступая место менее нагретым частицам. Такую конвекцию называют естественной. Во вращающейся машине имеет место еще и искусственная конвекция, обусловленная вращением ротора, которая создает принудительную циркуляцию газа (воздуха) , что усиливает эффект конвекции внутри машины.

### ***Искусственное охлаждение***

В этих машинах применяется специальное устройство, обычно – вентилятор, создающий направленное движение газа, охлаждающего нагретые части машины.

#### ***1. Самовентиляция***

В машинах с самовентиляцией вентилятор закреплен на собственном валу машины. В процессе работы он, вращаясь, создает аэродинамический напор. Самовентиляция может быть наружной и внутренней.

При ***наружной самовентиляции*** воздухом обдувается внешняя поверхность корпуса статора. Машина в этом случае имеет закрытое исполнение с ребристой поверхностью для увеличения поверхности охлаждения.

При ***внутренней самовентиляции*** в корпусе и подшипниковых щитах машины делают специальные отверстия, через которые воздух из окружающей машины среды проникает внутрь, охлаждает ее, а затем выбрасывается наружу.

Для более эффективного охлаждения в ***магнитопроводе*** некоторых электрических машин делают вентиляционные каналы, через которые проходит охлаждающий газ.

Вентиляцию, при которой охлаждающий газ проходит вдоль оси машины, называют ***аксиальной***, если газ перемещается перпендикулярно оси машины по радиальным каналам, то вентиляция называется ***радиальной***. В машинах применяется также аксиально – радиальная вентиляция.

#### ***2. Независимая вентиляция***

В электрических машинах определенного вида самовентиляция становится малоэффективной, что ведет к перегреву машины. Поэтому в таких машинах применяют ***независимую вентиляцию***, когда вентилятор имеет собственный привод (частота вращения не зависит от частоты вращения машины).

Независимая вентиляция подразделяется на *разомкнутую и замкнутую*.

При *разомкнутой системе* вентилятор через трубопровод нагнетает воздух в машину и по другой трубе выбрасывается наружу.

В замкнутой системе один и тот же объем газа циркулирует в замкнутой системе машины, где охлаждается с помощью специальных устройств.

### **2.5. Конструктивные формы исполнения электрических машин.**

Конструктивные формы исполнения электрических машин определяются степенью защиты, способами охлаждения, монтажа, воздействием климатических факторов окружающей среды и категорией мест размещения электрических машин при эксплуатации.

***Степени защиты электрических машин для обслуживающего персонала и от попадания внутрь твердых тел и воды.***

ГОСТ – 17494 – 72. Условное обозначение степени защиты состоит из двух букв IP (International protection) и двух цифр: 1 - степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущим и вращающимися частями машины; 2 – степень защиты от попадания воды внутрь машины.

#### ***Способы охлаждения***

Все способы охлаждения электрических машин принято обозначать буквами IC. (International Cooling), остальные буквы и цифры обозначают способ охлаждения машины (вид хладагента, устройство цепи охлаждения при циркуляции хладагента, способ перемещения хладагента).

#### ***Способ монтажа***

Монтаж электрических машин определяет способ крепления электрической машины в месте ее установки и способ ее сочленения с другим механизмом. Условное обозначение способа монтажа состоит из букв IM (International Mounting) и четырех цифр.

#### ***Климатические условия внешней среды***

К ним относятся температура и диапазон ее колебания; относительная влажность; атмосферное давление; солнечная радиация; дождь; ветер; пыль; туман; иней; действие плесневых грибов; содержание в окружающей среде коррозионных материалов. Климатические условия обозначаются буквами.

#### ***Термины и определения установленные ГОСТ – 18311 – 80***

1. ***Открытая электрическая машина*** – машина, не защищенная оболочкой от прикасания к ее частям, находящимся под напряжением, опасным движущимся частям и от попадания внутрь посторонних предметов, жидкости и пыли.
2. ***Защищенная электрическая машина*** – машина, снабженная оболочкой для защиты от прикасания к ее частям, находящимся под напряжением, опасным движущимся частям и от попадания внутрь посторонних предметов, жидкости и пыли.
3. ***Закрытая электрическая машина*** – защищенная машина, выполненная с такой оболочкой, что возможность сообщения между ее внутренним

пространством и окружающей средой может иметь место только через неплотности соединений частей машины.

4. **Пылезащищенная электрическая машина** – защищенная машина, выполненная так, что исключается попадание внутрь ее оболочки пыли в количестве, нарушающем работу машины.
5. **Герметичная электрическая машина** – защищенная машина, выполненная с такой оболочкой, что практически исключена возможность сообщения между ее внутренним пространством и окружающей средой.
6. **Водозащищенная** электрическая машина – защищенная электрическая машина, выполненная так, что при обливании ее водой исключается попадание воды внутрь оболочки в количестве, вызывающем нарушение работы машины.
7. **Взрывозащищенная электрическая машина** – защищенная машина специального назначения, выполненная таким образом, что устранена или затруднена возможность воспламенения окружающей ее взрывоопасной среды вследствие эксплуатации этой машины.
8. **Погружная электрическая машина** – машина специального назначения, предназначенная для эксплуатации в условиях погружения в жидкость.

## 2.6. *Материалы, применяемые в электрических машинах*

Материалы, применяемые в электрических машинах, подразделяют на **конструкционные, активные и электроизоляционные.**

**Конструкционные материалы** применяют для изготовления деталей машины, преимущественным назначением которых является восприятие и передача **механических нагрузок**, а также, обеспечение требуемой степени защиты, охлаждения и т.д. (станины, подшипниковые щиты, уплотнители, валы, жалюзи, вентиляторы). В качестве конструкционных используют **сталь, чугун, цветные металлы и их сплавы, пластмассы.**

**Активные материалы** служат для протекания в машине **электромагнитных процессов.** Эти материалы в свою очередь подразделяют на **проводниковые и магнитные.**

**Магнитные материалы** применяют для изготовления **магнитопроводов.**

Одним из основных требований, предъявляемым к магнитным материалам, является **высокая магнитная проницаемость**, чтобы требуемый магнитный поток в машине создавался возможно меньшим значением МДС.

Не менее важными требованиями являются также **минимальные потери от перемагничивания и повышенное удельное электрическое сопротивление**, что способствует уменьшению **потерь от вихревых токов.** Наилучшим магнитным материалом, удовлетворяющим всем перечисленным требованиям, является **тонколистовая электротехническая сталь.** Широкий диапазон электромагнитных свойств стали достигается изменением содержания кремния. Элементы

магнитопровода, изготавливаемые из листовой стали, имеют **шихтованную конструкцию**, т.е. выполняются в виде пакета выштампованных листов, изолированных друг от друга изоляционной пленкой (лак, оксидная пленка), которая служит для уменьшения вихревых токов.

В качестве **проводниковых материалов** в электрических машинах широко применяют электролитическую медь и реже рафинированный алюминий.

Обмоточные провода, применяемые для изготовления обмоток, должны удовлетворять целому комплексу требований:

- малая толщина изоляционного слоя провода, минимальная площадь, занимаемая в пазах сердечников;
- высокая механическая прочность и одновременно гибкость медной жилы
- эластичность, изоляционная прочность и нагревостойкость изоляционного покрытия, его высокая теплопроводность и химическая стойкость.

**Электроизоляционные материалы** весьма разнообразны. Их свойства во многом определяют эксплуатационную надежность, габаритные размеры, массу и стоимость машины.

Одним из важнейших свойств является нагревостойкость – способность материала сохранять свои изоляционные и механические свойства при воздействии рабочих температур в течение времени, определяемом сроком службы электрической машины.

Все материалы разделены на 12 классов нагревостойкости. Однако в современных электрических машинах применяют материалы трех классов:

**В** (материалы на основе неорганических диэлектриков – слюда, асбест, стекловолокно), **F** (материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, но с применением органических лаков и смол; изоляция этого класса не должна содержать бумаги и целлюлозы), **H** (те же, что в классе F, но с соответствующими по нагревостойкости лаками и смолами).

В процессе работы машины изоляция нагревается неравномерно. При этом измерение температуры в горячих точках (граница между токоведущим проводом и его изоляционным покрытием) технически невозможно. Поэтому согласно действующему стандарту предельные температуры нагревания обмоток принимают ниже предельно допустимых температур для изоляции соответствующего класса нагревостойкости.

Эксплуатация изоляционных материалов в соответствии с температурами, указанными для каждого класса нагревостойкости, обеспечивает им срок службы не менее 20 – 25 лет.

Экспериментально доказано, что при повышении температуры на 10градусов сверх установленной классом нагревостойкости срок службы изоляции сокращается вдвое.

## **2.7. Качество и надежность электрических машин**

Электрическая машина, являясь изделием отрасли электротехнической продукции, должна удовлетворять конкретным показателям *качества*, которые ввиду их многообразия целесообразно разделить на две группы.

Первая группа показателей качества связана с *параметрами*, определяющими назначение машины, и представляет собой *перечень ее номинальных данных*. Эти качества проверяются при эксплуатации при номинальной нагрузке машины либо другим (косвенным) методом.

Вторая группа показателей качества относится к *надежности* электрической машины и может быть проверена лишь в процессе испытания машины на надежность.

**Надежность** – это свойство электрической машины выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих номинальному режиму и условиям технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. К основным показателям, определяющим надежность, относятся исправность, работоспособность, отказ.

**Исправность** – состояние, при котором электрическая машина соответствует всем требованиям, установленным для нее в технической документации.

**Работоспособность** – способность электрической машины выполнять требуемые функции, сохраняя значение данных параметров в пределах, установленных технической документацией. Разница в рассмотренных понятиях состоит в том, что работоспособная машина в отличие от исправной, может не соответствовать некоторым требованиям технической документации, не влияющих на выполнение машиной заданных функций (например, некачественная покраска).

Строго говоря, такая машина неисправна, но в течение определенного времени остается работоспособной.

**Отказ** – нарушение работоспособности машины. Различают отказы внезапные и постепенные.

Отказ называется *внезапным*, если он характеризуется *скачкообразным изменением* одного или нескольких *параметров*.

Если же отказу предшествует *постепенное изменение* какого – либо *параметра*, то его называют *постепенным*.

Электрическая машина должна обладать *долговечностью* – свойством сохранять работоспособность до наступления *предельного состояния*, оговоренного технической документацией.

**Предельное состояние** – это состояние машины, при котором ее дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за *неустранимого* нарушения требований *безопасности* или *неустранимого* отклонения заданных *параметров* сверх установленных *пределов*, после чего машина должна быть отправлена в *ремонт* или изъята из эксплуатации и заменена исправной машиной с требуемыми параметрами.

Долговечность электрической машины определяется *техническим ресурсом и сроком службы*.

**Технический ресурс** - это наработка машины от начала эксплуатации или возобновления эксплуатации после ремонта до наступления предельного состояния.

**Срок службы** – это календарная продолжительность эксплуатации машины от ее начала или возобновления после ремонта до наступления предельного состояния.

Свойство машины сохранять работоспособность в течение некоторого времени наработки называется **безотказностью**.

Одним из количественных показателей безотказности является **вероятность безотказной работы** – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет. **Количественно** вероятность безотказной работы определяется статистическим отношением числа машин, безотказно проработавших в течение времени  $t$  к общему числу работоспособных машин  $N$  в начале наблюдения, т.е. при  $t=0$ .

$$P(t) = (N - n(t))/N$$

где  $n(t)$  – количество машин, отказавших за время  $t$ .

Вероятность безотказной работы является **убывающей функцией**.

Опытом эксплуатации установлены три периода, характеризующихся различной **интенсивностью отказов**  $\lambda$ .

В течение **первого периода**, называемого **периодом приработки**, выявляются скрытые дефекты (технологические). Этот период характеризуется случайными отказами. С течением времени эксплуатации машины интенсивность отказов снижается и при достижении момента времени  $t_1$  она достигает некоторого постоянного значения  $\lambda_{ном}$ .

С этого времени наступает **нормальная эксплуатация**. Отказы в этот период носят случайный характер и происходят по причине нарушений условий эксплуатации (температура, влажность, попадание внутрь воды или металлической стружки и т.д.). Период нормальной эксплуатации является наиболее продолжительным (15-25 тыс. час.) и продолжается до момента времени  $t_2$ .

Затем наступает **период износа (старения)**. Этому периоду соответствует нарастание интенсивности отказов, обусловленных главным образом старением изоляции, износом подшипников, коллекторов, контактных колец и т.д.

Важным свойством электрической машины является ее **ремонтпригодность**, состоящая в приспособленности к восстановлению работоспособности путем проведения ремонта или замены отказавшего элемента.

## 2.8. Вибрации в электрических машинах

Наиболее существенной причиной возникновения вибраций в электрических машинах является неуравновешенность вращающихся частей электрических машин, она может быть вызвана вибрацией смежных механизмов, погрешностями, допущенными при центровке сопрягаемых валов, а также, работой подшипников при чрезмерной вязкости масла в условиях низкой температуры.

Измерения вибрации производят при работе машины в режиме холостого хода при номинальных значениях питающего напряжения и частоты вращения.

Вибрация измеряется методом виброперемещения, после чего вычисляются величина вибрационной скорости (мм/сек) по формуле. Для электрических машин с частотой вращения 600 об/мин устанавливаются предельно допустимые вибрации, которые определяют класс вибрации.

### **2.9. Шумы в электрических машинах.**

Причины возникновения шумов разделяют на механические, вентиляционные и магнитные.

Основной причиной *механических шумов* является неудовлетворительная *балансировка* вращающихся частей электрической машины и сочлененных с ее валом элементов.

Шумы часто создают подшипники, а в машинах постоянного тока – щеточно – коллекторные узлы.

Причинами шумов *вентиляционного происхождения* могут быть: недостаточная *жесткость вентилятора*, возникновение в путях прохождения охлаждающего воздуха *вихрей*, *резонирование* тонкостенных элементов на пути вентиляционного потока.

*Магнитные шумы* появляются в машине под влиянием переменных электромагнитных сил, возникающих из-за периодического *перемagnичивания* элементов магнитопровода машины.

Другой причиной магнитных шумов является изменение *магнитной проводимости воздушного зазора* из – за зубчатой поверхности сердечников статора и ротора.

В зависимости от требований к уровню шума электрические машины разделяются на четыре класса.

### **2.10. Серии электрических машин.**

Электрические машины изготавливают как правило *сериями*. *Серия электрических машин* представляет собой ряд *подобных* машин с возрастающей по шкале *мощностью*, имеющих *однотипную конструкцию* и удовлетворяющих *единому комплексу* требований.

Каждая машина, входящая в серию, представляет собой *типоразмер* с определенными *параметрами* и *установочно – присоединительными размерами*.

Некоторые крупные серии помимо машин основного исполнения содержат *модификации*.

## Тема 3.

### Трансформаторы.

#### *3.1. Конструкция трансформатора.*

##### *3.1.1. Магнитопровод*

**Магнитопровод** является конструктивной основой трансформатора, и служит для проведения **основного магнитного потока**.

Для уменьшения **магнитного сопротивления** по пути магнитного потока, а следовательно уменьшения МДС и тока, необходимого для создания потока, магнитопровод выполняется из **специальной электротехнической стали**.

Так как магнитный поток в трансформаторе изменяется во времени, то для уменьшения потерь от вихревых токов он собирается из отдельных изолированных друг от друга **листов**. Толщина листов выбирается тем меньше, чем выше частота питающего напряжения. При частоте 50 Гц толщина листов принимается равной 0,35 – 0,5 мм. **Изоляция** листов осуществляется чаще всего с помощью лаковой пленки, которая наносится с двух сторон листа.

В магнитопроводе различают стержни и ярма.

**Стержень** – это та часть магнитопровода, на которой располагаются **обмотки**, а **ярмо** – часть, не несущая обмоток и служащая для **замыкания магнитной цепи**.

В зависимости от взаимного расположения стержней, ярм и обмоток магнитопроводы разделяют на **стержневые** и **броневые**.

В **стержневых** магнитопроводах ярма прилегают к торцевым поверхностям обмоток, не охватывая их боковых поверхностей. В **броневых** магнитопроводах ярма охватывают не только торцевые, но и **боковые поверхности** обмоток, как бы закрывая их броней.

В **броневом трансформаторе (рис.3.1.)** имеется один стержень и два ярма, охватывающие обмотки. По каждому ярму замыкается **половина** магнитного потока стержня, поэтому площадь поперечного сечения каждого ярма будет в два раза меньше площади стержня.

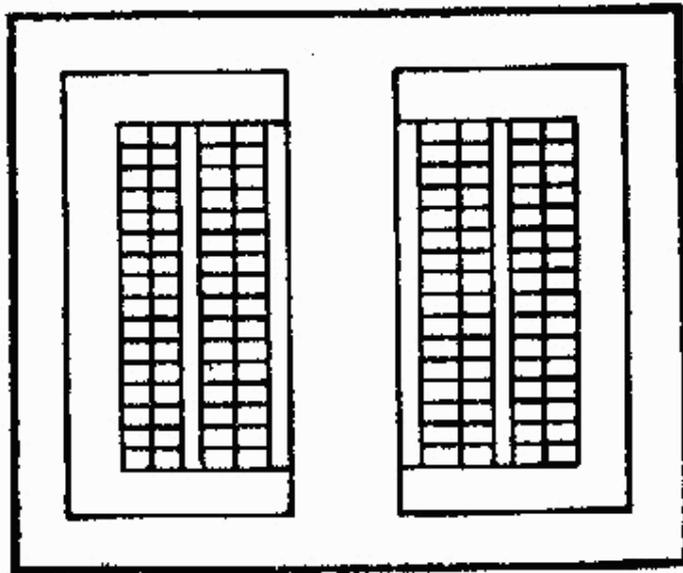


рисунок 3.1.

Магнитопровод *стержневого трансформатора (рис.3.2.)* имеет *два стержня*, на каждом из которых располагаются по *половине обмоток*. Половины каждой из обмоток соединяются между собой *последовательно или параллельно*. При таком расположении обмоток уменьшаются *потoki рассеяния* и улучшаются *характеристики трансформаторов*.

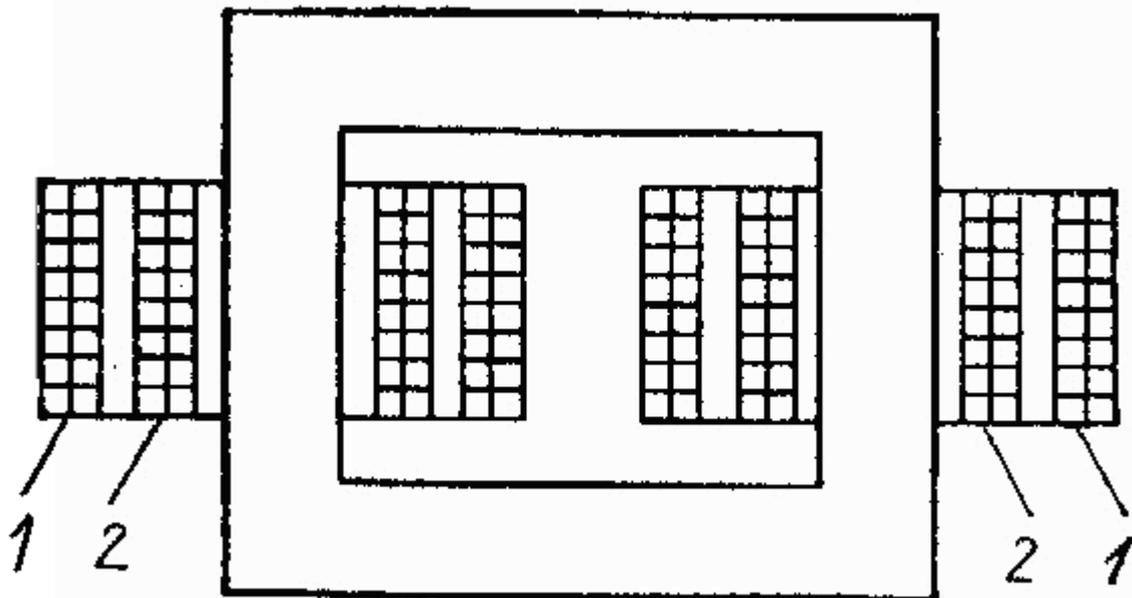


Рисунок 3.2

В трехфазных цепях могут применяться три однофазных трансформатора, обмотки которых соединяются по трехфазной схеме. Такой трансформатор называется *групповым. (рис.3.3.)*

Однако, чаще всего применяются трансформаторы с общей для всех магнитной системой.

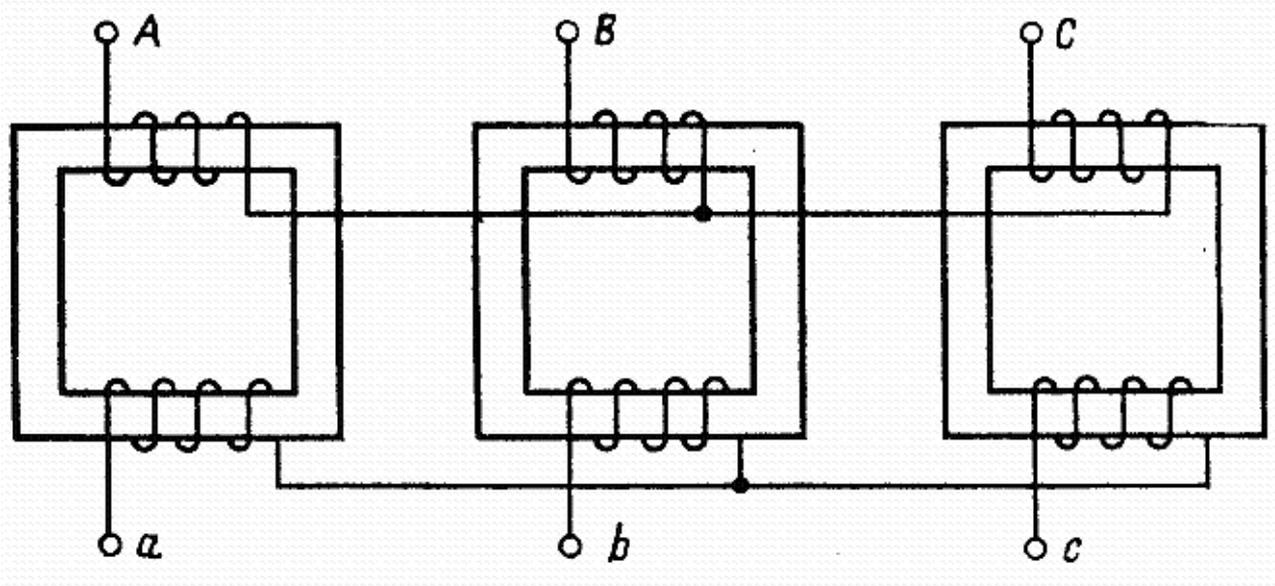


рисунок 3.3.

На каждом *стержне* трехфазного стержневого магнитопровода располагаются *обе обмотки* одной фазы.

*Бронестержневые* магнитопроводы применяются в трансформаторах *большой мощности* для уменьшения *габаритов по высоте*. Снижение высоты у этих трансформаторов происходит за счет ярм, которые по сравнению с ярмами стержневых магнитопроводов будут иметь высоту, меньшую в два раза для однофазных и в  $\sqrt{3}$  раз для трехфазных магнитопроводов.

По способу *сочленения* стержней с ярмами различают трансформаторы со стыковыми и шихтованными впереплет магнитопроводами.

Наиболее широкое распространение получили *шихтованные впереплет* магнитопроводы.

*Стыковая* конструкция применяется значительно реже, так как наличие немагнитных зазоров в местах стыков увеличивает *магнитное сопротивление* на пути потока, что ведет к возрастанию намагничивающего тока трансформатора.

*Стержни* магнитопровода имеют в поперечнике форму *ступенчатой фигуры, вписанной в окружность* (трансформаторы большой мощности), или *прямоугольника* (трансформаторы малой мощности).

При конструкции ступенчатой формы *обмотки* будут иметь форму *полых цилиндров*, что сокращает расход материала и увеличивает их механическую и электрическую прочность по сравнению с прямоугольной формой конструкции стержня.

*Остовом* трансформатора называется магнитопровод вместе со всеми *конструкциями и деталями*, служащими для скрепления его отдельных частей.

### 3.1.2. Обмотки.

По способу расположения на стержне обмотки трансформатора подразделяются на *концентрические* и *чередующиеся*.

**Концентрические** выполняются каждая в виде **цилиндра** и располагаются на стержне **концентрически** относительно друг друга. Высота обеих обмоток, как правило, делается равной. В высоковольтных трансформаторах ближе к стержню располагается обмотка **низкого напряжения**, т.к. при этом уменьшается изоляционное расстояние между стержнем и этой обмоткой.

В **чередующихся** обмотках **катушки ВН и НН** чередуются **вдоль стержня по высоте**. Эти обмотки имеют меньшее магнитное рассеяние, однако при высоких напряжениях изоляция таких обмоток сложнее из-за большого количества промежутков между катушками ВН и НН.

В силовых трансформаторах нашли применение главным образом **концентрические обмотки**, которые по характеру намотки можно подразделить на **цилиндрические, винтовые и спиральные**.

**Цилиндрической** называется обмотка, витки которой наматываются вдоль стержня впритык друг к другу. При большом числе витков обмотка подразделяется на две концентрические катушки, между которыми оставляется канал для охлаждения. Однослойные и двухслойные цилиндрические обмотки применяются главным образом для обмоток **низкого напряжения при номинальных токах до 800 А**.

Наряду с этими обмотками находят применение также **многослойные обмотки**, у которых число слоев в радиальном направлении более двух. Многослойные цилиндрические обмотки выполняются из проводников круглого сечения и находят применение для **обмоток высокого напряжения при номинальном напряжении не более 35 кВ**.

**Винтовая обмотка** состоит из витков, которые составлены из нескольких (от 4 до 20) **параллельных** проводников прямоугольного сечения, расположенных в **радиальном направлении** один относительно другого. Намотка винтов этой обмотки выполняется, как и у цилиндрической, по винтовой линии, но при этом между соседними по высоте витками оставляют канал для охлаждения. Так как проводники, образующие виток, располагаются концентрически, то их **длина**, а следовательно, **активное сопротивление**, будут различными. Кроме того, они будут находиться в неодинаковых условиях по отношению к **потoku рассеяния**, замыкающемуся в пространстве, занимаемом обмотками, вследствие чего в них будут наводиться **разные ЭДС**. По этим причинам **ток** по проводникам, образующим виток, будет распределяться **неравномерно**, что вызовет увеличение потерь, во избежание чего в винтовых обмотках требуется **перекладка (транспозиция)** проводников витка. При перекладке стремятся к тому, чтобы каждый проводник занимал **попеременно** все положения, возможные в пределах витка. Винтовые обмотки имеют большую **механическую прочность**, чем цилиндрические, и применяются для обмоток **низкого напряжения в мощных трансформаторах (при токах более 300 А)**.

**Спиральной обмоткой** называется обмотка, составленная из ряда расположенных по высоте стержня и соединенных **последовательно катушек**, намотанных по плоской спирали, с радиальными охлаждающими каналами

между всеми или частью катушек. Если виток состоит из *одного проводника*, то обмотка называется *простой*, если он составлен из ряда *параллельных проводников*, то *параллельной*.

В параллельных обмотках следует применять *транспозицию проводников*. Катушки спиральных обмоток наматываются из прямоугольного провода и могут иметь целое и дробное число витков.

Характерной особенностью спиральных обмоток является то, что ее катушки наматываются без *разрыва провода*, по этой причине их называют также *непрерывными*. Этот тип обмоток применяется для обмоток *высокого и низкого напряжения в широком диапазоне напряжений*.

Важным элементом конструкции обмоток является *изоляция*. Различают *главную и продольную изоляцию*.

*Главной изоляцией* называют изоляцию данной обмотки от *остова, бака и соседних обмоток*. Осуществляется она посредством комбинации *изоляционных промежутков и барьеров* в виде электроизоляционных цилиндров и шайб.

При небольших мощностях и низких напряжениях обмотки, намотанные на каркас, надевают непосредственно на стержень магнитопровода.

*Продольная изоляция* является изоляцией между различными точками данной обмотки, т.е. *витками слоя и катушками*.

Изоляция между витками обеспечивается собственной *изоляцией провода*. Для *междуслойной* изоляции используется *кабельная бумага*, укладываемая в несколько слоев. *Междукатушечная изоляция* обычно осуществляется радиальными каналами.

### 3.1.3. Конструктивные части трансформатора.

Основным типом силового трансформатора является масляный *трансформатор*. *Сухие трансформаторы* применяются в установках производственных помещений, жилых и служебных зданий, т.е. там, где применение *масляных* трансформаторов вследствие их взрыво – и пожароопасности *недопустимо*.

В *сухих трансформаторах* охлаждающей средой проникающий к обмоткам и магнитопроводу *атмосферный воздух*.

У *масляных* трансформаторов *выемная часть*, являющаяся по сути собственно трансформатором, погружается в *бак с маслом*.

К *выемной части* относится остов с обмотками и отводами, а в некоторых конструкциях – также крышка бака.

*Масло*, заполняющее бак, имеет двойное назначение: *изоляции* между токоведущими и заземленными частями и *охлаждающей среды*.

*Бак трансформатора* обычно имеет овальную форму и для удобства транспортировки располагается на тележке с катками.

С ростом мощности трансформатора конструкция бака видоизменяется. Рост мощности ведет к росту потерь, нагрев трансформатора растет быстрее, чем поверхность охлаждения, что требует искусственного увеличения поверхности.

У трансформаторов до 40 КВ\*А применяют баки с гладкими стенками. При мощностях от **40 до 1600 КВ\*А** для увеличения поверхности охлаждения в стенки бака ввариваются **трубы диаметром 30 – 60 мм**, располагаемые в один – три ряда.

В трансформаторах **свыше 1000 КВ\*А** используются гладкие баки с подвешенными к ним **трубчатыми охладителями**, которые присоединяются к верхней и нижней частям бака с помощью фланцев. Относительно стенок бака они располагаются радиально. Циркуляция масла в охладителе осуществляется конвекцией.

В трансформаторах мощностью свыше **10000КВ\*А** периметр гладкого бака оказывается недостаточным для размещения необходимого количества охладителей. Тогда для более интенсивного отвода тепла от охладителей применяют **обдув с помощью вентиляторов**, что дает увеличение теплоотдачи на 50 – 60%.

В мощных трансформаторах применяют **форсированное охлаждение**, т.е. масло из бака откачивают насосом, прогоняют через водяной или воздушный теплообменник и вновь возвращают в бак трансформатора.

**Расширитель** представляет собой цилиндрический резервуар, располагаемый выше крышки бака масляного трансформатора и соединяемый с баком трубкой с патрубком на крышке. Внутренний объем расширителя составляет примерно 10% объема бака трансформатора, так что при всех колебаниях температуры масло заполняет бак.

Кроме того, открытая поверхность масла, соприкасающаяся с воздухом, уменьшается, что уменьшает его **окисление и увлажнение**.

Между расширителем и баком трансформатора мощностью более 1000 КВ\*А устанавливается **газовое реле**, которое сигнализирует о повреждениях, приводящих к местному нагреву отдельных частей трансформатора.

**Выхлопная труба** представляет собой стальной, обычно наклонный полый цилиндр диаметром 150 мм и более. Внизу она прикрепляется к крышке и имеет сообщение с баком. Сверху труба закрывается стеклянной мембраной. Выхлопная труба устанавливается на всех трансформаторах мощностью свыше **1000 КВ\*А** и предназначается для предохранения бака трансформатора от **деформации** вследствие резкого повышения **давления** из – за интенсивного образования газов. При резком повышении давления мембрана выдавливается раньше, чем происходит деформация бака.

**Вводы** представляют собой **изоляторы**, внутри которых располагаются **токоведущие медные стержни**. Внутри бака к стержню присоединяются **концы обмотки** трансформатора, а вне бака – токоведущие части **сети**.

Вводы трансформаторов, устанавливаемых на открытом воздухе, снабжаются **ребрами**.

**Контроль температуры** масла в верхней части бака производится различного рода **термометрами** (стеклянные ртутные для трансформаторов мощностью до 1000 КВ\*А; дистанционные манометрические для трансформаторов мощностью 1000 – 5600 КВ\*А; термоэлектрические

преобразователи для трансформаторов больших мощностей). Наибольшая температура, допускаемая в верхних слоях, составляет 95 градусов.

Для изменения **числа витков** в целях **регулирования напряжения** предусматривается **переключатель**, размещенный внутри бака, рукоятка которого выводится на крышку или стенку бака.

На крышке и стенках бака устанавливаются различные **пробки и краны**, предназначенные для заливки, стока и отбора проб масла.

### 3.2. Схемы соединения обмоток трансформатора

Выводы начала обмоток однофазных трансформаторов согласно ГОСТ обозначают буквами **Aa**, концы **Xx**. Большие буквы относятся к обмотке ВН, маленькие – к обмотке НН.

Начала и концы обмоток трехфазных трансформаторов соответственно обозначают буквами **A, B, C** и **X, Y, Z** для обмоток высокого напряжения; **a, b, c** и **x, y, z** для обмоток низкого напряжения.

При наличии третьей обмотки среднего напряжения (СН) применяют обозначение **A<sub>m</sub> X<sub>m</sub>** для однофазных трансформаторов и **A<sub>m</sub>, B<sub>m</sub>, C<sub>m</sub>** и **X<sub>m</sub>, Y<sub>m</sub>, Z<sub>m</sub>** для трехфазных. Выводы нулевой точки обозначают **O, o, O<sub>m</sub>**.

Обмотки трехфазных трансформаторов в большинстве случаев соединяются по схеме «звезда» (рис), условное обозначение **Y**, в тексте **У**; либо по схеме «треугольник», условное обозначение в схемах **Δ**, в тексте **Д**.

При соединении обмоток в звезду

$$U_l = \sqrt{3} * U_\phi$$

$$I_l = I_\phi$$

При соединении в треугольник

$$U_l = U_\phi$$

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

Эти соотношения справедливы при симметричном режиме.

Схемы соединения обмоток трансформаторов обозначаются в виде дроби **У/У, У/Δ** и т.д. Числитель дроби показывает схему соединения обмотки ВН, знаменатель дроби – схему соединения обмотки НН.

При выборе схемы соединения обмоток учитывается ряд обстоятельств:

- при высоких напряжениях обмотку предпочитают собирать в звезду и заземлять ее нулевую точку, при этом напряжение выводов и проводов относительно земли уменьшается в  $\sqrt{3}$  раз, что приводит к уменьшению стоимости изоляции;

- обмотки НН соединяют в звезду с выведенной нулевой точкой в том случае, если от этой обмотки предполагается питание осветительной или смешанной осветительно – силовой нагрузки. Тогда лампы включаются между одним из линейных проводов и нулевым проводом на фазное напряжение, а трехфазные двигатели – к трем фазам на линейное напряжение. Обозначение такой схемы **У<sub>n</sub>**.

- при номинальном напряжении обмотки НН выше 400 В предпочитают собирать ее в треугольник, т.к. при этом улучшаются условия работы

трансформатора при несимметричной нагрузке и уменьшается влияние высших гармоник.

- иногда в специальных трансформаторах применяется соединение обмоток по схеме «зигзаг», обозначение  $Z$ .

### 3.3. Номинальные величины

**Номинальной мощностью** трансформатора является **полная мощность**, равная

$$\text{для однофазного трансформатора } S = U_{\text{ном}} * I_{\text{л ном}}$$

$$\text{для трехфазного трансформатора } S = \sqrt{3} * U_{\text{л ном}} * I_{\text{л ном}}$$

Так как кпд трансформатора достаточно велик, то принимают, что мощности обеих обмоток равны.

Под **номинальными напряжениями** понимают линейные напряжения каждой из обмоток. При  $U_{\text{л ном}} = \text{const}$  напряжение вторичной обмотки при номинальной мощности будет зависеть от нагрузки. Поэтому во избежание неопределенности за номинальное напряжение вторичной обмотки принимается напряжение ее при холостом ходе, когда ток в этой обмотке равен нулю.

**Номинальными токами трансформатора** – первичным  $I_{\text{л ном}}$  и вторичным  $I_{2\text{л ном}}$  – называют линейные токи, вычисленные по номинальным значениям мощности и напряжения.

Кроме мощности, напряжения и токов на щитке указываются частота питающего напряжения, схема и группа соединения обмоток, напряжение короткого замыкания, режим работы (продолжительный, кратковременный), полная масса.

### 3.4. Процессы в трансформаторе при холостом ходе.

**Холостым ходом** трансформатора называется такой режим работы, когда к первичной обмотке подводится напряжение, а вторичная обмотка разомкнута и ток в ней равен нулю.

Процессы, происходящие в однофазном трансформаторе, в основном, аналогичны процессам, происходящим в любой из фаз трехфазного трансформатора.

Рассмотрим процессы, происходящие при холостом ходе в однофазном трансформаторе.

Для наглядности примем, что первичная обмотка с числом витков  $w_1$  и вторичная обмотка с числом витков  $w_2$  расположены на разных стержнях.

**Ток  $I_1$** , протекающий в **первичной обмотке** при таком режиме, называется током **холостого хода  $I_0$** .

**Реактивная** составляющая этого тока создает **магнитный поток  $\Phi$** , который в основном будет замыкаться по магнитопроводу.

**Поток  $\Phi$** , сцепленный со всеми витками первичной и вторичной обмоток, при своем изменении будет наводить в них **ЭДС**.

Предположим, поток изменяется по закону:

$$\Phi = \Phi_m * \sin \omega * t$$

где

$\Phi_m$  – амплитуда потока

$\omega = 2\pi f$  - угловая частота

$t$  - время

Мгновенные значения ЭДС, наведенные потоком в первичной и вторичной обмотках:

$$\begin{aligned} e_1 &= -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega \cdot w_1 \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f w_1 \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ e_2 &= -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega \cdot w_2 \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f w_2 \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Амплитуды ЭДС обмоток

$$\begin{aligned} E_{1m} &= 2\pi f w_1 \Phi_m \\ E_{2m} &= 2\pi f w_2 \Phi_m \end{aligned} \quad (3.2)$$

Тогда

$$\begin{aligned} e_1 &= E_{1m} \sin(\omega t - \pi/2) \\ e_2 &= E_{2m} \sin(\omega t - \pi/2) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Из (3.1) и (3.3) следует, что ЭДС, наводимые в обмотках, отстают по фазе от потока на  $90^\circ$ .

Перейдем к значениям действующих ЭДС.

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{1m} / \sqrt{2} = 4,44 f w_1 \Phi_m \\ E_2 &= E_{2m} / \sqrt{2} = 4,44 f w_2 \Phi_m \end{aligned} \quad (3.4)$$

Значения наводимых в обмотках трансформаторов ЭДС пропорциональны числу **витков**.

Отношение этих величин

$$E_1 / E_2 = w_1 / w_2 = n_m \quad (3.5)$$

носит название **коэффициента трансформации**.

Практически коэффициент трансформации определяется при **холостом ходе** путем измерением **напряжений** первичной и вторичной обмоток.

Так как **падение напряжения** от тока **холостого хода** в первичной обмотке мало, то можно считать  $U_1 = E_1$ , а напряжение вторичной обмотки при холостом ходе  $U_2 = E_2$ .

Тогда

$$U_1 / U_2 = w_1 / w_2 = n_m \quad (3.6)$$

При определении коэффициента трансформации принимают отношение **фазных напряжений** обмоток.

В практике для **трехфазных трансформаторов** часто требуется знать коэффициент трансформации по **линейным** напряжениям обмоток, для чего следует учитывать **схему соединения** обмоток.

При холостом ходе трансформатор потребляет из сети **активную мощность**  $P_0$ , которая идет на покрытие потерь в нем.

Основные потери в трансформаторе имеют две составляющие: **потери в обмотках и магнитные потери в магнитопроводе**  $P_m$ .

Потери в *обмотках* весьма малы, так во *вторичной* обмотке тока нет, а по первичной протекает очень небольшой ток  $I_0$ . Поэтому с достаточной для практики точностью можно принимать, что  $P_0 = P_m$ .

Эти потери возникают из-за перемагничивания сердечника переменным магнитным полем и состоят из потерь на *гистерезис* и потерь от *вихревых токов намагничивания*.

*Активной мощности*  $P_0$ , потребляемой трансформатором при холостом ходе, будет соответствовать *активная составляющая в токе*  $I_0$ .

$$I_{0a} = P_0 / U_1 \quad (3.7)$$

Таким образом, *ток холостого хода* будет иметь две составляющие – *намагничивающую (реактивную)*  $I_{op}$ , создающую основной магнитный поток  $\Phi$  и совпадающую с ним по фазе, и *активную составляющую*  $I_{0a}$ , опережающую реактивную на  $90^\circ$ .

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{op}^2} \quad (3.8)$$

В трехфазном трансформаторе под  $P_0$  понимается магнитные потери во всем магнитопроводе, т.е. потери во всех *трех фазах*.

Активную составляющую тока  $I_0$  определяют как

$$I_{0a} = P_0 / (3 * U_1)$$

где  $U_1$  - *фазное напряжение первичной обмотки*.

На рис. 3.4. изображена *векторная диаграмма* трансформатора при холостом ходе.

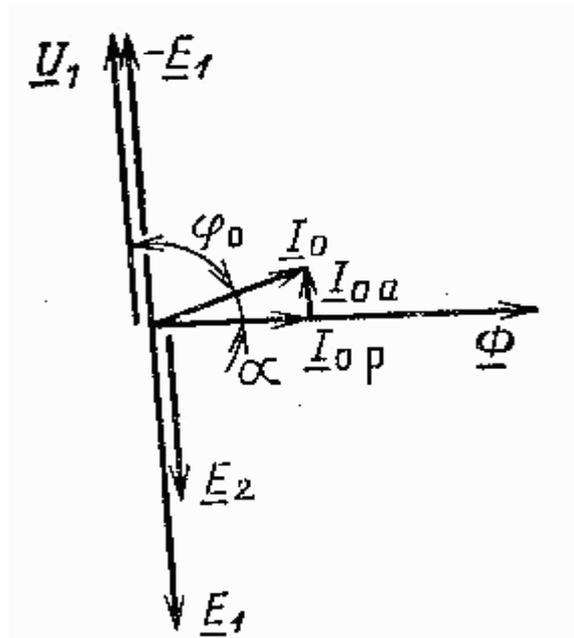


рисунок 3.4.

Из-за малого падения напряжения в первичной обмотке от тока  $I_0$  принято, что приложенное напряжение уравнивается наведенной ЭДС, т.е.  $U_1 = E_1$ .

Так как обычно  $I_{op} > I_{0a}$ , угол  $\varphi_0$  близок к  $\pi/2$ ,  $\cos \varphi_0$  имеет низкое значение и ток холостого хода является *реактивным током*.

*Потери* холостого хода и *ток холостого хода* являются важными характеристиками, снижение которых уменьшает *потери энергии и*

**потребление реактивного тока в трансформаторе.** Это достигается путем применения электротехнической стали с улучшенными магнитными свойствами, применение шихтованных впереплет конструкций магнитопроводов. В современных трансформаторах **потери холостого хода** составляют  $0,1 - 0,2 \%$  от их номинальной мощности, а ток холостого хода –  $0,5 - 10\%$  номинального тока первичной обмотки. Большие величины относятся к трансформаторам малой мощности.

### 3.3.1. Опыт холостого хода трансформатора.

Для экспериментального определения потерь холостого хода, тока холостого хода, коэффициента мощности и коэффициента трансформации проводится опыт холостого хода (**рис.3.5.**).

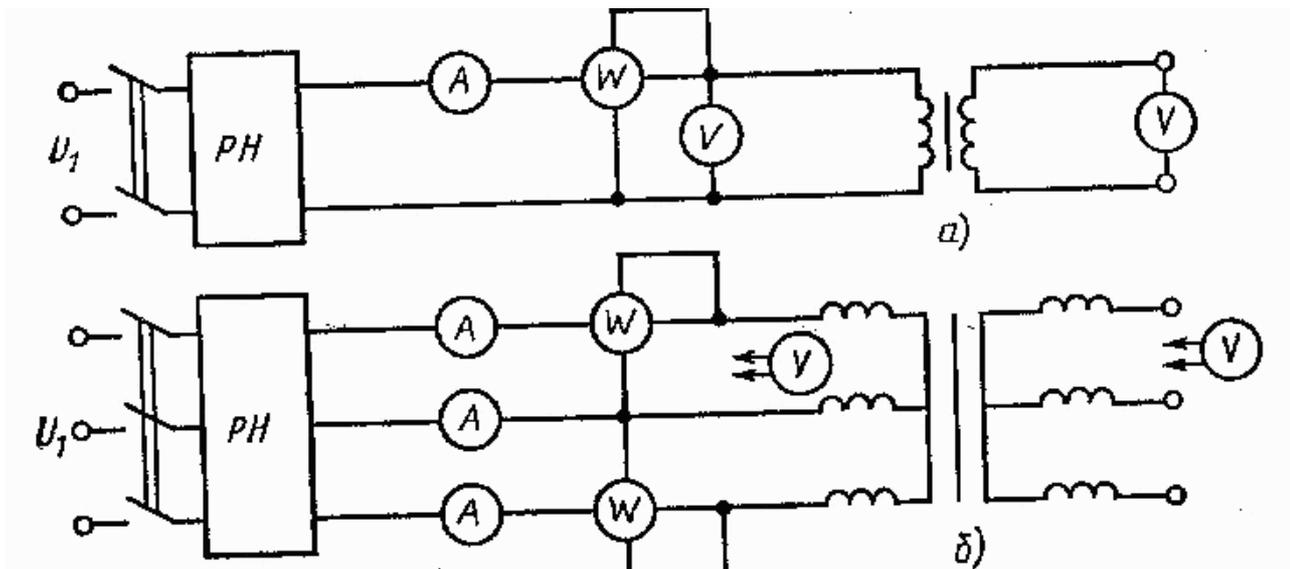


рисунок 3.5

Кроме того, в нем определяется полное сопротивление схемы замещения трансформатора.

Одна обмотка подключается на синусоидальное напряжение. В ее цепь включаются амперметры, вольтметры и ваттметры. Ко второй обмотке при опыте подключается вольтметр.

С помощью регулятора напряжения постепенно повышают напряжение вот нуля до  $(1,1 - 1,2) * U_{ном}$ . По данным измерений строят зависимости

$$I_0 = f(U_1)$$

$$P_0 = f(U_1)$$

$$\cos\varphi = f(U_1)$$

Эти зависимости называются характеристиками холостого хода.

У **стержневых** трансформаторов при расположении стержней в одной плоскости токи холостого хода в фазах будут **неодинаковыми**, т.к. такой трансформатор имеет **магнитную несимметрию** и расчетная длина магнитного потока в средней фазе меньше, чем в крайних. Поэтому для построения характеристик трехфазного трансформатора принимают средние значения  $U_1$  и  $I_0$ . Мощность  $P_0$  для трех фаз определяют по показаниям двух

ваттметров (при отклонении стрелок приборов в одну сторону их показания складываются и при отклонении в разные стороны вычитаются)

При возрастании напряжения *ток холостого хода* растет сначала *линейно, а затем нелинейно* (быстрее, чем напряжение). Это объясняется тем, что с возрастанием  $U_1$  увеличивается поток  $\Phi_m$  в трансформаторе. С нарастанием потока происходит насыщение магнитной цепи, что вызывает резкое увеличение намагничивающего тока.

*Потери холостого хода* изменяются примерно пропорционально *квадрату первичного напряжения*. Такой закон изменения следует из того, что магнитные потери в сердечнике при  $f = const$  пропорциональны  $B^2$ , а так как  $B$  пропорционально  $M$  и пропорционально  $U_1$ , то следовательно  $P_0$  пропорционально  $U_1^2$ .

С увеличением напряжения *коэффициент мощности уменьшается*, т.к. ток холостого хода растет быстрее, чем напряжение, следовательно, числитель дроби растет медленнее, чем знаменатель.

Наибольшее практическое значение имеют указанные величины, измеренные при *номинальном напряжении*.

### 3.5. Работа трансформатора при нагрузке

Предположим, что первичная обмотка трансформатора присоединена к сети с  $U_1 = const$ , и к вторичной обмотке подключены различного рода потребители. Тогда во вторичной обмотке под действием ЭДС  $E_2$  потечет ток  $I_2$ , при этом ток в первичной обмотке увеличится и станет равным  $I_1$ .

Начнется передача электромагнитным путем энергии во вторичную цепь. Такой режим работы трансформатора называется режимом *нагрузки*.

Рассмотрим процессы, происходящие в трансформаторе, на примере однофазного трансформатора. Если трехфазный трансформатор питает симметричную нагрузку, то токи во всех фазах равны и процессы в каждой его фазе протекают так же, как и в однофазном трансформаторе.

Токи  $I_1$  и  $I_2$ , протекая по обмоткам, создадут свои *магнитные потоки*, которые, накладываясь друг на друга, создадут *результатирующий* магнитный поток трансформатора.

Один из потоков  $\Phi$  замыкается по *магнитопроводу* трансформатора и сцеплен полностью со всеми витками первичной и вторичной обмоток. Поток  $\Phi$  называется *главным потоком* или потоком *взаимной индукции*.

При изменении этого потока в обмотках трансформаторов индуцируются *основные ЭДС  $E_1$  и  $E_2$* .

Согласно *закону полного тока* поток  $\Phi$  создается совместным действием *МДС обеих обмоток*.

Если принять, что токи изменяются по синусоидальному закону, то можно записать

$$\underline{I}_1 * w_1 + \underline{I}_2 * w_2 = \underline{F}_{12} \quad (3.9)$$

где  $\underline{F}_{12}$  - результирующая МДС.

*Результирующую МДС* представим как произведение некоего *тока* в первичной обмотке на *число витков* в этой обмотке, т.е.

$$\underline{I}_1 * w_1 + \underline{I}_2 * w_2 = \underline{I}_{12} * w_1 \quad (3.10)$$

Уравнение (10) называется *уравнением МДС*. Ток  $I_{12}$  принято называть *намагничивающим током*.

Если правую и левую части уравнения (10) поделить на  $w_1$ , получим

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2' = \underline{I}_{12} \quad (3.11)$$

где  $\underline{I}_2' = \underline{I}_2 * (w_2/w_1)$

Процесс намагничивания сердечника *током*  $\underline{I}_{12}$  протекает так же, как и при холостом ходе током  $I_0$ .

Поэтому ток  $\underline{I}_{12}$  также имеет *две составляющие*.

Одна из них является собственно *намагничивающей* составляющей, так как обуславливает магнитный поток  $\Phi$ , и по фазе совпадает с *поток*.

Другая составляющая тока обусловлена магнитными *потерями* и будет *опережать* поток на угол  $\pi/2$ .

Поскольку поток замыкается по магнитопроводу, то из – за насыщения при больших значениях индукции зависимость  $\Phi=f(I_{12})$  *носит нелинейный характер*. Поэтому ток  $I_{12}$  в общем случае будет несинусоидальным.

Исходя из *равенства* действующих значений его можно заменить *эквивалентным синусоидальным* током. В дальнейшем под током  $I_{12}$  будем понимать *синусоидальный намагничивающий ток*.

Два других потока имеют ту особенность, что каждый из них сцеплен только с витками *одной из обмоток* и не участвует в *передаче энергии* из одной обмотки в другую.

*Поток*  $\Phi_{\sigma 1}$  сцеплен с витками *первичной* обмотки и создает *МДС*  $I_1 * w_1$ , а *поток*  $\Phi_{\sigma 2}$  – с витками *вторичной* обмотки и создает. *МДС*  $I_2 * w_2$

Потоки  $\Phi_{\sigma 1}$  и  $\Phi_{\sigma 2}$  называют *потоками рассеяния* соответственно первичной и вторичной обмоток.

Потоки рассеяния практически замыкаются вне магнитопровода, т.е. по *воздуху или по маслу*. Так как *магнитные проницаемости* воздуха и масла во много раз меньше, чем у стали, и являются *постоянными* величинами, потоки рассеяния в трансформаторе со стальным магнитопродом будут *небольшими* и *пропорциональными* соответствующему току.

Для удобства считают, что главный поток и потоки рассеяния существуют независимо друг от друга.

Все три потока, изменяясь, будут наводить ЭДС в обмотках трансформатора.

Полагая, что все электрические и магнитные величины изменяются по синусоидальному закону, запишем по второму закону Кирхгофа уравнение для первичной и вторичной обмоток в комплексной форме:

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 + \underline{E}_{\sigma 1} = \underline{I}_1 * r_1 \quad (3.12)$$

$$\underline{E}_2 + \underline{E}_{\sigma 2} = \underline{I}_2 * r_2 + \underline{U}_2 \quad (3.13)$$

где

ЭДС  $\underline{E}_1$  и  $\underline{E}_{22}$  наводятся главным магнитным потоком,

ЭДС  $\underline{E}_{\sigma 1}$  и  $\underline{E}_{\sigma 2}$  – соответствующими потоками рассеяния

$r_1$  и  $r_2$  - активные сопротивления обмоток

При записи уравнений  $\underline{U}_1$  понимается как ЭДС первичной сети, введенная в обмотку извне, а как  $\underline{U}_2$  падение напряжения на сопротивлении нагрузки.

Поскольку потоки рассеяния обмоток пропорциональны соответствующим токам, то ЭДС  $E_{\sigma 1}$  и  $E_{\sigma 2}$  также будут пропорциональны соответствующим токам, т.е.

$$\begin{aligned} E_{\sigma 1} &= x_1 * I_1 \\ E_{\sigma 2} &= x_2 * I_1 \end{aligned} \quad (3.14)$$

здесь  $x_1$  и  $x_2$  являются коэффициентами пропорциональности между ЭДС и токами и носят название **индуктивных сопротивлений рассеяния** первичной и вторичной обмоток.

Переходя к комплексной записи уравнений (14) и имея в виду, что ЭДС, наводимая в обмотке, отстает от потока на угол  $\pi/2$ , а потоки рассеяния совпадают по фазе с токами обмоток, имеем

$$\begin{aligned} \underline{E}_{\sigma 1} &= -j x_1 * I_1 \\ \underline{E}_{\sigma 2} &= -j x_2 * I_1 \end{aligned} \quad (3.15.)$$

Подставив (3.15) в (3.12) и (3.13), получим

$$\underline{U}_1 = - \underline{E}_1 + \underline{I}_1 * \underline{Z}_1 \quad (3.16)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 * \underline{Z}_2 \quad (3.17)$$

где

$\underline{Z}_1 = r_1 + jx_1$  и  $\underline{Z}_2 = r_2 + jx_2$  - комплексные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Уравнения (3.16) и (3.17) носят название **уравнений электрического равновесия**. Эти уравнения вместе с уравнением (11) называются **основными уравнениями трансформатора**.

Согласно (16) приложенное к первичной обмотке напряжение уравновешивается наведенной в ней ЭДС и падением напряжения на ней. При работе трансформатора в диапазоне от холостого хода до нагрузок, незначительно превышающих номинальную, падение напряжения относительно мало (2 - 4%) и можно принять  $U_1 = E_1$ , так как  $E_1 = 4.44 f_1 * w_1 * \Phi_m$ , то при  $U_1 = const$  можно считать, что в указанном диапазоне нагрузок главный поток трансформатора должен оставаться практически постоянным, при этом намагничивающий ток тоже будет неизменным и равным току холостого хода.

Для сохранения постоянного значения магнитного потока при нагрузке трансформатора согласно формуле  $\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} + (-\underline{I}_2')$ , полученной из (11), должен возрастать и ток  $\underline{I}_1$ .

При этом магнитное поле тока  $\underline{I}_2$  будет компенсироваться магнитным действием составляющей тока  $(-\underline{I}_2')$  в токе  $\underline{I}_1$ .

Так как ток  $I_{12}$  мал, то при нагрузках, близких к номинальной, можно принять, что  $I_1 = I_2'$ .

Отсюда можно найти соотношение токов в первичной и вторичной обмотках.

$$I_1 / I_2 = w_2 / w_1 \approx 1 / n_m.$$

### 3.6. Приведение величин вторичной обмотки к числу витков первичной

При больших коэффициентах трансформации, численных значений токов, напряжений, ЭДС и сопротивлений первичной и вторичной обмоток сильно отличаются друг от друга. Это затрудняет количественный анализ работы трансформатора, которое можно устранить если реальный трансформатор, имеющий различные числа витков у первичной и вторичной обмоток, заменить эквивалентным трансформатором, у которого обе обмотки будут иметь одинаковые числа витков ( $w_1 = w_2$ ). Такой трансформатор называется приведенным. Указанная замена будет правомерной, если все энергетические и электромагнитные соотношения в реальном и приведенном трансформаторе будут одинаковыми. Исходя из этого определяются токи, ЭДС, напряжения и сопротивления вторичной обмотки трансформатора. Эти величины называются приведенными к числу витков первичной обмотки или просто приведенными.

Так как  $w_1 = w_2$ , то

$$E_2 \checkmark = E \checkmark = E_2 * w_1 / w_2 = E_2 * n_m$$

Аналогично

$$U_2 \checkmark = U_2 * n_m$$

МДС вторичной обмотки приведенного трансформатора должна быть равна МДС обмотки первичного, т.е.

$$I_2 \checkmark * w_1 = I_2 * w_2$$

Откуда

$$I_2 \checkmark = I_2 * \frac{w_2}{w_1} = I_2 * \frac{1}{n_m} \quad (18)$$

при этом полная мощность вторичной обмотки остается неизменной

$$U_2 \checkmark * I_2 \checkmark = U_2 * n_m * I_2 * \frac{1}{n_m} = U_2 * I_2 \quad (19)$$

Потери во вторичной обмотке реального и приведенного трансформаторов должны быть одинаковыми

$$(I_2 \checkmark)^2 * r_2 \checkmark = I_2^2 * r_2$$

С учетом (18) получим

$$r_2 \checkmark = r_2 * \left( \frac{w_1}{w_2} \right)^2 = r_2 * n_m^2$$

Для того, чтобы отношения между активными и индуктивными сопротивлениями рассеяния у трансформаторов сохранялись, необходимо, чтобы выполнялось равенство

$$x_2 \checkmark = x_2 * n_m^2$$

Откуда следует, что сопротивление вторичной обмотки

$$z_{\check{2}} = z_2 * n_m^2$$

Если сопротивление нагрузки  $z_{\check{H}}$ , то по аналогии

$$z_{\check{H}} = z_H * n_m^2$$

Для приведенного трансформатора уравнения, описывающие процесс в нем

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 * \underline{Z}_1$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 * \underline{Z}_2$$

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 = \underline{I}_{12}$$

(20)

Приведение величин

вторичной обмотки позволяет построить также удобную схему замещения трансформатора.

### 3.7. Векторная диаграмма трансформатора

Векторные диаграммы являются иллюстрацией комплексных уравнений

При построении диаграммы трансформатора, работающего на активно – индуктивную и активно – емкостную нагрузку известным считаем магнитный поток  $\Phi$ , создаваемый током  $\underline{I}_{12}$ , опережающим его на угол  $\alpha$ .

ЭДС, наводимые в обмотках, пропорциональны числу витков и отстают от потока на угол  $\pi/2$ .

Ток вторичной обмотки при активно – индуктивной нагрузке будет отставать от ЭДС  $\underline{E}_2$ , а при активно – емкостной – опережать ее.

Напряжение на вторичной обмотке определим согласно (3.20), если вычтем из  $\underline{E}_2$  векторы падения напряжений  $\underline{I}_2 * r$  и  $j\underline{I}_2 * x$ .

Находим ток

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} + (-\underline{I}_2),$$

прибавляя к вектору  $\underline{I}_{12}$  вектор  $-\underline{I}_2 = -\underline{I}_2 * \frac{w_1}{w_2}$ .

Напряжение  $\underline{U}_1$  получим, если к вектору  $-\underline{E}_1$  прибавим векторы падений напряжений в активном сопротивлении первичной обмотки  $\underline{I}_1 * r_1$  и индуктивном сопротивлении рассеяния этой обмотки  $j\underline{I}_1 * x_1$  (вектор опережает ток  $\underline{I}_1$  на угол  $\pi/2$ ). Угол сдвига между напряжением и током первичной обмотки обозначим  $\varphi_1$ , угол между напряжением и током вторичной обмотки  $\varphi_2$ . Векторная диаграмма трансформатора приведена на **рис.3.6**

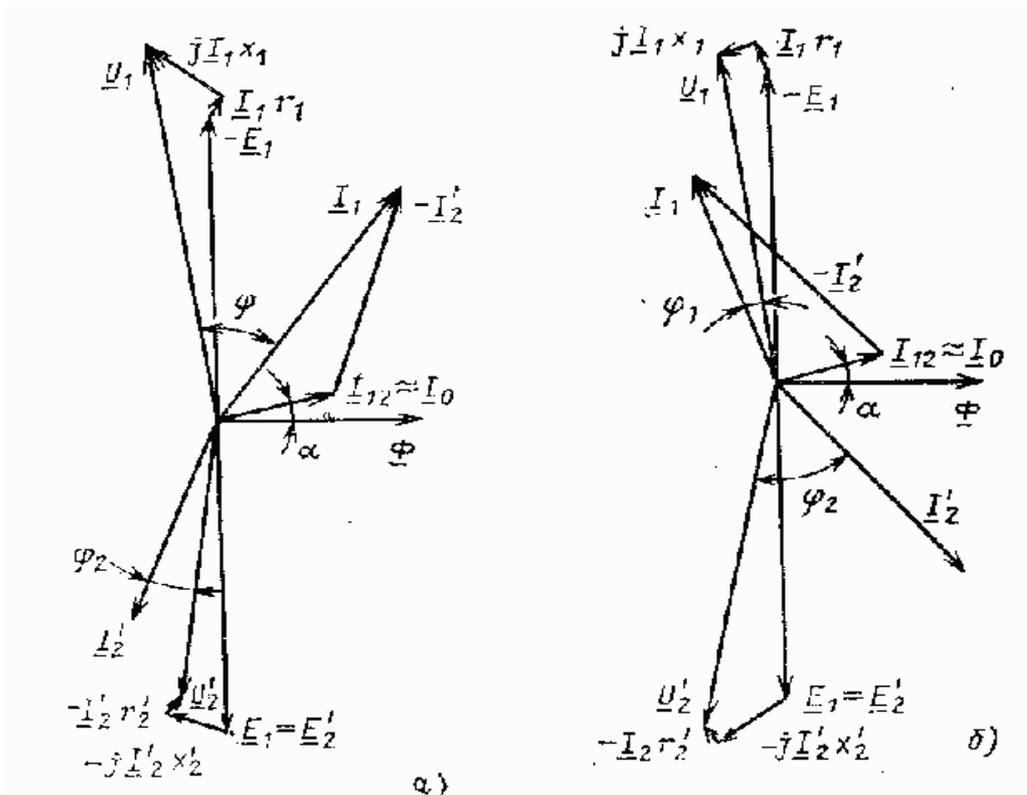


рисунок 3.6.

### 3.8. Схема замещения трансформатора.

В трансформаторе связь между первичной и вторичной обмоткой трансформатора магнитная. При расчете режимов работы и характеристик удобно магнитную связь заменить электрической. В этом случае исследование работы трансформатора упрощается и сводится к расчету относительно простой электрической цепи. Электрическая схема, в которой магнитная связь между обмотками трансформатора заменена на электрическую, называется схемой замещения трансформатора.

Структура этой схемы выбирается таким образом, чтобы ей соответствовали уравнения (3.20), описывающие рабочий процесс в трансформаторе.

Предварительно проведем несколько преобразований в этих уравнениях.

ЭДС первичной  $\underline{E}_1$  и вторичной обмотки  $\underline{E}_2$  отстают по фазе от тока  $\underline{I}_2$

С учетом этого зависимость между ЭДС обмоток и током в комплексной форме

$$-\underline{E}_1 = -\underline{E}_2 = \underline{Z}_{12} * \underline{I}_2 \quad (3.21.)$$

где  $\underline{Z}_{12} = r_{12} + jx_{12}$  - комплексный коэффициент пропорциональности, называемый полным сопротивлением взаимной индукции.

Сопротивление  $x_{12}$  называется индуктивным сопротивлением взаимной индукции трансформатора и обусловлено главным потоком, который замыкается по сердечнику трансформатора. Сопротивление  $r_{12}$  представляет

собой некое фиктивное сопротивление, посредством которого учитываются магнитные потери в трансформаторе. Численно оно равно

$$r_{12} = \frac{P_{m2}}{m * I_{12}^2}$$

Обычно у силовых трансформаторов

$$x_{12} \approx r_{12}$$

Напряжение вторичной обмотки может быть выражено в следующем виде

$$\underline{U}'_2 = \underline{Z}'_{12} * \underline{I}'_2 \quad (3.22)$$

где  $\underline{Z}'_{12}$  - приведенное сопротивление нагрузки.

С учетом (3.21.) и (3.22.) уравнения (3.20) приобретут вид

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_{12} * \underline{I}_{12} + \underline{Z}_1 * \underline{I}_1$$

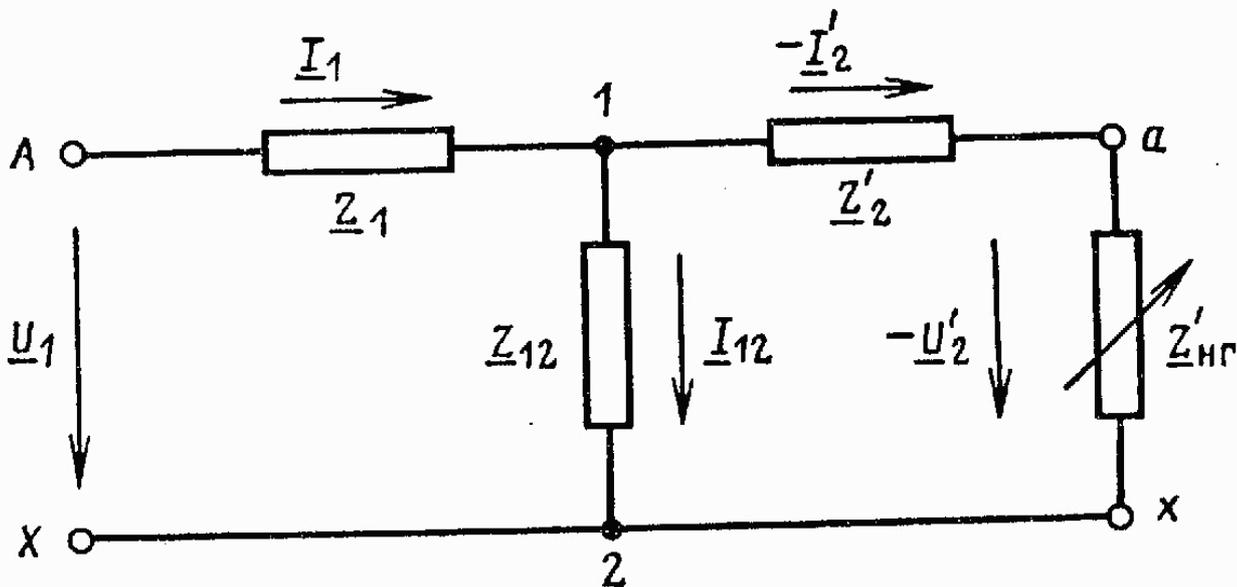
$$\underline{Z}'_{12} * \underline{I}'_2 = -\underline{Z}_{12} * \underline{I}_{12} - \underline{Z}'_2 * \underline{I}'_2 \quad (3.23)$$

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 = \underline{I}_{12}$$

Решая совместно уравнения, получим

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 * \frac{\underline{Z}'_{12} * \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{12} * (\underline{Z}_{12} + \underline{Z}'_2)}{\underline{Z}'_{12} + (\underline{Z}_{12} + \underline{Z}'_2)} = \underline{I}_1 * \underline{Z}_b \quad (3.24)$$

Эквивалентное сопротивление можно рассматривать как сопротивление цепи, схема которой представлена на **рис 3.7.**



рисунки 3.7.

Эта схема полностью удовлетворяет исходным уравнениям. Контур A12X соответствует первое уравнение (3.23) для первичной обмотки; контур a12x – второе уравнение (3.23.) для вторичной обмотки; а для узловых точек 12 справедливо третье уравнение (3.23.). Изображенная на рис () схема является схемой замещения.

Комплексные сопротивления первичной и вторичной обмоток являются постоянными, т.к. практически не зависят от токов и напряжения  $U_1$ .

Ветвь, включенная между точками 1 и 2. называется намагничивающей ветвью. Полное сопротивление  $Z_{12}$ , включенное в эту ветвь, называют намагничивающей ветвью. Сопротивления  $x_{12}$  и  $r_{12}$  существенно зависят от подводимого напряжения, так как с увеличением напряжения возрастает ЭДС первичной обмотки, а следовательно, поток  $\Phi$ . Начиная с некоторого значения потока происходит насыщение магнитопровода и намагничивающий ток  $I_{12}$  будет расти быстрее, чем напряжение. Так как

$$x_{12} \approx z_{12} = \frac{E_1}{I_{12}} \approx \frac{U_1}{I_{12}};$$

$$r_{12} = \frac{P_{мг}}{m * I_{12}^2} : \left( \frac{U_1}{I_{12}} \right)^2$$

то с ростом напряжения эти сопротивления уменьшаются.

Сопротивления  $Z$ , а также их активные и индуктивные составляющие, называются параметрами схемы замещения.

При сопоставлении параметров схем замещения удобно выражать их в относительных единицах, для чего соответствующую величину сопротивления, выраженную в Омах, делят на базисную величину (в трансформаторах за базисную принимается отношение номинальных значений напряжения и тока первичной обмотки, для трехфазных трансформаторов – их фазных значений)

Параметры схемы замещения могут быть найдены расчетным или опытным путем. В последнем случае обращаются к данным опыта холостого хода и опыта короткого замыкания.

### **3.9. Опыт короткого замыкания**

Коротким замыканием называют режим работы трансформатора, при котором первичная обмотка подсоединена к сети, а выводы вторичной замкнуты накоротко и  $U_2=0$ .

Короткое замыкание при номинальном первичном напряжении является аварийным режимом, при котором токи в обмотках в несколько десятков раз превышают номинальными и могут быть опасными для трансформатора.

В опыте короткого замыкания к трансформатору подводится напряжение, которое выбирается так, чтобы токи в обмотках были равны или близки к номинальным. Оно обычно составляет 3 -15% номинального напряжения.

Из опыта короткого замыкания определяют потери и напряжение короткого замыкания, а также, некоторые параметры схемы замещения.

При пониженном напряжении уменьшается поток  $\Phi$ , что вызовет сильное уменьшение намагничивающего тока  $I_{12}$ . Поэтому можно принять, что  $I_{12} \approx 0$

Тогда уравнения трансформатора при коротком замыкании запишутся в виде:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{1k} &= -\underline{E}_{1k} + \underline{I}_{1k} * \underline{Z}_1 \\
 0 &= \underline{E}_{2k} - \underline{I}_{2k} * \underline{Z}_2 \\
 0 &= \underline{I}_{1k} + \underline{I}_{2k}
 \end{aligned}
 \tag{3.25}$$

Из (3.25) следует, что токи в обмотках приведенного трансформатора при коротком замыкании равны по значению и противоположны по направлению.

Определим ЭДС, наводимые в обмотках

$$-\underline{E}_{2k} = -\underline{E}_{1k} = -\underline{I}_{2k} * \underline{Z}_2 = \underline{I}_{1k} * \underline{Z}_2 \tag{3.26}$$

Подставив (3.26) в первое уравнение (3.25.), получим

$$\underline{U}_{1k} = \underline{I}_{1k} * (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2) = \underline{I}_{1k} * \underline{Z}_k$$

(3.27)

Сумма сопротивлений первичной обмотки и приведенного сопротивления вторичной обмотки носит название сопротивления короткого замыкания

где

$$r_k = r_1 + r_2$$

$$x_k = x_1 + x_2$$

Так как  $\underline{Z}_1 \approx \underline{Z}_2$ , то из сопоставления (3.27) и (3.26) следует, что при коротком замыкании в первичной обмотке трансформатора наводится ЭДС, примерно равная половине напряжения короткого замыкания.

Уравнению (3.27) соответствует схема замещения трансформатора при коротком замыкании рис (3.7) и векторная диаграмма рис (3.8).

Треугольник сопротивлений (или напряжений) на векторной диаграмме называется треугольником короткого замыкания. Угол  $\varphi_k$  зависит от соотношения между индуктивным и активным сопротивлениями.

$$\varphi_k = \arctg\left(\frac{x_k}{r_k}\right)$$

С повышением мощности трансформатора индуктивное сопротивление возрастает, активное уменьшается, вследствие чего угол увеличивается, приближаясь к  $\pi/2$ .

Напряжение номинальной частоты, которое следует подвести к выводам первичной обмотки при замкнутой накоротко вторичной, называется напряжением короткого замыкания.

Оно обычно выражается в % от номинального напряжения первичной обмотки и указывается на щитке трансформатора.

$$u_k = \frac{U_{1кз} * 100}{U_{1ном}} = \frac{I_1 * Z}{U_{1ном}} * 100 \tag{3.29}$$

Напряжение короткого замыкания имеет активную и индуктивную составляющие.

$$\begin{aligned}
 u_{ka} &= u_k * \cos \varphi_{1k} = \frac{I_{1ном} * r_k}{U_{1ном}} * 100 \\
 u_{kp} &= u_k * \sin \varphi_{1k} = \frac{I_{1ном} * x_k}{U_{1ном}} * 100
 \end{aligned}
 \tag{3.30}$$

Если напряжение короткого замыкания и его составляющие выразить в относительных единицах, то они будут равны соответствующим сопротивлениям в относительных единицах.

$$u_{k*} = \frac{U_{1k}}{U_{1ном}} = \frac{I_{1ном} * Z_k}{U_{1ном}} = \frac{Z_k}{Z_0} = Z_{k*}$$

$$u_{ka*} = r_{k*}$$

$$u_{kp} = x_{k*}$$

Таким образом, напряжение короткого замыкания характеризует внутреннее сопротивление трансформатора, от него зависит падение напряжения, внешние характеристики и ток короткого замыкания трансформатора.

Оно учитывается при подборе трансформаторов для параллельной работы. В силовых трансформаторах напряжение короткого замыкания составляет 4-15%.

При опыте короткого замыкания из сети потребляется активная мощность, которая идет на покрытие потерь внутри трансформатора. Потери, возникающие при таком режиме, называются потерями короткого замыкания. Главную часть потерь короткого замыкания составляют основные потери в обмотках. Таким образом, потери короткого замыкания при номинальном токе в обмотках

$$P_k = m_1 * I_{1k}^2 * r_k$$

$$I_{1k} : U_{1k}$$

$$P_k : U_{1k}^2$$

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{(m_1 * U_{1k} * I_{1k})} : \frac{U_{1k}^2}{U_{1k}^2} = const \tag{3.31}$$

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}}$$

$$r_k = \frac{P_k}{(m_{11k} * I_{1k}^2)}$$

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}$$

Магнитные потери короткого замыкания малы и ими пренебрегают.

Опыт короткого замыкания проводится по схеме, приведенной на **рис.**

### **3.8.**

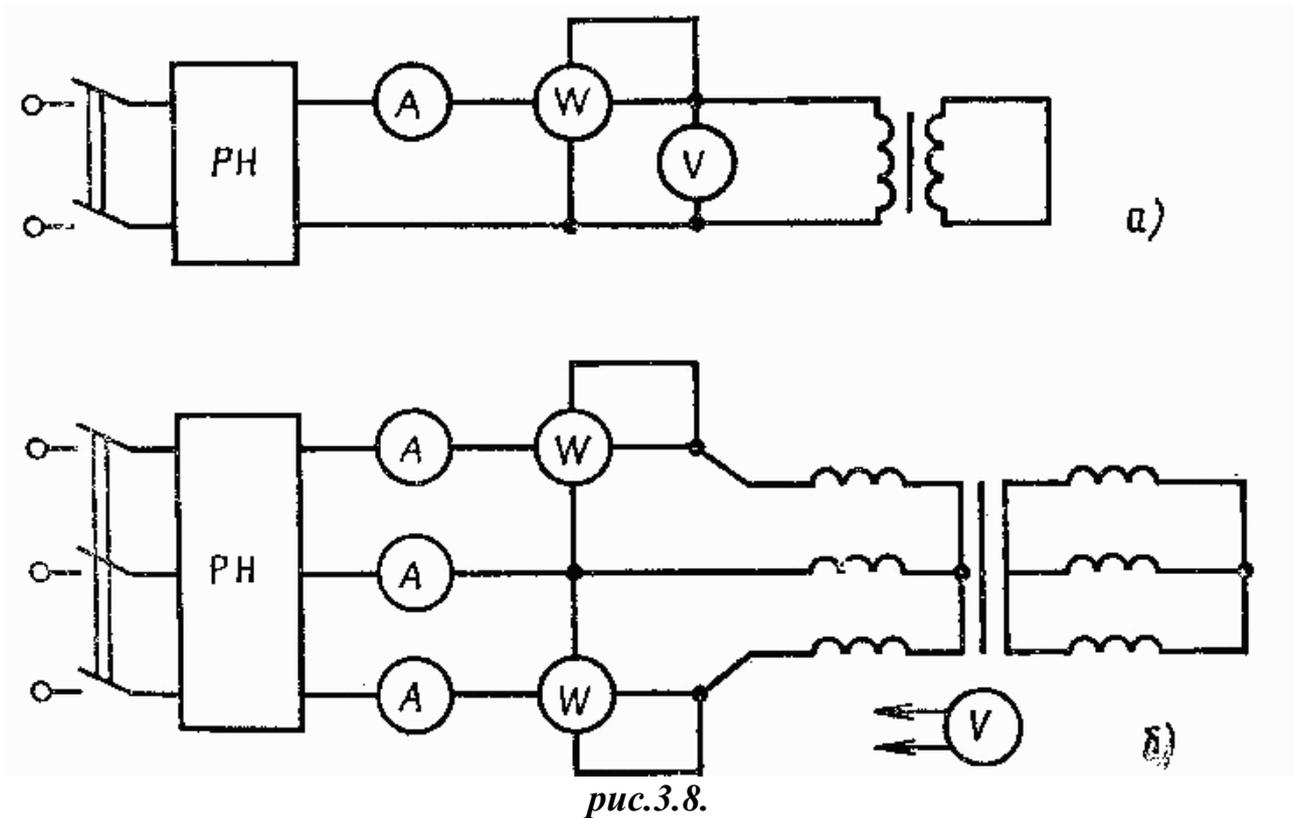


рис.3.8.

По данным измерений строятся зависимости, которые называются характеристики короткого замыкания.

$$I_{1k} = f(U_{1k});$$

$$P_k = f(U_{1k});$$

$$\cos\varphi_{1k} = f(U_{1k})$$

Для трехфазных трансформаторов зависимости строятся для средних фазных значений тока и напряжения. Мощность короткого замыкания равна мощности трех фаз.

Характер приведенных на рис (3.9.) зависимостей объясняется следующим образом:

Так как индуктивные сопротивления первичной ( $x_1$ ) и вторичной ( $x_2$ ) определяются потоками рассеяния, то можно принять

$$x_k = x_1 + x_2 = \text{const}$$

1. Активные сопротивления обмоток  $r_1$  и  $r_2$  также постоянны. Поэтому  $Z_k = \text{const}$ . Отсюда следует, что поскольку  $I_{1k} = U_{1k} / Z_k$ , зависимость  $I_{1k} = f(U_{1k})$  должна иметь линейный характер.

2. Потери при коротком замыкании

$$P_k = m_1 * I_{1k}^2 * r_k$$

Так как  $I_{1k} : U_{1k}$ , то  $P_k : U_{1k}^2$

$$3. \cos\varphi_k = \frac{P_k}{(m_1 * U_{1k} * I_{1k})} : \frac{U_{1k}^2}{U_{1k}^2} = \text{const}$$

т.е. коэффициент мощности не зависит от напряжения короткого замыкания.

4. Опытные данные позволяют определить

$$r = \frac{P_k}{(m_{11k} * I_{1k}^2)}$$

$$x = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}$$

$$Z_1 \approx Z_2 \approx \frac{Z_k}{2}$$

$$r_1 \approx r_2 \approx \frac{r_k}{2}$$

$$x_1 \approx x_2 \approx \frac{x_k}{2}$$

$$Z_1 + Z_{12} = \frac{U_1}{I_0}$$

$$r_1 + r_{12} = \frac{P_0}{(m_1 * I_0^2)}$$

$$x = \sqrt{Z_{12}^2 + r_{12}^2}$$

$$Z_{12} ? Z_1$$

$$r_{12} ? r_1$$

$$Z_{12} = \frac{U_1}{I_0}$$

$$r_{12} = \frac{P_0}{(m_1 * I_0^2)}$$

Полученные значения приводятся к расчетной температуре.

Векторная диаграмма трансформатора в режиме короткого замыкания приведена на **рис. 3.9.**

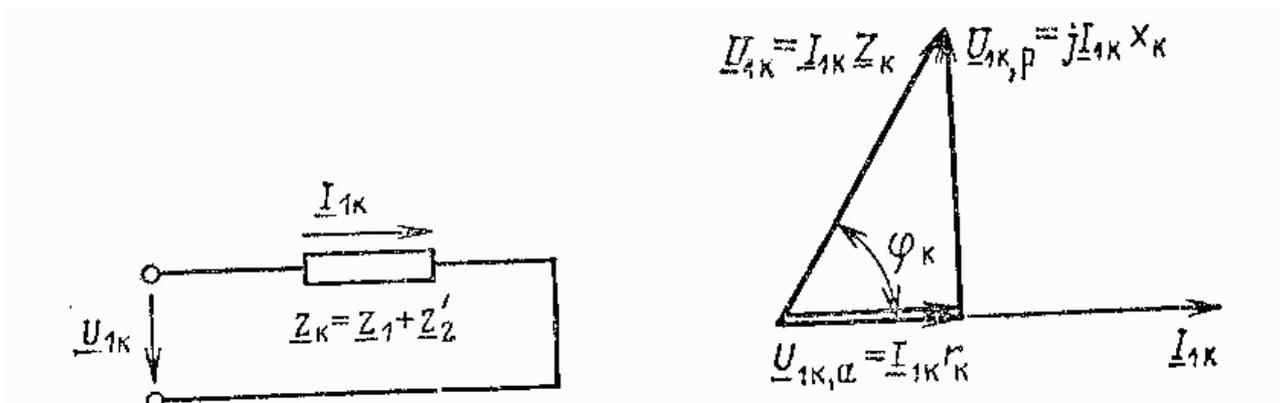


рисунок 3.9.

### **3.10. Группы соединения обмоток трансформатора.**

В определенных случаях при работе трансформатора необходимо знать относительный сдвиг фаз между ЭДС первичной и вторичной обмоток, Для оценки этого сдвига вводится понятие о группе соединения обмоток.

Группа соединения зависит от маркировки выводов, а для трехфазных трансформаторов – от схемы соединения фаз между собой.

Рассмотрим однофазный трансформатор. на рис9. изображен стержень с двумя обмотками. Обе обмотки сцеплены с одним и тем же потоком, поэтому ЭДС этих обмоток в любой момент времени будут направлены в одинаковых направлениях, т. е. ЭДС будут совпадать по фазе.

Если этот же трансформатор будет иметь обмотку, например, нн, концы у которой будут переставлены обозначения выводов по сравнению с предыдущим случаем, тогда ЭДС в любой момент времени будут действовать в противоположных направлениях.

Принято сдвиг фаз между ЭДС характеризовать положением стрелки на циферблате часов, при этом вектор ЭДС обмотки ВН совмещается с минутной стрелкой часов и постоянно устанавливается на цифре 12, а вектор ЭДС обмотки НН – с часовой стрелкой. Цифра, на которую будет ориентирована часовая стрелка, показывает группу соединения обмоток.

В первом случае, когда угол сдвига между векторами ЭДС равен 0, они оба ориентированы на цифру 12, принимается, что часы показывают 0 часов, и трансформатор с такой маркировкой будет иметь нулевую группу соединения.

Во втором случае положение векторов соответствует 6 часам и трансформатор будет иметь шестую группу соединения обмоток.

Однофазные трансформаторы могут иметь только эти группы соединения обмоток. Они обозначаются  $I/I-0$  или  $I/I-6$ . Стандартной считается нулевая группа.

В трехфазных трансформаторах может быть образовано 12 групп со сдвигом фаз от 0 до 330 градусов через 30 градусов, что соответствует 12 цифрам часового циферблата.

Группу соединения принято определять по углу сдвига фаз между одноименными линейными векторами.

Определим группу соединения обмоток трансформатора, схема соединения обмоток которого показана на рис. Предполагается, что обе обмотки имеют одинаковое направление намотки и одноименные фазы расположены на одном стержне. Тогда векторы фазных ЭДС обмоток ВН и НН будут совпадать по фазе, сдвиг между линейными ЭДС АВ и ав будет равен нулю и следовательно рассматриваемая схема соединения обмоток принадлежит к группе 0. Если у одной из обмоток поменять маркировку начал и концов фаз, то получим 6 группу соединения обмоток. Если у трансформатора, имеющего группу соединения 0, произвести круговую перемаркировку фаз обмотки НН, то получим трансформатор с 4 группой соединения (рис); еще одна групповая перемаркировка дает группу соединения 8. У трансформатора, имеющего группу соединения 6, можно получить группы

10 и 12. Таким образом, у трансформаторов со схемой соединения У/У можно получать четные группы. Четные группы можно получить также, если обе обмотки соединены в звезду. Нечетные группы получаются у трансформатора, одна обмотка которого соединена в звезду, а другая в треугольник. Трехфазные трансформаторы выпускаются с 11 группой соединения обмоток.

Группу соединения трансформатора можно получить опытным путем. Для этого трансформатор присоединяют к сети с трехфазной симметричной системой напряжений и соединяют у него два одноименных вывода, например А и а. Измеряют линейные напряжения обмоток и напряжения  $U_{Вв}$   $U_{Сс}$   $U_{Вс}$   $U_{Сб}$ . По полученным результатам в выбранном масштабе строят равносторонний треугольник линейных напряжений обмотки ВН. Из точек В и С этого треугольника циркулем проводят дуги радиусами  $U_{Вв}$  и  $U_{Сб}$ . Точка пересечения этих дуг является вершиной  $в$  треугольника линейных напряжений НН. Подобным построением получается точка  $с$ . Соединяя между собой точки  $с$   $в$  и  $а$  (она совпадает с точкой А, получим треугольник линейных напряжений. По установленному правилу, располагая стороны АВ и аb на циферблате часов, определяют группу соединения.

Группу соединений можно установить по сопоставлению результатов измерения напряжений с их расчетными значениями, найденными из формул для каждой группы соединения из векторных диаграмм, приведенными в справочной литературе. Трансформатор будет иметь ту группу соединения, для которой справочные и опытные значения будут равны.

### **3.11. Определение параметров схемы замещения трансформаторов.**

Параметры схемы замещения трансформаторов находятся из опытов холостого хода и короткого замыкания.

Из опыта короткого замыкания при  $I_1 = I_{ном}$  определяют  $Z_k$   $r_k$   $x_k$ .

Приближенно можно принять, что

$$\begin{aligned} Z_1 &\approx Z_2 \approx Z_k / 2 \\ r_1 &\approx r_2 \approx r_k / 2 \\ x_1 &\approx x_2 \approx x_k / 2 \end{aligned} \quad (3.32)$$

Схема замещения трансформатора при холостом ходе приведена на рис. (3.10). Из нее по данным опыта холостого хода можно найти

$$\begin{aligned} Z_1 + Z_{12} &= \frac{U_1}{I_0} \\ r_1 + r_{12} &= \frac{P_0}{(m_1 * I_0^2)} \end{aligned}$$

Так как

$$Z_{12} ? Z_1$$

$$r_{12} ? r_1$$

можно принять, что

$$Z_{12} = \frac{U_1}{I_0}$$

$$r_{12} = \frac{P_0}{(m_1 * I_0^2)}$$

Сопротивление  $x_{12}$

$$x = \sqrt{Z_{12}^2 + r_{12}^2}$$

Для трехфазного трансформатора сопротивления определяются фазными значениями тока и напряжения, мощность – мощностью трех фаз.

Как было сказано ранее, это напряжение для вторичной обмотки принимается за номинальное

### 3.12. Внешняя характеристика трансформатора.

Под внешней характеристикой трансформатора понимается зависимость напряжения на выводах вторичной обмотки от тока этой обмотки при условии постоянства коэффициента мощности, первичного напряжения и частоты.

$$U_2 = f(I_2)$$

$$\cos \varphi_2 = const$$

$$U_1 = const$$

$$f_1 = const$$

При холостом ходе напряжение вторичной обмотки равно ЭДС этой обмотки

$$E_{20} = U_{2ном}$$

При нагрузке трансформатора появляется ток во вторичной обмотке и увеличивается ток в первичной обмотке, Эти токи вызывают падение напряжения, в результате чего напряжение  $U_2$ . Если вследствие относительной малости пренебречь током намагничивания  $I_{12}$ , то при нагрузке трансформатор можно представить в виде упрощенной схемы замещения (**рис 3.10.**)

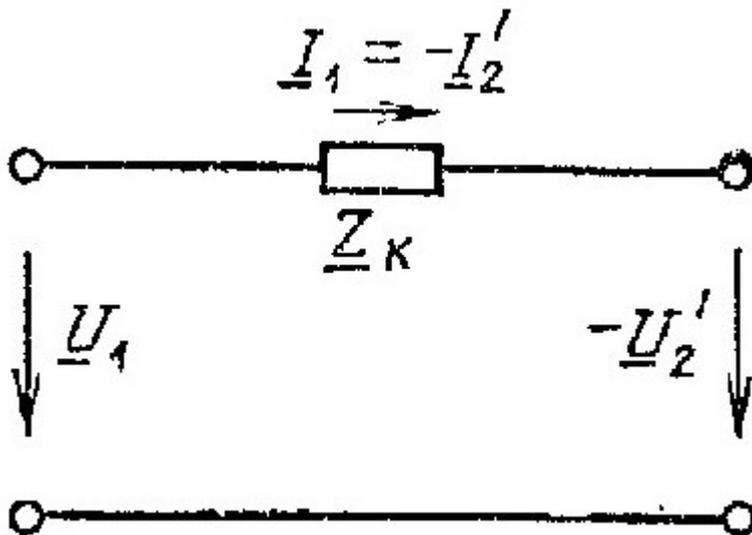


рисунок 3.10.

Исходя из этой схемы можно записать

$$-\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - I_1 * \underline{Z}_k$$

По этому уравнению построены две векторные диаграммы: одна для активно-индуктивной, а другая для активно – емкостной нагрузок.

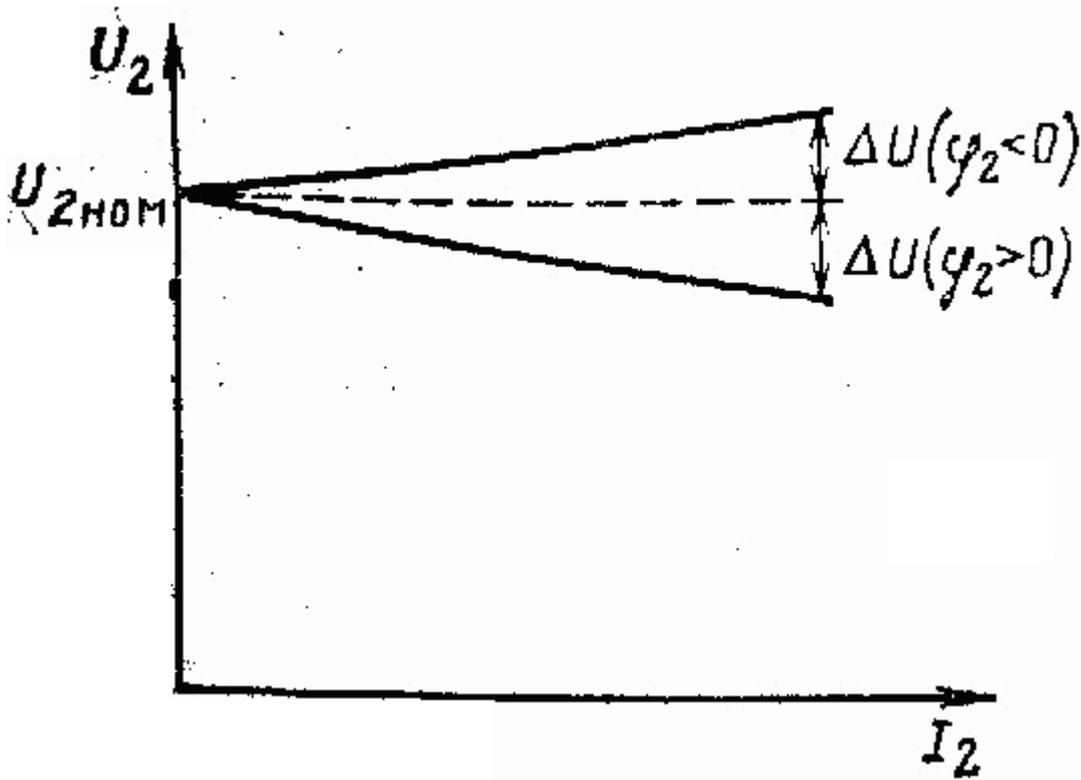


рисунок 3.11.

Как видно, вид внешней характеристики в зависимости от вида нагрузки может быть разным: с ее ростом при активно – индуктивной нагрузке вторичное напряжение падает, а при активно – емкостной может увеличиваться.

Арифметическая разность между вторичным напряжением при холостом ходе и нагрузочном токе называется изменением напряжения трансформатора; его принято выражать в процентах номинального напряжения

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_{2ном}} = \frac{U_{2ном} - U_2}{U_{2ном}} * 100 = \frac{U_{1ном} - U_2}{U_{1ном}} * 100$$

### 3.12. Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициентом полезного действия трансформатора называется отношение активной мощности вторичной мощности обмотки к активной мощности первичной обмотки. Коэффициент полезного действия трансформатора имеет высокое значение: от 0,95 для трансформаторов небольшой мощности до 0,995 для трансформаторов большой мощности.

Для трансформатора КПД рекомендуется находить по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{(P_2 + e P)} = 1 - \frac{e P}{(P_2 + e P)}$$

$e P$  - сумма потерь в трансформаторе.

В трансформаторе имеются два вида потерь: магнитные потери, вызванные протеканием потока по сердечнику, и электрические потери, вызванные протеканием тока по обмоткам.

Так как магнитный поток трансформатора при постоянстве первичного напряжения и изменении нагрузки от холостого хода до номинальной нагрузки практически остается постоянным, то и магнитные потери в этом диапазоне нагрузок можно принять постоянными и равными потерям холостого хода. Электрические потери пропорциональны квадрату тока. Их величину удобно выразить через потери короткого замыкания, полученные при номинальном токе.

$$P_{\text{э}} = P_k * \left( \frac{I_2}{I_{\text{ном}}} \right)^2 = P_2 * \beta^2$$

Напряжение вторичной обмотки мало изменяется в рассматриваемом диапазоне нагрузки, поэтому принято считать, что  $U_2 \approx U_{\text{ном}}$ .

Тогда

$$P_2 = m * U_2 * I_2 * \cos \varphi_2 = \beta * S_{\text{ном}} * \cos \varphi_2$$

где  $S_{\text{ном}} = m * U_2 * I_2$  - номинальная мощность трансформатора,  $m$  - число фаз.

Учитывая приведенные формулы,

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 * P_k}{\beta * S_{\text{ном}} * \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 * P_k}$$

$$M = \frac{P_{\check{2}}}{\omega} = \frac{I_2^2 * r_2 * (1-s)/s}{\omega_1 * (1-s)} = \frac{I_2^2 * r_2 / s}{\omega_1} = \frac{P_{12}}{\omega_1}$$

$$\frac{P_{\text{э}2}}{P_{12}} = \frac{I_2^2 * r_2}{I_2^2 * r / s_2} = s$$

$$P_{12} - P_{\text{э}2} = P_{\check{2}}$$

$$\eta = P_2 / P_1$$

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 * \bar{Z}_1$$

$$\bar{E}_2 = \bar{I}_2 * (\bar{Z}_2 + r_{\text{мх}}) = \bar{I}_2 * \bar{Z}_{2s}$$

$$\bar{Z}_2 = r_2 + jx_2$$

$$\bar{Z}_{2s} = r_2 / s + jx_2 / s$$

$$F_1 = 0,45 * \frac{w * k_{w1} * I}{p}$$

$$0,45 * m_1 * \frac{w_1 * k_{w1} * \bar{I}_{12}}{p} = 0,45 * m_1 * \frac{w_1 * k_{w1} * \bar{I}_1}{p} + 0,45 * m_2 * \frac{w_2 * k_{w2} * \bar{I}_2}{p}$$

Максимум КПД можно найти из условия , откуда получаем, что кпд будет иметь максимальное значение при такой нагрузке, когда постоянные потери будут равны переменным.

$$P_0 = \beta^2 * P_k$$

$$\beta = \sqrt{\frac{P_o}{P_k}}$$

±

У современных силовых трансформаторов  $\beta_{\max}=0,4 - 0,5$ .

### ***3.13.Регулирование вторичного напряжения трансформатора.***

В процессе эксплуатации трансформаторов возникает необходимость в поддержании на определенном уровне вторичного напряжения при изменении его вследствие больших падений напряжения в питающей сети.

Соотношение между первичным и вторичным напряжениями зависит от коэффициента трансформации, т.е.

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2}$$

откуда следует, что для регулирования вторичного напряжения требуется изменить число обмоток у одной из обмоток.

Для этой цели обмотка выполняется с рядом ответвлений, а переключение обмоток производится специальным переключателем, встроенным в трансформатор. Существуют два вида переключения ответвлений обмоток трансформаторов:

- переключение ответвлений обмотки трансформатора без возбуждения (ПБВ), т.е. после отключения всех его обмоток от сети;
- переключение обмотки без перерыва нагрузки (РПН).

#### ***Трансформаторы с переключением ответвлений без возбуждения.***

В силовых трансформаторах с таким способом переключения ответвлений напряжение регулируется на ± 5% относительно номинального. В таких трансформаторах небольшой и средней мощности имеется пять ответвлений: +5; +2,5; 0; -2,5; -5 (%). Обычно ответвления выполняются у обмотки ВН, т.к. ток в ее цепи меньше и поэтому отводы и переключатель получается более компактными. Кроме того, число витков обмотки ВН больше и изменение числа витков на 2,5% можно выполнить более точно. Ответвления целесообразно выполнять в наружном слое обмотке симметрично относительно середины ее высоты для уменьшения неравномерности распределения магнитного поля рассеяния.

Изменение числа витков обмотки выполняется при помощи располагаемого внутри бака контактного переключателя, имеющего систему неподвижных и движущихся контактов. К неподвижным контактам подсоединяются ответвления от обмотки. Перевод переключателя из одного положения в другое осуществляется при помощи рукоятки, устанавливаемой на крышке или стенке бака трансформатора.

#### ***Трансформаторы с переключением ответвлений без перерыва нагрузки.***

Трансформаторы с РПН, выпускаемые отечественной промышленностью, позволяют регулировать напряжение на ± 9 - ± 16%.

Регулирование осуществляется в шесть- девять ступеней. При переходе с одной ступени на другую, для того, чтобы не было разрыва тока, контакты применяемого в этом случае переключающего устройства в промежуточном положении должны замыкать два соседних ответвления.(и часть обмотки, включенной между ними). Для ограничения тока короткого замыкания здесь применяются более сложные устройства, включающие резисторы или реакторы.

Работа переключателя автоматизирована. В настоящее время разрабатываются бесконтактные тиристорные схемы для регулирования напряжения трансформатора под нагрузкой.

### ***3.14. Параллельная работа трансформаторов.***

1. Неравенство коэффициентов трансформации ухудшает параллельную работу трансформаторов, вследствие чего согласно ГОСТ различие в коэффициентах трансформации допускается не более, чем на 0,5% их среднего значения.
2. Параллельная работа трансформаторов при неодинаковой группе соединения ввиду того, что вторичные ЭДС будут сдвинуты между собой по фазе, в трансформаторе будут возникать уравнивающие токи, превышающие номинальный ток, что недопустимо. Поэтому включение трансформаторов на параллельную работу при различных группах соединений обмоток не допускается. В случае, если у трансформатора, включаемого на параллельную работу, группа соединения отличается от группы уже работающих трансформаторов, в некоторых случаях путем перемаркировки его выводов удастся получить необходимую группу и произвести его параллельное включение.
3. параллельная работа трансформаторов с неодинаковыми напряжениями короткого замыкания установленная мощность не используется полностью, т.к. предельную нагрузку лимитирует трансформатор, имеющий меньшее значение напряжение короткого замыкания. При загрузке этого трансформатора номинальной мощностью остальные работают с недогрузкой. Согласно ГОСТ при включении трансформаторов на параллельную работу допускается различие в напряжениях короткого замыкания не более, чем на  $\pm 10\%$  среднего значения.

### ***3.15. Многообмоточные трансформаторы и автотрансформаторы.***

У многообмоточных трансформаторов на стержне размещается не две, а большее число обмоток с разным числом витков. Это позволяет от одного трансформатора получить несколько напряжений и, следовательно, уменьшить количество установленных трансформаторов.

Такие трансформаторы выпускаются как в однофазном, так и в трехфазном исполнении.

Автотрансформатором называется трансформатор, у которого имеется электрическая связь между обмотками.

## Тема 4.

### Асинхронные машины

#### **4.1. Назначение и области применения асинхронных машин.**

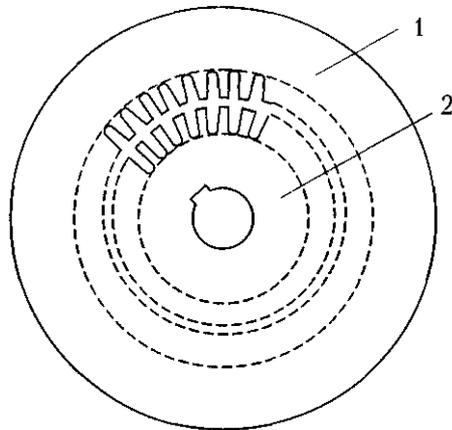
Асинхронные машины используются в основном как двигатели. В настоящее время асинхронные машины являются наиболее распространенными электрическими машинами. Такое широкое распространение асинхронные двигатели получили благодаря конструктивной простоте, низкой стоимости и высокой эксплуатационной надежности при минимальном обслуживании. Диапазон мощностей от долей ватта до десятков тысяч киловатт. КПД асинхронных машин составляет 0,7-0,95 и только в микродвигателях снижается до 0,2-0,65.

Наряду с большими достоинствами асинхронные двигатели имеют и некоторые недостатки, к числу которых следует отнести потребление из сети реактивного тока, необходимого для создания магнитного потока в результате чего асинхронные двигатели работают с  $\cos\varphi < 1$ . Кроме того, по возможности регулировать частоту вращения они уступают двигателям постоянного тока.

#### **4.2. Устройство и принцип действия АМ**

##### **4.2.1. Устройство А.М.**

Сердечники статора и ротора асинхронных машин (АМ) собираются из листов электрической стали (рис.4.1.), которые до сборки обычно покрываются с обеих сторон масляно-канифольным изоляционным лаком.



Сердечник статора закрепляется в корпусе, а сердечник ротора - на валу (машины малой и средней мощности) или на ободе с крестовиной и втулкой, надетой на вал (машины большой мощности).

Вал ротора вращается в подшипниках, которые помещаются в подшипниковых щитах, прикрепляемых к корпусу статора (машины малой и средней мощности), или на отдельно стоящих подшипниковых стояках.

На внутренней цилиндрической поверхности статора и на внешней цилиндрической же поверхности ротора имеются пазы, в которых размещаются

проводники обмоток статора и ротора. Обмотка статора выполняется обычно трехфазной, присоединяется к сети трехфазного тока и называется, поэтому также первичной обмоткой.

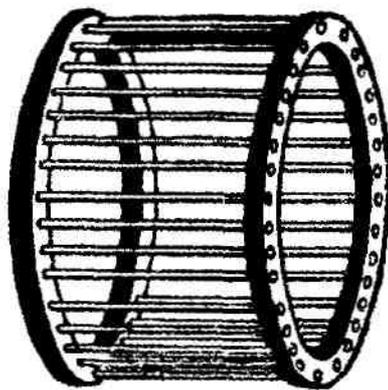
Обмотка ротора тоже может быть выполнена трехфазной аналогично обмотке статора. Концы фаз такой обмотки ротора соединяются обычно в «звезду», а начала с помощью колец и металлографитных щеток выводятся наружу

Такая асинхронная машина называется машиной с *фазным ротором*, машиной с контактными кольцами или *фазной асинхронной машиной*.

К контактными кольцам обычно присоединяется трехфазный пусковой или регулировочный реостат. Фазная обмотка ротора выполняется с тем же числом полюсов магнитного поля, что и статор.

Другой разновидностью обмотки ротора является обмотка в виде «беличьей клетки» (рис.4. 2). В каждом пазу такой обмотки находится медный или алюминиевый стержень, и концы всех стержней с обоих торцов ротора соединены с медными или алюминиевыми кольцами, которые замыкают стержни накоротко.

Стержни от сердечника обычно не изолируются. В машинах мощностью до 100 кВт стержни и кольца вместе с крыльшками для вентиляции обычно изготавливаются путем заливки ротора алюминием. Такая асинхронная машина называется машиной с *короткозамкнутым ротором*, или *короткозамкнутой*. Большинство асинхронных машин, в особенности машины малой и средней мощности, выпускаются с короткозамкнутым ротором.



*рисунок 4.2.*

Воздушный зазор между статором и ротором в асинхронных машинах выполняется минимально возможным по условиям производства и надежности работы, и тем больше, чем крупнее машины. В машинах мощностью несколько киловатт величина зазора составляет 0,4...0,5 мм, а в машинах большой мощности несколько миллиметров.

Асинхронные машины, как правило, охлаждаются воздухом.

#### 4.2.2. Принцип действия асинхронной машины.

Если симметричная трехфазная обмотка якоря подключена к симметричной системе трехфазного напряжения, то система фазных токов, также симметричная, возбудит в воздушном зазоре **вращающееся магнитное поле**. Пространственное распределение этого поля вдоль воздушного зазора современных машин переменного тока вследствие специально принимаемых мер в отношении обмотки якоря близко к **гармоническому**.

Таким образом, возбуждаемое токами статора магнитное поле в воздушном зазоре АМ можно представить в виде **симметричной системы вращающихся магнитных полюсов**, число которых равно  $2p$ , а частота вращения [об./с]

$$n_1 = f_1 / p \quad (4.1.)$$

Магнитный поток каждого такого полюса  $\Phi_1$  при вращении пересекает проводники обмотки ротора и тем самым индуцирует в них ЭДС  $e_2$

Если обмотка ротора замкнута, то в ней возникают токи  $i_2$  частота которых  $f_2$  при неподвижном роторе ( $n=0$ ) равна первичной частоте  $f_1$ .

Если обмотка ротора является **трехфазной**, то в ней индуцируется трехфазный ток. Этот ток создает вращающийся поток ротора  $\Phi_2$  (число полюсов  $2p$ ), направление и частота вращения которого при  $n = 0$  такие же, как и у потока статора. Поэтому потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  вращаются синхронно и образуют общий вращающийся поток двигателя  $\Phi_\delta$ .

При **короткозамкнутом роторе** в его стержнях индуцируется многофазная система токов  $i_2$  со сдвигом в соседних стержнях по фазе на угол

$$\gamma = 2 * \pi * n / Z_2 \quad (4.2.)$$

где  $Z_2$  — число стержней ротора. Эти токи также создают вращающийся поток  $\Phi_2$ , число полюсов, направление и скорость вращения которого являются такими же, как и у потока фазного ротора. Поэтому и в данном случае в двигателе образуется общий магнитный поток  $\Phi_\delta$ . Этот общий поток взаимноиндукции индуцирует ЭДС в обеих обмотках машины.

В результате взаимодействия токов ротора с потоком возникают действующие на проводники ротора электромагнитные силы  $F$  и вращающий электромагнитный момент  $M$ .

В верхней части **рис 4.3** показаны вращающаяся с частотой  $n_1$  синусоидальная волна общего магнитного поля машины и направления ЭДС  $e_2$ , индуцируемых этим полем в стержнях неподвижного короткозамкнутого ротора.

В нижней части **рис. 4.3.** показаны направления токов стержней  $i_2$  и действующих на них сил  $F$

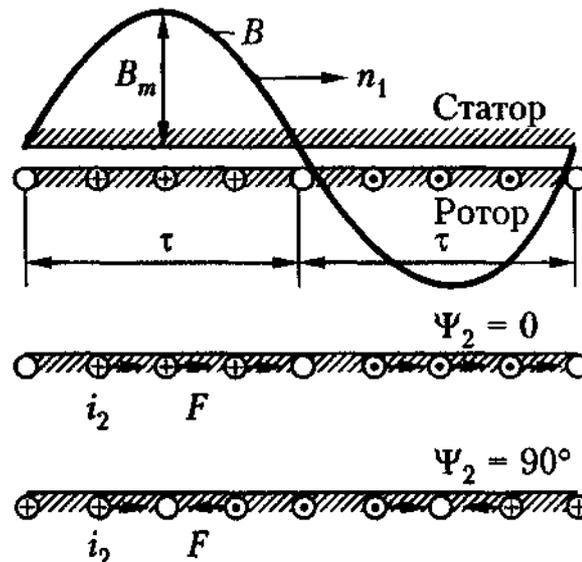


рисунок 4.3.

для двух случаев, когда угол сдвига фаз  $\psi_2$  между  $e_2$  и  $i_2$  равен нулю и  $\psi_2 = 90^\circ$ .

При  $\psi_2 = 0$  все силы действуют в сторону вращения поля. Поэтому вращающий электромагнитный момент

$$M = \Sigma F \cdot D / 2$$

отличен от нуля и действует в сторону вращения поля.

При  $\psi_2 = 90^\circ$  силы действуют в разные стороны и  $M = 0$ .

Отсюда следует, что вращающийся момент создается только активной составляющей тока ротора

$$I_{2a} = I_2 \cos. \psi_2$$

Этот вывод имеет общий характер и справедлив также для других видов машин переменного тока.

Цепь ротора асинхронного двигателя всегда обладает определенным активным сопротивлением, и поэтому при пуске двигателя ( $n = 0$ ) всегда

$$0 < \psi_2 < 90^\circ.$$

В результате  $M > 0$ , и если он больше статического тормозного момента на валу, то ротор двигателя начнет вращаться в направлении вращения поля с

некоторой частотой вращения  $n < n_1$ , то есть будет вращаться с некоторым отставанием, или *скольжением*, относительно поля статора. Относительная разность скоростей вращения поля и ротора

$$s = (n_1 - n) / n_1 \quad (4.3.a)$$

называется *скольжением*. Скольжение выражается также в процентах:

$$s\% = 100 * s = (n_1 - n) / n_1 * 100\% \quad (4.3.b)$$

Частота вращения ротора  $n$ , выраженная через скольжение  $s$ , согласно (4.3a), равна

$$n = (1 - s) / n_1 \quad (4.4.)$$

При пуске двигателя ( $n = 0$ ) имеем  $s = 1$ , а при вращении ротора синхронно с полем статора, или, как говорят, с синхронной частотой вращения

$$(n = n_1) \text{ то есть } s = 0$$

При  $n = n_1$  магнитное поле статора относительно ротора неподвижно и токи роторе индуцироваться не будут, поэтому  $M = 0$  и такой частоты вращения двигатель самостоятельно достичь не может. Вследствие этого в режиме двигателя всегда  $0 < n < n_1$  и  $1 > s > 0$ .

При вращении ротора в сторону поля частота пересечения полем проводников ротора пропорциональна разности  $n_1 - n$ , следовательно, частота тока в обмотке ротора

$$f_2 = p * (n_1 - n) \quad (4.5.)$$

Подставив сюда значение  $n$  из выражения (4.4), а затем значение  $n_1$  из (4.1) получим:

$$f_2 = s * p * n_1 = s * f_1 \quad (4.6.)$$

То есть вторичная частота пропорциональна скольжению.

При частоте тока  $f_2 < f_1$  частота вращения поля ротора относительно самого ротора относительно самого ротора  $n_{2p}$  также меньше  $n_1$ .

$$n_{2p} = f_2 / p = s * n_1 \quad (4.7.)$$

Частота вращения поля ротора относительно статора в соответствии с выражениями (4.4) и (4.7)

$$n_{2c} = n + n_{2p} = (1-s) * n_1 + s * n_1 = n_1 \quad (4.8.)$$

то есть частота вращения поля ротора относительно статора равна частоте вращения поля статора  $n_1$ . Поэтому поля статора и ротора при вращающемся роторе также вращаются всегда синхронно и образуют общее вращающееся поле. Отметим, что представленная на рис.3 картина направлений токов и механических сил действительна и при вращении ротора, когда  $0 < n < n_1$  (двигательный режим).

Если ротор асинхронной машины с помощью внешней силы (вращающегося момента) привести во вращение в направлении вращения поля статора с частотой вращения выше синхронной ( $n > n_1$ ), то ротор будет обгонять поле и направления токов в обмотке ротора изменятся на обратные.

При этом изменятся на обратные также направления электромагнитных сил  $F$  и электромагнитного момента  $M$ .

Момент  $M$  при этом будет тормозящим, а машина станет работать в *режиме генератора* и отдавать активную мощность в сеть. Согласно выражениям (4.3), в режиме генератора  $s < 0$ .

Если ротор вращать в направлении, обратном направлению вращения поля статора ( $n < 0$ ), то указанные на рис. 3 направления  $e_2$ ,  $i_2$  и  $F$  сохранятся. Электромагнитный момент  $M$  будет действовать в направлении вращения поля статора и тормозить вращение ротора. Этот режим работы асинхронной машины называется *режимом противовключения*, или *режимом электромагнитного тормоза*. В этом режиме в соответствии с выражением (1.4)  $s > 1$ .

Зависимость режима работы асинхронной машины от скольжения показана на рис.4.4.



рисунок 4.4.

### 4.3. Асинхронная машина при неподвижном роторе

Рассмотрим асинхронную машину, имеющую трехфазные обмотки на статоре и роторе. Ротор этой машины заторможен ( $s = 1$ ). Если обмотку

статора подключить к трехфазной системе напряжений, а к обмотке ротора подсоединить сопротивление нагрузки ( $Z_{нагр}$ ), то в этом случае асинхронная машина будет работать как трансформатор. (рис. 4.5.)

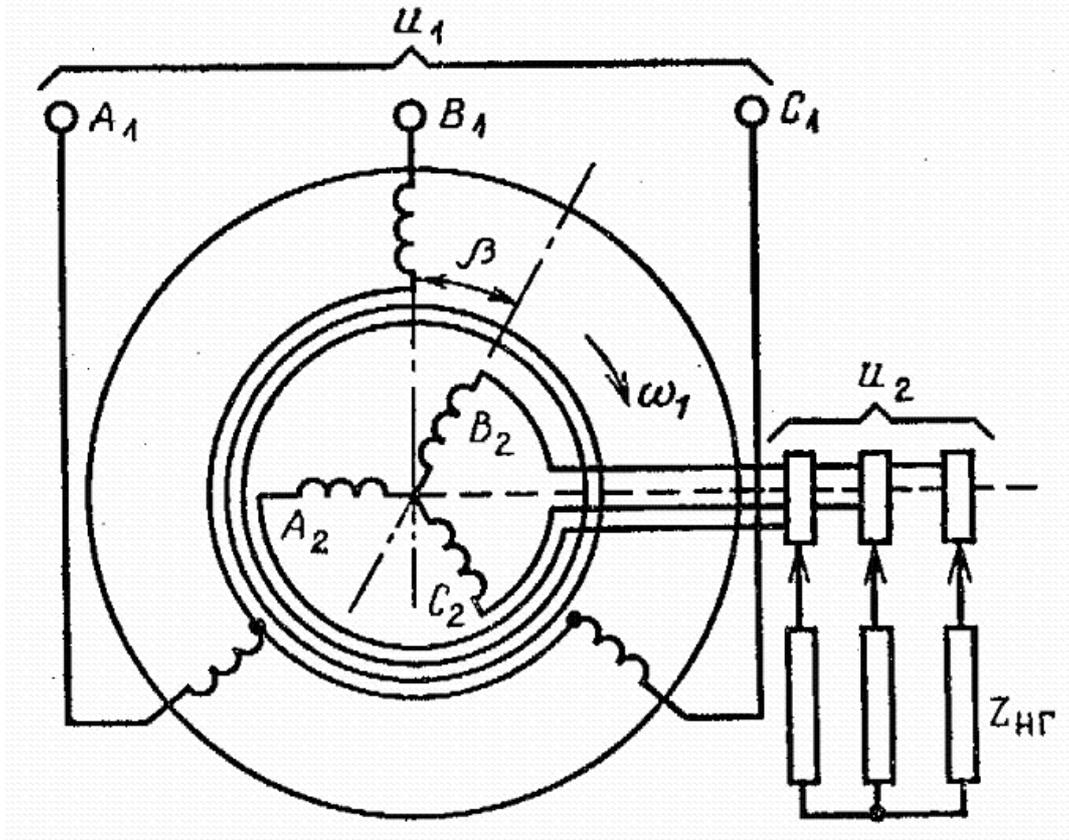


рис 4.5.

В ней, как и в трансформаторе, электрическая энергия, потребляемая обмоткой статора из сети ( $U_1$ ), передается электромагнитным путем во вторичную цепь при напряжении  $U_2$ . Частоты напряжений в первичной и вторичной цепях будут одинаковы.

От трансформатора асинхронная машина будет отличаться в конструктивном отношении (распределение обмотки, наличие зазора и т.д.), но что касается физических процессов, то они и в том и другом случае будут протекать одинаково. Поэтому для анализа работы асинхронной машины при неподвижном роторе могут быть использованы основные уравнения, векторная диаграмма и схема замещения, полученные для трансформатора. Электродвижущие силы, индуцируемые в обмотках статора и ротора вращающимся полем

$$E_1 = 4,44 * f_1 * w_1 * k_{w1} * \Phi$$

$$E_2 = 4,44 * f_1 * w_2 * k_{w2} * \Phi$$

Отношения этих ЭДС равно коэффициенту трансформации

$$E_1 / E_2 = w_1 * k_{w1} / w_2 * k_{w2} = n_{mp} \quad (4.9.)$$

$w_1$  и  $w_2$  – число витков фазы обмотки статора и ротора.

В отличие от коэффициента трансформации для обычного трансформатора в выражение 4.9. входит обмоточный коэффициент, который учитывает пространственное распределение обмоток. Поскольку ротор может быть

заторможен в любом положении, то оси обмоток статора и ротора будут занимать относительно друг друга различные положения. Это относительное смещение осей обмоток статора и ротора вызывает сдвиг по фазе ЭДС, индуцируемых в обмотках вращающимся электрическим полем. Если ротор повернуть так, что оси фаз статора и ротора будут пространственно сдвинуты на угол  $\beta$ , то магнитное поле при своем вращении будет набегать сначала на фазу  $B_1$  статора, а затем на фазу  $B_2$  ротора. Вследствие этого ЭДС фазы  $B_2$  будут отставать от ЭДС фазы  $B_1$  на электрический угол  $\beta_{эл} = \rho * \beta$ . Изменяя положение ротора относительно статора можно изменять угол  $\beta_{эл}$  и следовательно, группу соединения такого трансформатора.

Асинхронную машину при неподвижном роторе можно включить по схеме автотрансформатора и при  $U_1 = \text{const}$  получить плавное регулирование вторичного напряжения - индукционный регулятор. Если обмотки ротора и статора имеют одинаковое число витков, то постепенно поворачивая ротор, можно изменять  $U_2$  в пределах от 0 до  $2 * U_1$ .

Включая обе обмотки последовательно или параллельно, асинхронную машину можно использовать как регулируемое индуктивное сопротивление.

#### **4.4. Приведение рабочего процесса асинхронной машины при вращающемся роторе к рабочему процессу трансформатора**

##### **4.1.1. Замещение вращающегося ротора эквивалентным неподвижным**

В асинхронной машине при вращающемся роторе происходит преобразование электрической энергии в механическую, если она работает двигателем, и обратное преобразование, если она работает генератором. Кроме того, при вращающемся роторе частота тока в его обмотке отличается от частоты тока в обмотке статора. Этими особенностями асинхронная машина при вращающемся роторе отличается от трансформатора, в котором происходит преобразование электрической энергии в электрическую. В то же время асинхронная машина при неподвижном роторе с точки зрения преобразования энергии полностью соответствует трансформатору. Поэтому вполне реально заменить асинхронную машину при вращающемся роторе эквивалентной ей по энергетическим и электромагнитным процессам машиной при неподвижном роторе. Добиться этого можно, если при такой замене ток и его фаза в роторе и МДС ротора  $F$  останутся неизменными.

Ток во вращающемся роторе при скольжении  $s$

$$I = E_{2s} / \sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2} \quad (4.10.)$$

где

$r_2$ - активное сопротивление фазы обмотки ротора

Электродвижущая  $E_{2s}$  сила представляет собой ЭДС, наводимую в фазе ротора при скольжении  $s$ .

$$E_{2s} = 4,44 * f_2 * w_2 * k_{w2} * \Phi$$

Учитывая, что  $f_2 = f_1 * s$ , получаем

$$E_{2s} = 4,44 * f_1 * w_2 * k_{w2} * \Phi * s \quad (4.11.)$$

Электродвижущая сила  $E_2$  представляет собой ЭДС, наводимую в фазе неподвижного ротора ( $s=1$ ), когда  $f_2 = f_1$ .

Следовательно, при заданном потоке ЭДС, индуцируемая в роторе при его вращении, равна ЭДС при неподвижном роторе, умноженной на скольжение.

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора при скольжении

$$x_{2s} = 2 * \pi * f_2 * L_2 = 2 * \pi * f_1 * L_2 * s \quad (4.12.)$$

где  $x_2 = 2 * \pi * f_1 * L_2$  – индуктивное сопротивление рассеяния при неподвижном роторе.

Откуда следует, что индуктивное сопротивление фазы ротора при его вращении равно индуктивному сопротивлению при неподвижном роторе, умноженному на скольжение.

С учетом (4.11.) и (4.12.) запишем

$$I_{2s} = E_2 * s / \sqrt{r_2^2 + (x_2 * s)^2} \quad (4.13)$$

Поделив числитель и знаменатель (4.9) на скольжение, получим

$$I_2 = E_2 / \sqrt{(r_2 / s)^2 + x_2^2} \quad (4.14)$$

Токи, полученные по (4.13) и (4.14), имеют одинаковое значение. Одинаковыми будут углы их сдвига от ЭДС

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{x_2}{r_2 / s} = \frac{x_2 * s}{r_2} = \operatorname{tg} \varphi_{2s}$$

Однако между этими токами имеется принципиальное различие. Если ток  $I_{2s}$  обусловлен ЭДС  $E_{2s}$  и имеет частоту  $f_2 = f_1 * s$ , то ток  $I_2$  обусловлен ЭДС  $E_2$  и его частота равна  $f_1$ . Следовательно, ток  $I_{2s}$  является током во вращающемся роторе, а ток  $I_2$  – в эквивалентном неподвижном.

Векторные диаграммы вторичной цепи асинхронного двигателя при вращающемся роторе и эквивалентном неподвижном представлены на **рис.4.6.**

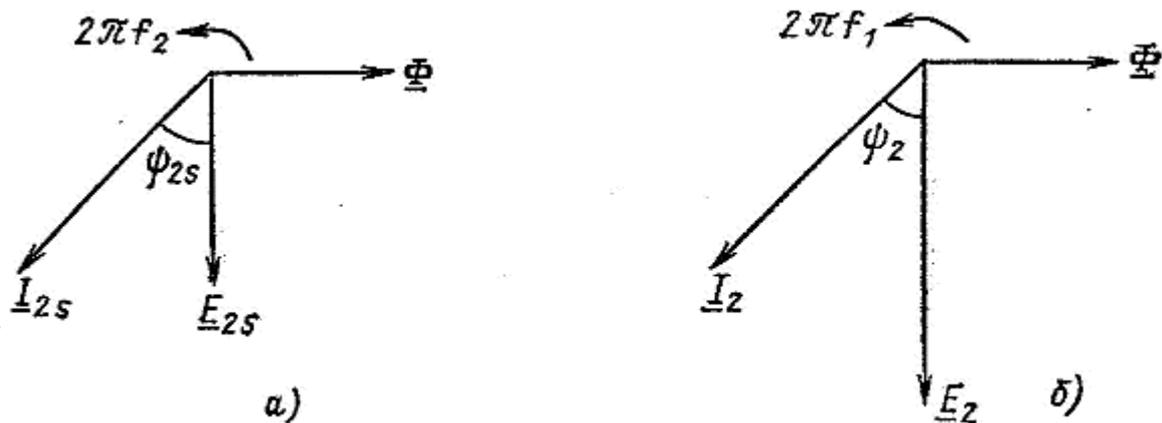


рис. 4.6.

В первом случае все векторы вращаются с угловой частотой  $2 * \pi * f_2 = 2 * \pi * f_1 * s$ , а во втором – с угловой частотой  $2 * \pi * f_1$ , равной угловой частоте вращения вектора для цепи статора.

Так как токи  $I_{2s}$  и  $I_2$  равны по значению и по фазе, то МДС, созданные ими, тоже будут равны и одинаково ориентированы в пространстве, т.е.

$$\vec{F}_{2s} = \vec{F}_2$$

Магнитодвижущая сила  $\bar{F}_{2s}$  перемещается относительно ротора в направлении его движения с угловой скоростью  $2 \cdot \pi \cdot f_2 / p = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s / p = \omega_1 \cdot s$ .

Так как скорость ротора  $\omega = \omega_1 \cdot (1 - s)$ , то МДС  $\bar{F}_{2s}$  при любых значениях скольжения будет перемещаться в пространстве (относительно неподвижного статора) с угловой скоростью

$$\omega_1 \cdot s + \omega_1 \cdot (1 - s) = \omega_1.$$

С такой же скоростью перемещается в пространстве МДС  $\bar{F}_1$ , созданная обмоткой статора при протекании в ней тока  $\bar{I}_1$  с частотой  $f_1$ .

Следовательно при любом скольжении МДС  $\bar{F}_1$  и  $\bar{F}_2 = \bar{F}_{2s}$  неподвижны относительно друг друга и будут создавать результирующую МДС  $\bar{F}_{12}$

$$\bar{F}_{12} = \bar{F}_1 + \bar{F}_2,$$

откуда следует, что замена вращающегося ротора неподвижным эквивалентным не нарушает магнитное состояние машины.

Таким образом согласно (4.14) для перехода к эквивалентному неподвижному ротору следует у заторможенного ротора активное сопротивление заменить на активное сопротивление, поделенное на скольжение, для чего в его цепь вводим добавочное сопротивление

$$r_{\text{мх}} = r_2 / s - r_2 = r_2 \cdot ((1 - s) / s) \quad (4.15)$$

Асинхронная машина с неподвижным эквивалентным ротором в электрическом отношении будет подобна трансформатору, работающему на чисто активную нагрузку.

Полная мощность, поглощаемая в неподвижном эквивалентном роторе,

$$P_{12} = I_2^2 \cdot r_2 / s \quad (4.16)$$

Эта мощность передается из статора в ротор электромагнитным путем и носит название электромагнитной мощности.

Часть этой мощности затрачивается на покрытие электрических потерь в обмотках ротора

$$P_{\text{с2}} = I_2^2 \cdot r_2 \quad (4.17)$$

Остальная ее часть будет поглощаться в сопротивлении  $r_{\text{мх}}$

$$P_2^* = P_{12} - P_{\text{с2}} = I_2^2 \cdot r_2 \cdot ((1 - s) / s) \quad (4.18)$$

В реальном вращающемся двигателе этой мощности будет соответствовать полная механическая мощность, которая получается в результате преобразования электрической энергии в механическую. В дальнейшем полная механическая мощность асинхронной машины будет определяться численно равным ей электрическим потерям в добавочном сопротивлении эквивалентного неподвижного ротора.

Электромагнитный момент, развиваемый машиной,

$$M = \frac{P_2^*}{\omega} = \frac{I_2^2 \cdot r_2 \cdot (1 - s) / s}{\omega_1 \cdot (1 - s)} = \frac{I_2^2 \cdot r_2 / s}{\omega_1} = \frac{P_{12}}{\omega_1} \quad (4.19)$$

Это равенство показывает, что электромагнитный момент может быть найден делением полной механической мощности на угловую скорость магнитного поля. Поделив (4.17) на (4.16), получим

$$\frac{P_{\dot{\omega}_2}}{P_{12}} = \frac{I_2^2 * r_2}{I_2^2 * r / s_2} = s$$

откуда следует, что при  $P_{12} = \text{const}$  электрические потери в роторе будут пропорциональны скольжению. С увеличением скольжения потери  $P_{\dot{\omega}_2}$  возрастают.

#### 4.4.2. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Преобразование активной мощности в асинхронном двигателе можно проиллюстрировать энергетической диаграммой (рис.4.7.)

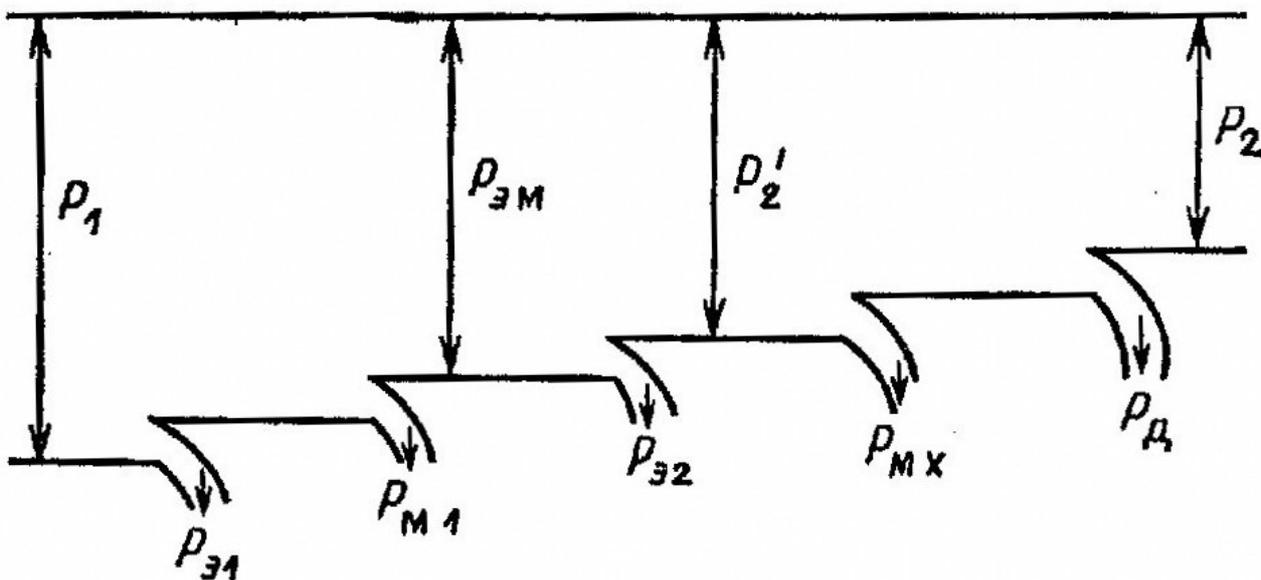


рис.4.7.

Обмотка статора, включенная в сеть, потребляет из нее активную мощность  $P_1$ . Часть этой мощности теряется в виде электрических потерь  $P_{31}$  в активном сопротивлении  $r_1$  обмотки при протекании по ней тока  $I_1$   
 $P_{31} = I_1^2 * r_1$

Другая часть мощности расходуется на магнитные потери в зубцах и ярме стали статора  $P_{m1}$ .

Оставшаяся мощность посредством магнитного поля передается со статора в ротор. Эта мощность представляет собой электромагнитную мощность  $P_{12} = P_1 - P_{31} - P_{m1} = I_2^2 * r_2 / s$

Электромагнитная мощность частично расходуется на потери в роторе.

Потери главным образом состоят из электрических потерь в обмотке ротора  $P_{32}$ . Магнитные потери в роторе малы из-за небольшой частоты перемагничивания стали ( $f_2 = f_1 * s = 0,5 - 2$  Гц) и поэтому их не учитывают.

Мощность  $P_{12} - P_{32} = P_{\dot{\omega}_2}$  превращается в полную механическую мощность.

Полезная механическая мощность, снимаемая с вала двигателя, будет меньше полной механической мощности на величину механических потерь  $P_{мх}$  (трение, вентиляция) и добавочных потерь  $P_d$ , возникающих при нагрузке.

$$P_2 = P_{\check{y}} - P_{mx} - P_0$$

Добавочные потери вызваны высшими гармониками магнитного поля вследствие зубчатого строения статора и ротора.

Коэффициент полезного действия

$$\eta = P_2 / P_1$$

Как уже отмечалось, КПД асинхронного двигателя достигает 0,7-0,95. С повышением мощности и частоты вращения КПД повышается.

#### 4.4.3. Уравнения, описывающие рабочий процесс в асинхронной машине.

4.4.4. Процессы, протекающие в асинхронной машине с эквивалентным неподвижным ротором, описываются системой уравнений, подобной системе уравнений для трансформатора.

В асинхронной машине первичной обмоткой является обмотка статора, а вторичной – обмотка ротора.

Уравнение напряжения обмотки статора

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 * \bar{Z}_1 \quad (4.20)$$

$U_1$  – напряжение, подводимое к обмотке статора

$E_1$  – ЭДС, наводимая в обмотке статора

$Z_1 = R_1 + jX_1$  – комплексное сопротивление обмотки статора, состоящее из активного сопротивления обмотки статора и ее индуктивного сопротивления рассеяния

$I_1$  – ток в обмотке статора

Уравнения напряжения эквивалентного неподвижного ротора

$$\bar{E}_2 = \bar{I}_2 * (\bar{Z}_2 + r_{mx}) = \bar{I}_2 * \bar{Z}_{2s} \quad (4.21)$$

где

$$\bar{Z}_2 = r_2 + jx_2$$

$$\bar{Z}_{2s} = r_2 / s + jx_2 / s$$

Уравнения МДС

$$\bar{F}_{12} = \bar{F}_1 + \bar{F}_2 \quad (4.22)$$

С учетом того, что

$$F_1 = 0,45 * \frac{w * k_{w1}}{p} * I$$

уравнение (4.18) запишется в виде

$$0,45 * m_1 * \frac{w_1 * k_{w1}}{p} * \bar{I}_{12} = 0,45 * m_1 * \frac{w_1 * k_{w1}}{p} * \bar{I}_1 + 0,45 * m_2 * \frac{w_2 * k_{w2}}{p} * \bar{I}_2 \quad (4.23)$$

Поделив обе части на  $0,45 * m_1 * w_1 * k_{w1}$ , получим

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_1 + \bar{I}_{\check{y}}$$

где

$$\bar{I}_2 = I_2 * \frac{m_2 * w_2 * k_{w2}}{m_1 * w_1 * k_{w1}} \quad (4.24)$$

Электродвижущие силы  $\bar{E}_1$  и индуцируются в обмотках асинхронной машины основным потоком  $\Phi$ , являющимся потоком взаимной индукции. Этот поток создается результирующей МДС  $F_{12}$ .

Результирующей МДС  $\bar{F}_{12}$  пропорционален ток  $\bar{I}_{12}$ , который согласно (4.23) можно считать составляющей тока статора  $\bar{I}_1$ .

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{12} + (-\bar{I}_2)$$

Ток  $\bar{I}_{12}$  по своей сути является током возбуждения и носит название намагничивающего тока.

Согласно (4.20) индуцируемая в обмотке статора ЭДС  $\bar{E}_1$  совместно с падением напряжения в цепи этой обмотки уравнивает приложенное напряжение  $\bar{U}_1$ .

При изменении нагрузки от холостого хода до номинальной падение напряжения относительно мало и его можно принять равным

$$U_1 = E_1 = 4,44 * f_1 * k_{w1} * \Phi,$$

откуда следует, что если  $U = \text{const}$ , то поток  $\Phi$  и создающий его ток  $I_{12}$  практически также должны оставаться постоянными.

При идеальном холостом ходе ( $s=0$ )  $I_1 = I_{12}$

При  $s \neq 0$  в обмотке ротора появляется ток  $I_2$ , который будет стремиться изменить магнитный поток. Для сохранения магнитного потока неизменным первичная обмотка будет потреблять из сети кроме тока  $I_{12}$  также дополнительный ток  $-I_2$ , уравнивающий в магнитном отношении ток  $I_2$ . Поэтому в асинхронной машине с увеличением скольжения с ростом тока  $I_2$  будет расти ток  $I_1$ .

Для практических расчетов принимают, что ток  $I_{12}$  равен току при реальном холостом ходе машины, когда отсутствует тормозной момент на валу.

Намагничивающий ток в асинхронной машине относительно большой и составляет 20 – 50% от номинального тока.

При больших скольжениях, когда токи будут значительно превышать свои номинальные значения, падением напряжения пренебрегать нельзя.

Поток рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  сцеплен с обмоткой статора и индуцирует в ней ЭДС

$$\bar{E}_{\sigma 1} = -j\bar{I}_1 * x_1$$

В обмотке ротора индуцируется ЭДС от сцепленного с ней потока рассеяния

$$\bar{E}_{\sigma 2} = -j\bar{I}_2 * x_2$$

Поскольку потоки рассеяния замыкаются через относительно большие воздушные промежутки и насыщение магнитной цепи в них сказывается мало, то они и индуцируемые ими ЭДС будут пропорциональны соответствующим токам.

#### 4.4.5. Приведение величин цепи ротора к цепи статора.

Приведение величин, как и в трансформаторах, осуществляется для удобства сопоставления величин первичной и вторичной обмоток и получения схемы замещения для расчета характеристик.

Реальный ротор с числом фаз  $m_2$  и числом витков в обмотке  $w_2$  заменяется ротором, у которого число фаз, число витков в обмотке и обмоточный коэффициент приняты такими же, как у статора. при этом мощность, потери и МДС в приведенном роторе должны сохранять те же значения, что и в реальном роторе.

Так как число витков обмотки приведенного ротора равно числу витков обмотки статора  $w_2 = w_1$ , то ЭДС  $E_{\check{2}}$  изменится пропорционально отношению  $w_1 * k_{w1} / w_2 * k_{w2}$  и будет равна ЭДС статора.

$$E_{\check{2}} = E_1 = E_2 * \left( \frac{w_1 * k_{w1}}{w_2 * k_{w2}} \right) = E_2 * k_m$$

$$0,45 * \frac{w_1 * k_{w1}}{p} * I_{\check{2}} = 0,45 * \frac{w_2 * k_{w2}}{p} * I_2$$

$$I_{\check{2}} = I_2 * \frac{w_2 * k_{w2}}{w_1 * k_{w1}} = I_2 * k_m$$

$$E_{\check{2}} * I_{\check{2}} = E_2 * K_m * I_2 * \frac{1}{K_m} \quad (4.25)$$

$$r_{\check{2}} = r_2 * K_m^2$$

$$I_{\check{2}}^2 * r_2 = I_2^2 * r_2 * K_m^2$$

$$x_2 = x_2 * K_m^2$$

$$\bar{z}_2 = r_{\check{2}} + jx_{\check{2}}$$

$$\bar{E}_{\check{2}} = I_{\check{2}} * (\bar{Z}_{\check{2}} + r_{\check{2}}) = I_{\check{2}} * (r_{\check{2}}/s + jx_{\check{2}})$$

Присутствующие в коэффициенте трансформации обмоточные коэффициенты учитывают пространственное распределение обмоток.

Соотношения между токами находим исходя из равенства МДС.

$$0,45 * \frac{w_1 * k_{w1}}{p} * I_{\check{2}} = 0,45 * \frac{w_2 * k_{w2}}{p} * I_2$$

Откуда

$$I_{\check{2}} = I_2 * \frac{w_2 * k_{w2}}{w_1 * k_{w1}} = I_2 * k_m \quad (4.26.)$$

Умножая (4.25) на (4.26), получим

$$E_{\check{2}} * I_{\check{2}} = E_2 * K_m * I_2 * \frac{1}{K_m}$$

т.е. полные мощности роторов будут одинаковыми.

Активное сопротивление  $r_{\check{2}}$  найдем, приравняв электрические потери в обмотках роторов

$$I_{\check{2}}^2 * r_2 = I_2^2 * r_2$$

Подставляя значение тока  $I_{\check{2}}$ , получим

$$r_2^{\check{y}} = r_2 * K_m^2$$

Аналогично получим

$$r_{mx}^{\check{y}} = r_{mx} * K_m^2$$

Для сохранения неизменным угла сдвига между ЭДС и током ротора необходимо, чтобы выполнялось равенство

$$x_2 = x_2 * K_m^2$$

Комплексное сопротивление приведенного статора

$$\bar{z}_2 = r_2^{\check{y}} + jx_2^{\check{y}}$$

После приведения величин вторичной обмотки к первичной следует иметь в виду, что для двигателей с фазным ротором число фаз ротора равно числу фаз статора, а для двигателя с короткозамкнутым ротором число фаз ротора равно числу его стержней.

Перепишем уравнения для асинхронной машины с приведенным эквивалентным неподвижным ротором

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 * \bar{Z}_1 \quad (4.27.)$$

$$\bar{E}_2^{\check{y}} = I_2^{\check{y}} * (\bar{Z}_2^{\check{y}} + r_{mx}^{\check{y}}) = I_2^{\check{y}} * (r_2^{\check{y}}/s + jx_2^{\check{y}}) \quad (4.28.)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{12} + (-\bar{I}_2^{\check{y}}) \quad (4.29)$$

#### 4.5. Схема замещения асинхронной машины.

В схеме замещения реальная асинхронная машина с электромагнитными связями между обмотками заменяется простой электрической цепью, что позволяет упростить расчет ее характеристик.

Запишем уравнение асинхронной машины в следующем виде (уравнения 4.30, 4.31., 4.32.,)

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{I}_2 * \bar{Z}_2 + \bar{I}_1 * \bar{Z}_1 \\ 0 &= \bar{I}_2 * \bar{Z}_1 + I_2^{\check{y}} * (\bar{Z}_2^{\check{y}} + r_{mex}) \\ \bar{I}_1 &= \bar{I}_2 * \bar{Z}_2^{\check{y}} \end{aligned}$$

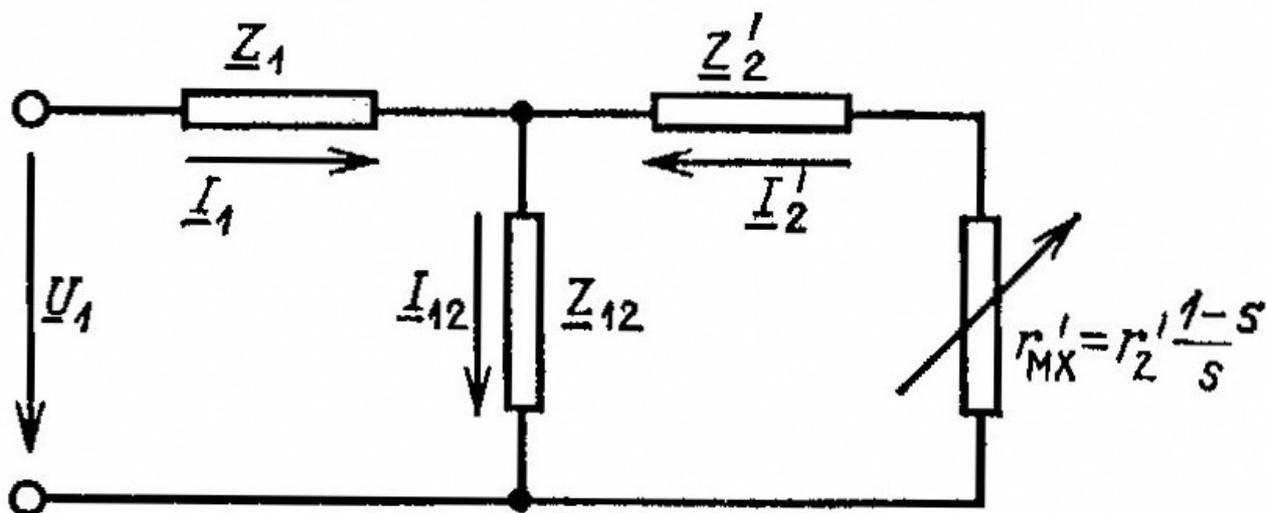
Здесь по аналогии с трансформатором принято

$$-\bar{E}_1 = -\bar{E}_2^{\check{y}} - \bar{I}_2 * \bar{Z}_2^{\check{y}} \quad (4.33)$$

Решая эту систему относительно тока  $\bar{I}$ , получим

$$\bar{U}_1 = \bar{I}_1 * \frac{\check{y}}{K} Z_1^{\check{y}} + \frac{\bar{Z}_{12} * (\bar{Z}_2^{\check{y}} + r_{mx}^{\check{y}})}{\bar{Z}_{12} + (\bar{Z}_2^{\check{y}} + r_{mx}^{\check{y}})} \frac{\check{y}}{b} - \bar{I}_1 * \bar{Z}_{э\check{y}} \quad (4.34)$$

Выражению в квадратных скобках соответствует электрическая схема (**рис.4.8**)



Т-образная схема замещения асинхронной машины полностью отображает физические процессы АМ.

Сопротивление

$$\bar{Z}_{12} = r_{12} + jx_{12}$$

представляет собой сопротивление намагничивающей ветви схемы замещения. Индуктивная составляющая этого сопротивления обусловлена главным магнитным потоком и является индуктивным сопротивлением взаимной индукции.

Посредством активного сопротивления учитываются магнитные потери в сердечнике статора ( $r_{12} = P_{m1} / I_{12}^2$ ).

Как и в трансформаторе, сопротивление  $\bar{Z}_{12} = r_{12} + jx_{12}$  зависит от подведенного напряжения. С увеличением напряжения сопротивление падает. Уравнение 4.30. для цепи статора соответствует левой части схемы замещения, а уравнение 4.31. для цепи ротора – правой части этой схемы. Для узловых точек справедливо выражение 4.32.

Большое практическое значение имеет схема замещения, в которой намагничивающая ветвь подключена непосредственно на напряжение  $U_1$ .

Такая схема называется Г-образной схемой замещения асинхронной машины.

Из Т-образной схемы замещения следует

$$\bar{I}_{12} = \frac{\bar{U}_1 - \bar{I}_1 * \bar{Z}_1}{\bar{Z}_{12}} = \frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}_{12}} - \bar{I}_1 * \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_{12}} \quad (4.35.)$$

Подставив 4.35. в уравнение токов, получим

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}_{12}} - \bar{I}_1 * \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_{12}} - \bar{I}_2' \quad (4.36.)$$

Или

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_1}{\bar{c}_1 * \bar{Z}_{12}} - \frac{\bar{I}_2}{\bar{c}_1} = \bar{I}_{s0} - \frac{\bar{I}_2}{\bar{c}_1} \quad (4.37.)$$

где

$$\bar{c}_1 = (1 + \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_{12}}) = c_1 * e^{i\gamma} - \text{комплексный коэффициент}$$

$\bar{I}_{s0} = \frac{\bar{U}_1}{\bar{c}_1 * \bar{Z}_{12}} = \frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_{12}}$  - ток синхронизма, потребляемый машиной при синхронной скорости вращения ротора ( $s=0$ ).

Выразим ток  $-\bar{I}_2$  через параметры схемы замещения

$$-\bar{I}_2 = \bar{I}_1 * \frac{\bar{Z}_{12}}{\bar{Z}_{12} + (\bar{Z}_2 + r_{mx})} \quad (4.38.)$$

Определив из схемы замещения ток  $\bar{I}_1$  и подставив его в последнее выражение, получим

$$-\bar{I}_2 = \frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}_1 + \bar{c}_1 * (\bar{Z}_2 + r_{mx})} \quad (4.39.)$$

Учитывая последнее выражение, перепишем ток  $\bar{I}_1$  в виде

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{s0} - \frac{1}{\bar{c}_1} * \bar{I}_2 = \frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} + \frac{\bar{U}_1}{\bar{c}_1^2 * (\bar{Z}_{kx} + r_{\check{y}})} \quad (4.40.)$$

где  $\bar{Z}_k = \frac{\bar{Z}_1}{\bar{c}_1} + \bar{Z}_2$

Уравнению 4.40. соответствует схема замещения **(рис.4.9.)**. При такой схеме замещения  $\bar{I}_{s0}$  и  $\bar{I}_2$  определяются независимо друг от друга делением напряжения на сопротивление соответствующей ветви.

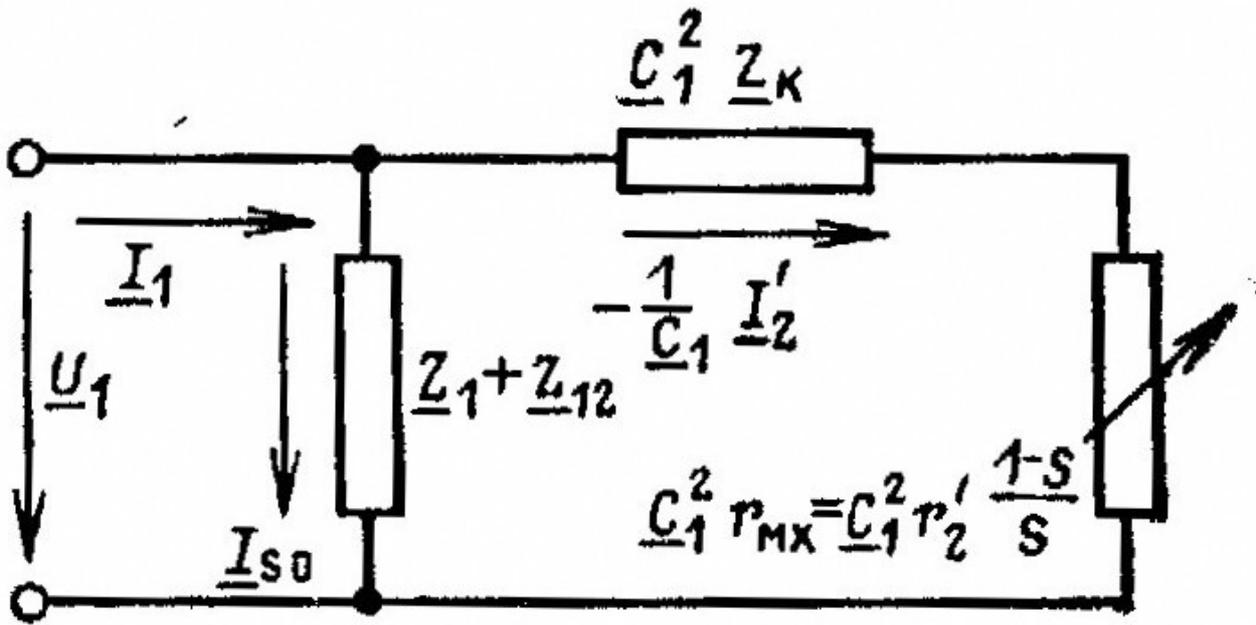


рис.4.9.

При  $U = \text{const}$   $\bar{I}_{s0}$  является постоянной величиной и не зависит от скольжения.

Комплексный коэффициент  $\bar{c}_1 = (1 + \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_{12}}) = \frac{(\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_1)}{\bar{Z}_{12}}$  имеет определенный физический смысл. Умножив числитель и знаменатель на ток синхронизма, получим

$$\bar{c}_1 = \frac{(\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_1)}{\bar{Z}_{12}} = \frac{(\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_1) * \bar{I}_{s0}}{\bar{Z}_{12} * \bar{I}_{s0}} = \frac{U_1}{-E_{s0}} \quad (4.41.)$$

Т.о. комплексный коэффициент – отношение напряжения к обратной эдс, индуцируемой в обмотке статора при  $s=0$ .

Для практических расчетов для машин средней и большой мощности можно принять  $s=1$ , а схема замещения будет иметь вид (рис.4.10.)

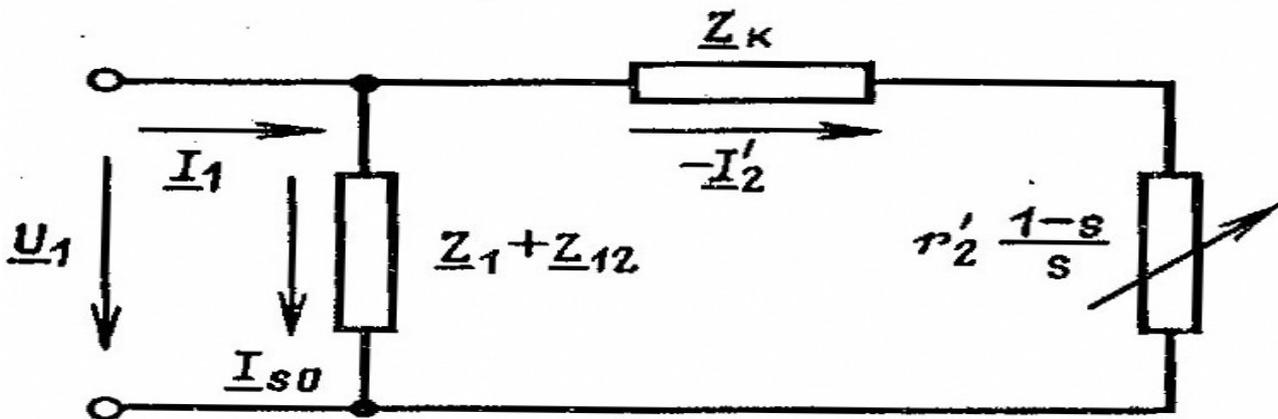


рис.4.10.

#### 4.6. Электромагнитный момент

Электромагнитный момент в асинхронной машине создается в результате взаимодействия тока, протекающего по проводникам обмотки ротора, с вращающимся магнитным полем. На **рис (4.11.а.)** изображен развернутый в плоскость ротор с распределенной обмоткой в виде беличьей клетки, содержащий  $N$  проводников.

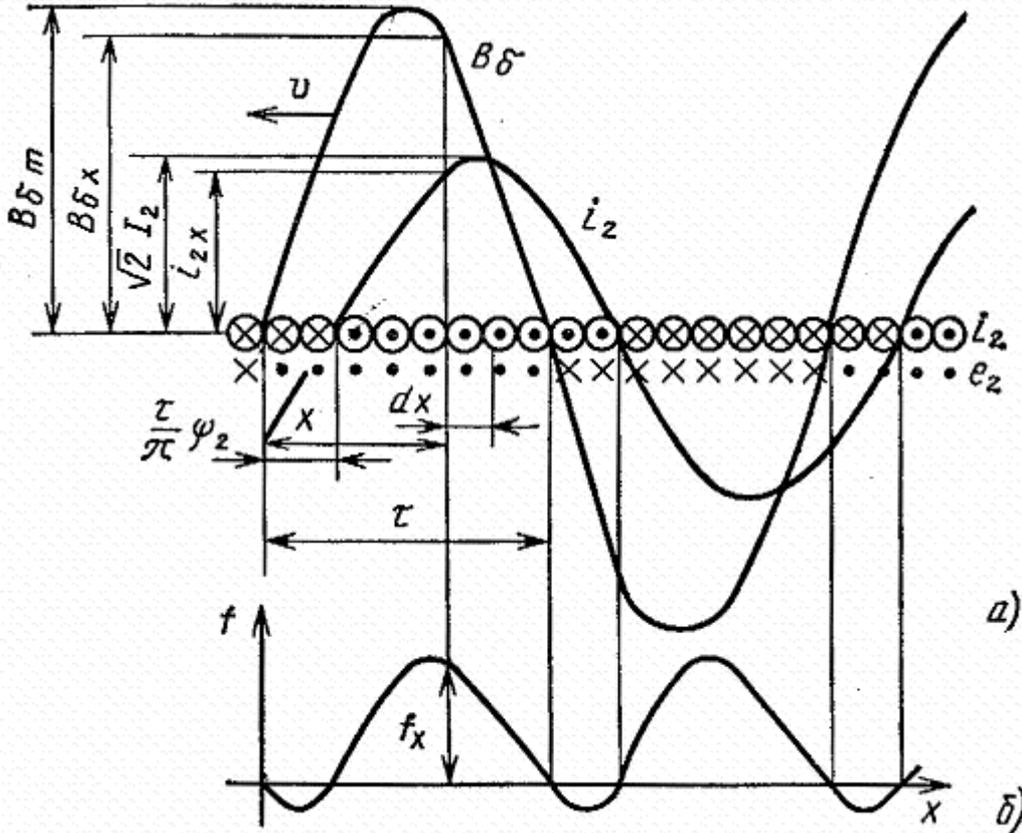


рис.4.11.

Предположим, что в воздушном зазоре вдоль полюсного деления кривая распределения индукции магнитного поля  $B_\delta$  и перемещается вдоль ротора справа налево.

В результате этого в проводниках обмотки ротора индуцируется ЭДС  $e_2$ , мгновенные значения которой будут пропорциональны магнитной индукции в точке расположения проводника. Поэтому кривая ЭДС в проводниках вдоль полюсного деления также будет синусоидальной и в другом масштабе повторяет кривую индукции. Направление индуцированных ЭДС показано крестиками и точками.

Так как ток в роторе отстает от ЭДС на угол  $\varphi_2$  ( $\text{tg } \varphi_2 = x_2 * s / r_2$ ), которому на рисунке соответствует пространственная координата  $\varphi_2 * \tau / \pi$ , то кривая распределения тока по проводникам обмотки будет смещена относительно ЭДС и индукции. Направление тока в проводниках показано внутри проводников.

Электромагнитная сила, действующая на проводник, находящийся в данный момент на расстоянии  $X$  от начала отсчета, будет равна

$$f_x = B_{\delta x} * i_{2x} * l = B_{\delta \max} * \left( \sin \frac{\pi}{\tau} * x \right) * \sqrt{2} * I_2 * \sin \left( \frac{\pi}{\tau} * x - \varphi_2 \right) * l \quad (4.42.)$$

где  $l$  – длина проводника в осевом направлении ротора  $i_2$   $I_2$  – мгновенное и действующее значение токов в проводниках ротора.

Распределение электромагнитных сил вдоль полюсных делений показано на рисунке (4.11.6).

На длине  $dx$  окружности ротора располагается  $(N_2/\pi * D) * dx$  число проводников, а действующая на них сила  $df = f * x * (N_2/\pi * D) * dx$

Сила  $df$  создает электромагнитный момент  $(D/2) * df$ , где  $D$  – диаметр ротора.

Электромагнитный момент, создаваемый всеми проводниками

$$M = \int \frac{D}{2} df = 2 * p * B_\delta * 8\sqrt{2} * I_2 * l * \frac{D}{2} * \int \sin \frac{x\pi}{\tau} * \sin(\frac{x\pi}{\tau} - \varphi_2) dx =$$

$$\frac{N_2 * p}{2 * \sqrt{2}} * \Phi_1 * I_2 * \cos \varphi_2 \quad (4.43.)$$

$$\text{где } \Phi_1 = \frac{2}{\pi} * B_\delta * \tau * l$$

При наличии на роторе фазной обмотки в числитель вводится обмоточный коэффициент.

#### 4.7. Определение электромагнитного момента через электромагнитную мощность.

Выражение для электромагнитного момента может быть получено через электромагнитную мощность.

$$P_{12} = m_1 * I_2^{\check{y}} * \frac{r_2^{\check{y}}}{s} \quad (4.44.)$$

Из схемы замещения найдем ток ротора

$$I_2^{\check{y}} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + c_1 * \frac{r_2^{\check{y}}}{s})^2 + (x_1 + c_1 * x_2^{\check{y}})^2}}$$

Поделив 4.44. на угловую скорость поля  $\omega_1$  ( $\omega_1 = 2 * \pi * n$ ) и заменив ток на его значение 4.45., получим

$$M = \frac{m * U_1^2 * \frac{r_2^{\check{y}}}{s}}{\omega * \frac{1}{k} (r_1 + c_1 * \frac{r_2^{\check{y}}}{s})^2 + (x_1 + c_1 * x_2^{\check{y}})^2 \frac{\psi}{B_1}} \quad (4.46.)$$

Если принять, что параметры машины являются постоянными, то момент при  $U_1 = \text{const}$  является функцией только скольжения. При малых скольжениях в квадратных скобках можно пренебречь всеми слагаемыми, кроме  $(c_1 * \frac{r_2^{\check{y}}}{s})^2$ .

Тогда получим

$$M = \frac{m * U_1^2}{\omega_1 * c_1^2 * r_2'} * s \quad (4.47.)$$

Т.е. при малых значениях скольжения момент изменяется пропорционально скольжению и зависимость носит линейный характер.

При скольжениях близких или больших 1, можно пренебречь активным сопротивлением обмоток по сравнению с их индуктивными сопротивлениями. Тогда

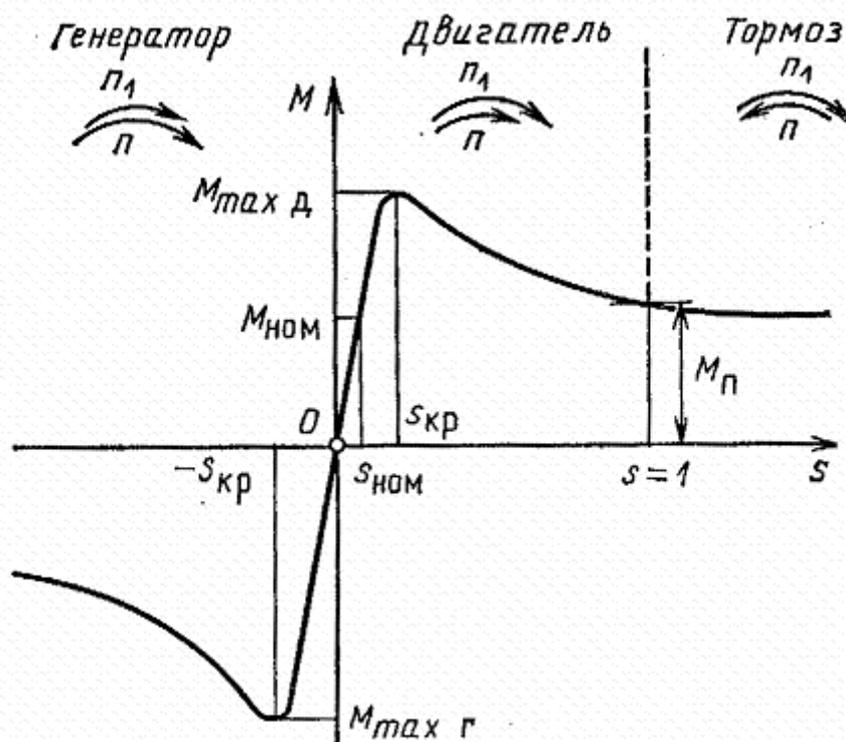
$$M = \frac{m * U_1^2 * r_2'}{\omega_1 * (x_1 + c_1 * x_2')^2} * \frac{1}{s} \quad (4.48.)$$

Отсюда следует, что при больших скольжениях момент обратно пропорционален скольжению и кривая  $M=f(s)$  имеет вид гиперболы.

Физический характер зависимости объясняется аналогичным характером изменения активной составляющей тока ротора.

С увеличением скольжения активная составляющая тока ротора сначала растет, а затем вследствие изменения частоты ( $f_2=f_1*s$ ) индуктивное сопротивление ротора возрастает, угол увеличивается и активная составляющая тока начинает уменьшаться в возросшем полном токе.

Зависимость  $M=f(s)$  построена для трех возможных режимов работы асинхронной машины. (рис.4.12.)



Согласно формуле электромагнитный момент пропорционален квадрату приложенного напряжения.

На механической характеристике показаны три наиболее важные точки двигательного режима. Нормальная работа двигателя протекает на прямолинейной части характеристики, здесь располагается точка,

соответствующая номинальному моменту. Скольжение при  $M_{\text{ном}}$  составляет 0,015-0,05.

Перегрузочная способность двигателя оценивается по максимальному моменту  $M_{\text{max}}$ . Скольжение, соответствующее этому моменту, называется критическим и обычно составляет 0,07-0,15.

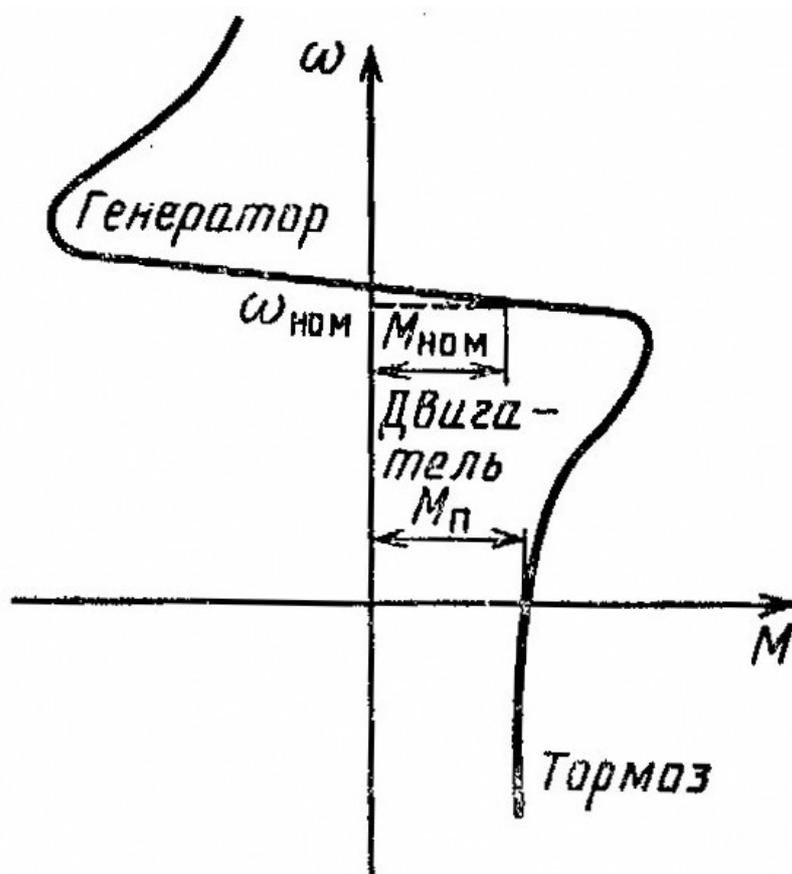
Кратность максимального момента – отношение максимального момента к номинальному.

$$k_m = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}} = 1,7 - 3$$

Более высокие значения соответствуют двигателям с малым числом полюсов. Момент при скольжении, равном 1, называется пусковым моментом

$$k_n = \frac{M_n}{M_{\text{ном}}} = 1 - 1,35$$

Механическую характеристику можно представить как  $\omega = f(M)$ ,  $\omega = \omega_1^*(1-s)$  (рис.4.13.)



#### 4.8. Максимальный электромагнитный момент

Кривая  $M=f(s)$  имеет два явно выраженных максимума: один в генераторном режиме, другой – в двигательном. Определение максимального момента производится путем дифференцирования выражения (4.46.) по скольжению и первая производная приравняется нулю.

$$\frac{dM}{ds} = 0 \quad (4.49.)$$

$$s_{кр} = \pm \frac{c_1 * r_2 \ddot{\gamma}}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 * x_2 \ddot{\gamma})^2}}$$

В результате получают значение критического скольжения

$$s_{кр} \approx \pm \frac{c_1 * r_2 \ddot{\gamma}}{x_1 + c_1 * x_2 \ddot{\gamma}}$$

$$M_{max} \approx \pm \frac{U_1^2}{2 * \omega * c_1 * [x_1 + c_1 * x_2 \ddot{\gamma}]}$$

$$\frac{M}{M_{max}} = \frac{2 * \frac{c_1 * r_2 \ddot{\gamma}}{s} * \ddot{\gamma} r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 * x_2 \ddot{\gamma})^2} \frac{\psi_{bl}}{\psi}}{(r_1 + c_1 * \frac{r_2 \ddot{\gamma}}{s})^2 + (x_1 + c_1 * x_2 \ddot{\gamma})^2} \quad (4.50)$$

$$\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 * x_2 \ddot{\gamma})^2} = c_1 * \frac{r_2 \ddot{\gamma}}{s_{кр}}$$

Подставив значение критического скольжения в (4.49), получим после преобразования максимальный электромагнитный момент

$$M_{max} = \pm \frac{U_1^2}{2 * \omega * c_1 * \ddot{\gamma} \pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 * x_2 \ddot{\gamma})^2} \frac{\psi_{bl}}{\psi}} \quad (4.51.)$$

Знак + относится к двигательному или тормозному режиму, а знак –к генераторному. В асинхронной машине активное сопротивление статора в несколько раз меньше индуктивных сопротивлений статора и ротора, Поэтому для практических целей полагая  $r=0$  получим

$$s_{кр} \approx \pm \frac{c_1 * r_2 \ddot{\gamma}}{x_1 + c_1 * x_2 \ddot{\gamma}}$$

$$M_{max} \approx \pm \frac{U_1^2}{2 * \omega * c_1 * [x_1 + c_1 * x_2 \ddot{\gamma}]} \quad (4.52.)$$

Максимальный момент пропорционален квадрату приложенного напряжения, приложенного к обмотке статора, Поэтому снижение напряжения приводит к более сильному уменьшению кратности максимального момента и перегрузочной способности двигателя.

**4.9. Практическая формула для построения механической характеристики**  
 Механическая характеристика необходима для проектирования электропривода  
 Практическая формула позволяет построить механическую характеристику, пользуясь только каталожными данными машины.  
 Возьмем отношение (4.46) к (4.51.).

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{2 * \frac{c_1 * \ddot{r}_2}{s} * \ddot{r}_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 * x_2)^2}}{(r_1 + c_1 * \frac{\ddot{r}_2}{s})^2 + (x_1 + c_1 * x_2)^2} \quad (4.53.)$$

Согласно (4.50.),

$$\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 * x_2)^2} = c_1 * \frac{\ddot{r}_2}{s_{кр}} \quad (4.54.)$$

Подставляя (4.54.) в (4.53.), произведя сокращения и пренебрегая  $s_{кр}$  в числителе и  $2 * s_{кр}$  в знаменателе, получим упрощенную формулу

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} \quad (4.55.)$$

Формула впервые была получена М. Клоссом, поэтому носит название формулы Клосса.

#### **4.10 Рабочие характеристики асинхронной машины.**

При изменении нагрузки двигателя происходит как изменение потребляемых из сети тока и мощности, так и угловой скорости, КПД и коэффициента мощности. Нагрузкой для двигателя служит нагрузочный момент, приложенный к его валу. при увеличении нагрузочного момента соответственно увеличивается электромагнитный момент, создаваемый двигателем.

$$M = M_2 + M_0 = c_{\Phi} * I_2 * \cos \varphi_2$$

где  $M_0$  – момент, обусловленный механическими и добавочными потерями.

Момент  $M_0$  слабо зависит от нагрузки, он мал и можно принять  $M \approx M_2$ .

От момента  $M_2$  зависит механическая мощность, снимаемая с вала двигателя

$$P_2 = M_2 * \omega \quad (4.56.)$$

Зависимости  $\omega, M_2, I_1, \cos \varphi_1, \eta, P_1 = f(P_2)$  называются рабочими характеристиками машины.

Примерный вид рабочих характеристик показан на **рис.4.14.**

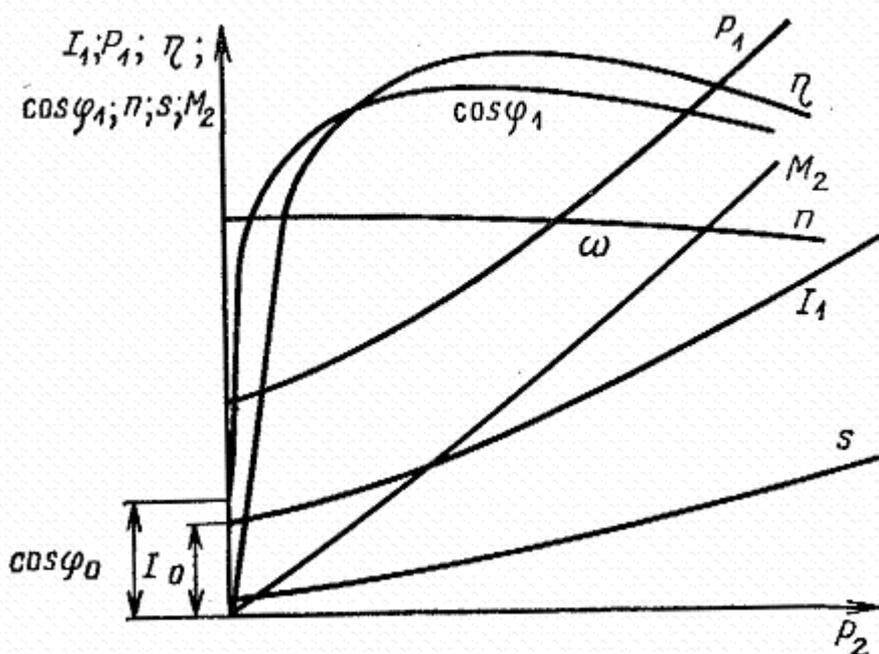


рис.4.14.

При холостом ходе, когда  $P_2=0$  и  $M_2=0$  ток  $I_1$ , будет равен току холостого хода  $I_0$ . Как и у трансформатора, этот ток является намагничивающим и создает основное магнитное поле. Однако из-за наличия зазора между статором и ротором относительное его значение больше и составляет 25-50% номинального тока статора. Мощность  $P_1$ , потребляемая при холостом ходе, расходуется на потери внутри машины: механические потери  $P_{мх}$ , магнитные потери, электрические потери в обмотке статора.

При увеличении момента ток ротора  $I_2$  должен увеличиваться. Возрастание тока происходит за счет увеличения индуцируемой в обмотке ротора ЭДС  $E_{2s}$  вследствие снижения угловой скорости  $\omega$ . Поэтому зависимость  $\omega = f(P_2)$  имеет падающий характер. Однако у большинства асинхронных машин изменение частоты вращения при нагрузке незначительно и характеристика  $\omega = f(P_2)$  является достаточно жесткой.

Скольжение с ростом  $P_2$  будет возрастать. При холостом ходе из-за наличия механических потерь ток  $I_2$  не равен нулю, следовательно не равно нулю скольжение.

Исходя из 4.56. при  $\omega = \text{const}$  зависимость  $M_2 = f(P_2)$  представляет собой прямую, идущую из начала координат. Так как фактически у асинхронного двигателя частота не является постоянной величиной, эта характеристика несколько отличается от линейной.

При увеличении тока нагрузки будет возрастать ток статора. При малых нагрузках скольжение и следовательно индуктивное сопротивление малы и ток ротора будет практически активным, вследствие чего угол сдвига между током статора и напряжением с ростом нагрузки будет уменьшаться, а  $\cos\varphi_1$  увеличиваться по сравнению с  $\cos\varphi_0$ .

При больших нагрузках скольжение и частота индуцируемой ЭДС в роторе возрастают, что приводит к увеличению индуктивного сопротивления обмотки

ротора. Вследствие этого реактивная составляющая тока ротора и соответственно тока статора увеличиваются, а  $\cos\varphi_1$  начинает уменьшаться. Подводимая мощность изменяется пропорционально  $I_1 \cdot \cos\varphi_1$

Зависимость  $\eta=f(P_2)$  достигает максимального значения при нагрузке, когда постоянные и переменные потери в двигателе будут равны.

Рабочие характеристики могут быть получены экспериментально и рассчитаны с помощью схемы замещения. Кроме того для их построения может быть использована круговая диаграмма.

#### **4.11. Пуск трехфазных асинхронных двигателей.**

##### **4.11.1. Способы пуска асинхронных двигателей.**

При рассмотрении способов пуска в ход асинхронных двигателей необходимо учитывать следующие основные положения:

- двигатель должен развивать при пуске надлежащий пусковой момент, который должен быть больше статического момента сопротивления на валу, чтобы ротор мог прийти во вращение и достичь номинальной частоты вращения.
- пусковой ток должен быть ограничен таким значением, чтобы не происходило повреждение двигателя и нарушение нормального режима работы
- схема пуска должна быть по возможности простой, а количество и стоимость пусковых устройств малым.

Короткозамкнутые двигатели проще по устройству и обслуживанию, а также дешевле и надежнее в работе, чем фазные двигатели. Поэтому везде, где это возможно, применяются короткозамкнутые двигатели и подавляющее большинство асинхронных двигателей являются короткозамкнутыми.

##### **4.11.2. Прямой пуск**

Наиболее простым способом пуска является включение обмотки статора в сеть на номинальное напряжение обмотки статора. **(4.15.а.)** Прямой пуск возможен, когда сеть достаточно мощна и пусковые токи не вызывают недопустимо больших падений напряжения (не более 10-15%). Если по условиям падения напряжения прямой пуск короткозамкнутого двигателя невозможен, применяют различные способы пуска при пониженном напряжении. Однако при этом снижается пусковой момент.

##### **4.11.3. Реакторный пуск**

Осуществляется согласно схеме **рис.4.15.б.** Сначала включается выключатель В-1 и двигатель получает питание через трехфазный реактор Р, сопротивление которого  $x_p$  ограничивает величину пускового тока. При достижении нормальной частоты вращения включается выключатель В-2, который шунтирует реактор, в результате чего на двигатель подается нормальное напряжение сети.

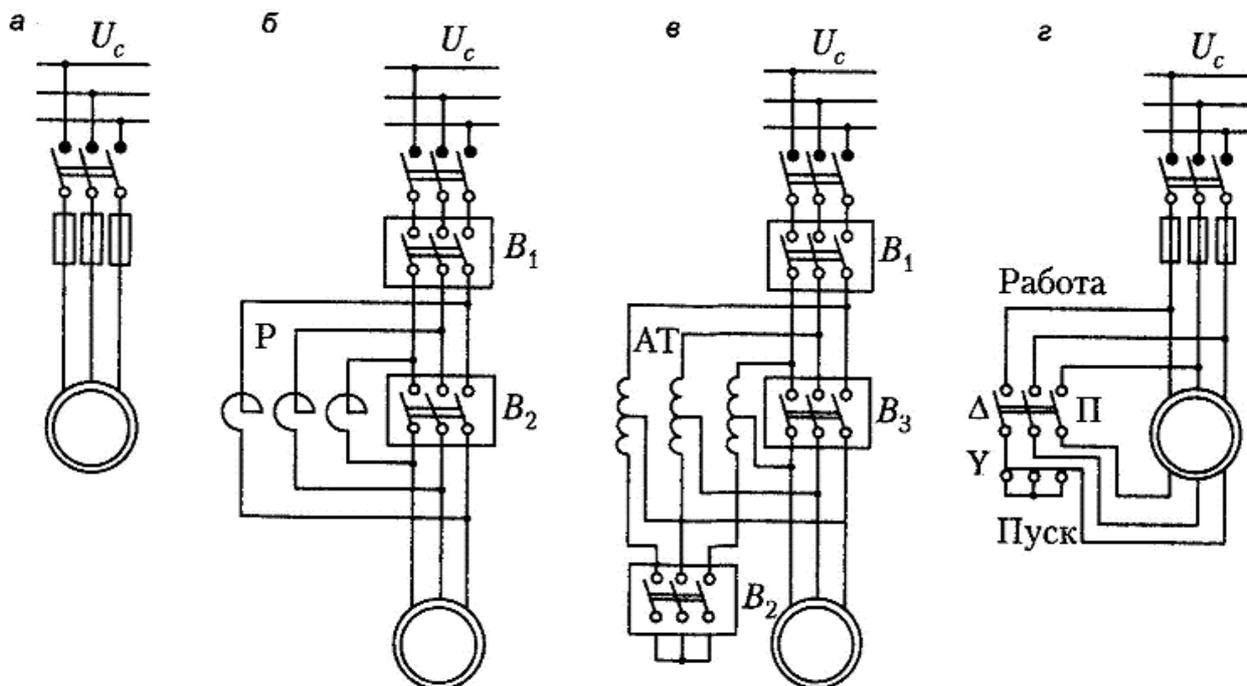
##### **4.11.4. Автотрансформаторный пуск**

Осуществляется по схеме, приведенной на **рис.4.15.в.** Сначала включаются выключатели В-1 и В-2 и на двигатель через автотрансформатор АТ подается пониженное напряжение. По достижении двигателем нормальной частоты вращения выключатель В-2 отключается и двигатель получает питание через часть обмотки автотрансформатора, который в этом случае работает как

реактор. Наконiec выключается выключатель В-3, в результате чего двигатель получает полное напряжение.

#### 4.11.4. Пуск переключение «звезда»-«треугольник»

Применяется в случаях, когда выведены все шесть концов обмотки статора и двигатель нормально работает с соединением обмотки статора «треугольник». В этом случае при пуске обмотка статора включается в «звезду», а при достижении нормальной частоты переключается на «треугольник» **рис.4.15.г.**



#### 4.11.5. Пуск двигателя с фазным ротором с помощью пускового реостата

Двигатели с фазным ротором применяются значительно реже короткозамкнутых и используются в следующих случаях:

- когда короткозамкнутые двигатели неприемлемы по условию регулирования их частоты вращения
- когда статический момент сопротивления на валу при пуске велик и поэтому короткозамкнутый двигатель с пуском при пониженном напряжении неприемлем, а прямой пуск такого двигателя недопустим по условию воздействия больших пусковых токов на сеть.

когда приводимые с движение массы настолько велики, что выделяемая во вторичной цепи тепловая энергия вызывает недопустимый нагрев обмотки ротора.

Пуск фазных двигателей производится с помощью пускового реостата в цепи ротора. **(рис.4.16.)**

Перед пуском щетки должны быть опущены на контактные кольца, а все ступени реостата включены.

Далее в процессе пуска поочередно включаются контакторы К-3, К-2 и К-1.

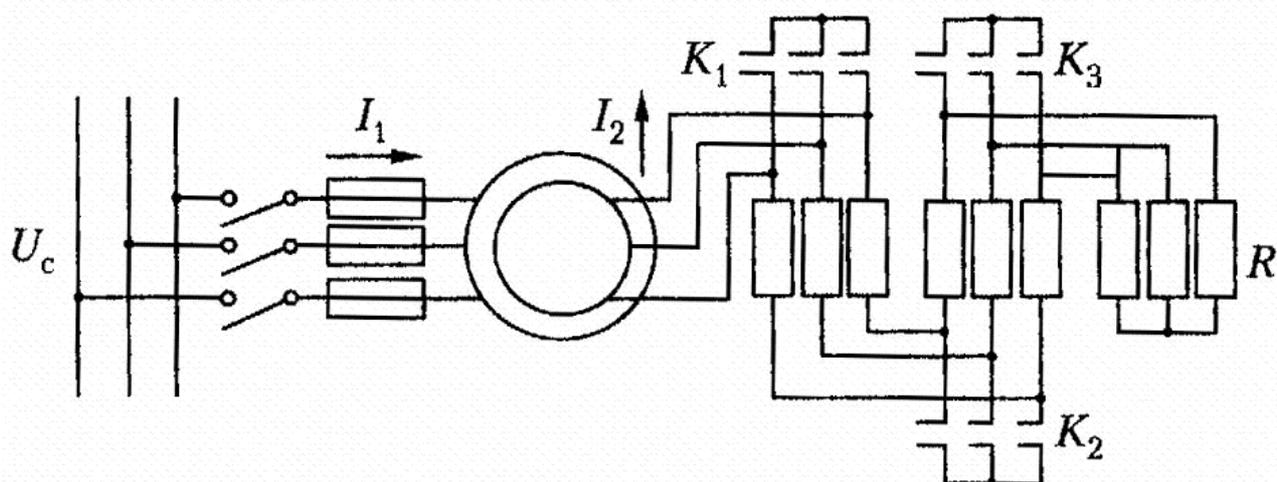


рис.4.16.

#### 4.11.6. Самозапуск асинхронных двигателей

В электрических сетях в результате коротких замыканий случаются кратковременные значительные понижения напряжения и перерывы питания. Включенные в сеть асинхронные двигатели при этом начинают затормаживаться и чаще всего полностью останавливаются. При восстановлении напряжения начинается одновременный самозапуск не отключившихся от сети двигателей. Он способствует быстрому восстановлению нормальной работы производственных механизмов и поэтому целесообразен. Однако одновременный самозапуск большого количества асинхронных двигателей загружает сеть весьма большими токами, что вызывает падение напряжения и задерживает процесс восстановления нормального напряжения. Поэтому целесообразно использовать самозапуск только для двигателей наиболее ответственных производственных механизмов, а все остальные снабдить релейной защитой для их отключения от сети при глубоких падениях напряжения. Самозапуск широко применяется для асинхронных двигателей механизмов электрических станций.

#### 4.12. Регулирование частоты вращения короткозамкнутых асинхронных двигателей.

##### 4.12.1. Общие положения

Частота вращения асинхронного двигателя

$$n = n_1 * (1 - s)$$

Способы регулирования частоты асинхронных двигателей согласно приведенной формуле можно подразделить на два класса

- регулирование частоты вращения первичного магнитного поля

$$n_1 = f_1 / p$$

что достигается либо регулированием первичной частоты  $f_1$ , либо изменением числа пар полюсов двигателя.

- регулированием скольжения при  $n_1 = \text{const}$ . В первом случае КПД двигателя остается высоким, а во втором снижается, т.к. при этом мощность скольжения теряется во вторичной цепи.

$$p_s = s * P_{эм}$$

##### 4.12.2. Регулирование частоты вращения изменением первичной частоты

Частотное регулирование требует применения источников питания с регулируемой частотой (синхронные генераторы с переменной частотой вращения, ионные или полупроводниковые преобразователи частоты). Одновременно с регулированием частоты для поддержания неизменным потока необходимо пропорционально частоте изменять напряжение, т.е.

$$U_1/f_1 = \text{const}$$

#### **4.12.3. Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов**

Используется только для короткозамкнутых двигателей, т.к. при этом требуется изменение числа пар полюсов только обмотки статора. Изменить  $p$  можно двумя способами:

- применением на статоре нескольких обмоток, которые уложены в общие пазы и имеют разное число пар полюсов.
- применением обмотки специального типа, которая позволяет получить различные значения  $p$  изменением (переключением) схемы соединения обмоток.

#### **4.12.4. Регулирование частоты вращения уменьшением напряжения**

При уменьшении напряжения момент двигателя меняется пропорционально квадрату напряжения и соответственно изменятся механические характеристики, в результате чего изменится также значение скольжения. Данный способ регулирования применяется для двигателей с фазным ротором, причем в цепь ротора включаются добавочные сопротивления. Следует учитывать, что при повышенных скольжениях увеличиваются потери во вторичной цепи, что вызывает повышенный нагрев ротора.

#### **4.12.5. Импульсное регулирование частоты вращения**

Выполняется периодическим включением в сеть и отключением его от сети или периодическим шунтированием сопротивлений, последовательно включенным в цепь статора.

При этом двигатель постоянно находится в переходном режиме ускорения или замедления частоты вращения ротора и в зависимости от частоты и продолжительности импульсов работает с некоторой средней постоянной частотой вращения. подобное регулирование применяется только для двигателей малой мощности.

### **4.13. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей с фазным ротором**

#### **4.13.1. Регулирование частоты вращения с помощью реостата в цепи ротора.**

производится по той же схеме, что реостатный пуск асинхронного двигателя, но реостат при этом должен быть рассчитан на длительную работу.

При увеличении активного сопротивления вторичной цепи вид механической характеристики двигателя изменяется, характеристика становится более мягкой и скольжение двигателя при том же моменте нагрузки увеличивается.

Этот способ малоэффективен ввиду значительных потерь энергии, а также зависимости диапазона регулирования от нагрузки. Применяется при кратковременной или повторно-кратковременной работе.

#### ***4.13.2. Регулирование частоты вращения введением добавочной ЭДС во вторичную цепь двигателя.***

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя путем увеличения скольжения всегда связано с выделением во вторичной цепи двигателя значительной электрической мощности скольжения

$$p_s = s * P_{эм}$$

которая при реостатном регулировании полностью теряется в реостате.

Полезно использовать эту мощность можно, если вместо реостата подключить к контактным кольцам фазного двигателя приемник электрической энергии в виде подходящей для этих целей электрической машины. Эта вспомогательная машина может быть и источником энергии как возбудитель асинхронной машины со стороны ротора.

## Тема 5

### Синхронные машины

#### *5.1. Принцип действия синхронного генератора*

Отличительным признаком синхронной машины является жесткая связь между частотой  $f_1$  переменной ЭДС, наведенной во вращающейся обмотке статора, и частотой вращения ротора  $n_1$ , называемой синхронной частотой вращения.

$$n_1 = \frac{60 * f_1}{p} \quad (5.1.)$$

где  $p$  – число пар полюсов в обмотке статора или во вращающемся роторе.

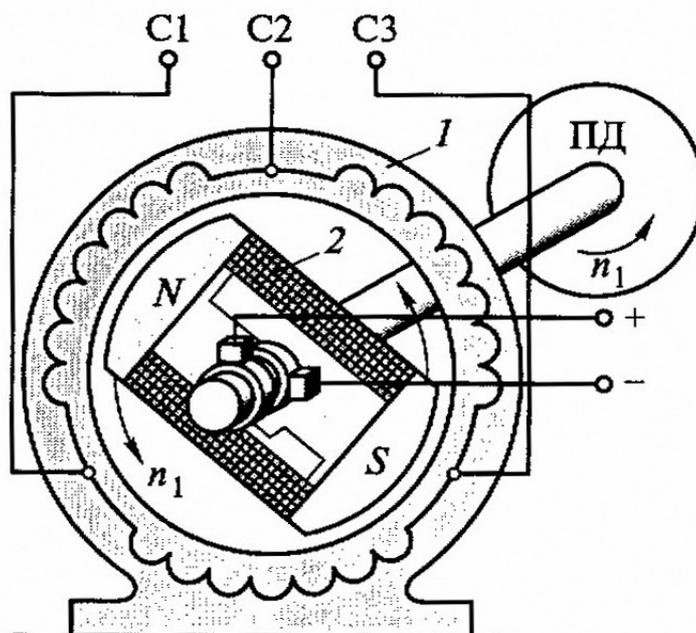
Синхронные машины эксплуатируются как в генераторном, так и в двигательном режимах.

Синхронные генераторы составляют основу электроэнергетики, так как практически вся электроэнергия во всем мире вырабатывается посредством синхронных генераторов – турбо – или гидрогенераторами. При этом единичная мощность таких генераторов составляет тысячи и даже миллионы киловатт.

Синхронные двигатели – это обычно двигатели большой мощности, так как именно они по своим технико-экономическим показателям превосходят двигатели других типов. Это объясняется их способностью работать с коэффициентом мощности, близким к единице. Исключение составляют синхронные двигатели малой мощности (обычно до 1кВт), в которых используется их способность работать с неизменной синхронной частотой вращения.

Синхронные машины получили применение также в качестве синхронных компенсаторов – реактивной мощности, позволяющих повышать коэффициент мощности крупных потребителей электроэнергии до весьма высоких значений и способствовать этим энергоснабжению.

На **рис. 5.1** представлена функциональная схема синхронного генератора.



На статоре 1 расположена трехфазная обмотка, в принципе не отличающаяся от аналогичной обмотки асинхронной машины. На роторе расположен электромагнит с обмоткой возбуждения 2, получающей питание постоянным током через скользящие контакты, осуществляемые посредством двух контактных колец, расположенных на вращающемся роторе, и двух неподвижных щеток.

Приводным двигателем ПД, в качестве которых используется турбина, двигатель внутреннего сгорания либо другой источник механической энергии, ротор генератора приводится во вращение с синхронной скоростью. При этом магнитное поле электромагнита ротора также вращается с синхронной скоростью и индуцирует в трехфазной обмотке статора переменные ЭДС  $E_A$ ,  $E_B$  и  $E_C$ , которые будучи одинаковыми по значению и сдвинутыми по фазе относительно друг друга на  $1/3$  периода (120 эл.град.), образуют симметричную трехфазную систему ЭДС.

С подключением нагрузки к зажимам обмотки статора  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  в фазах обмотки статора появляются токи  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ . При этом трехфазная обмотка статора создает вращающееся магнитное поле. Частота вращения этого поля равна частоте вращения ротора генератора (об/мин). Таким образом, в синхронной машине магнитное поле статора и ротор вращаются синхронно.

Мгновенное значение ЭДС обмотки статора в рассматриваемом синхронном генераторе (В)

$$e = B_{\delta} * 2 * I w_1 * u = 0,105 * B_{\delta} * I * w_1 * D_1 * n_1. \quad (5.2.)$$

где

$B_{\delta}$  – магнитная индукция в воздушном зазоре между сердечником статора и полюсами ротора, Тл;

$I$  – активная длина одной пазовой стороны обмотки, т.е. длина сердечника статора, м;

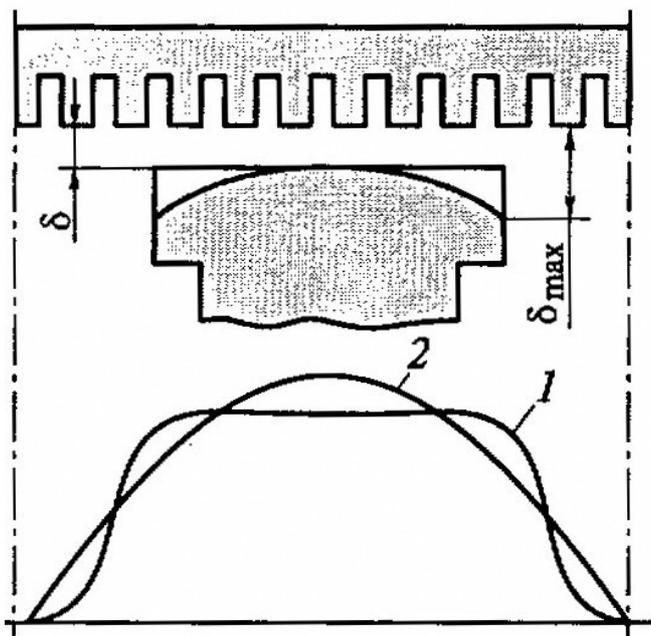
$v = \pi * D_1 * n_1 / 60$  – линейная скорость движения полюсов ротора относительно статора, м/с;

$D_1$  – внутренний диаметр сердечника статора, м.

Формула ЭДС показывает, что при неизменной частоте вращения ротора  $n_1$  форма графика переменной ЭДС обмотки якоря (статора) определяется исключительно законом распределения магнитной индукции в зазоре между статором и полюсами ротора  $B_\delta$ .

Если бы график магнитной индукции в зазоре представлял собой синусоиду ( $B_\delta = B_{\max} * \sin \alpha$ ), то ЭДС генератора была бы синусоидальной.

Однако получить синусоидальное распределение индукции в зазоре практически невозможно. Так, если воздушный зазор  $\delta$  постоянен, то магнитная индукция  $B_\delta$  в воздушном зазоре распределяется по трапецеидальному закону, а следовательно, и график ЭДС генератора представляет собой трапецию. Если же края полюсов ротора «скосить» так, чтобы зазор на краях полюсных наконечников был равен  $\delta_{\max}$ , то график распределения магнитной индукции в зазоре приблизится к синусоиде, а следовательно, и график ЭДС, индуцированной в обмотке генератора, приблизится к синусоиде. **(рис.5.2.)**



Частота ЭДС синхронного генератора  $f_1$  (Гц) пропорциональна синхронной частоте вращения ротора  $n_1$  (об/мин)

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

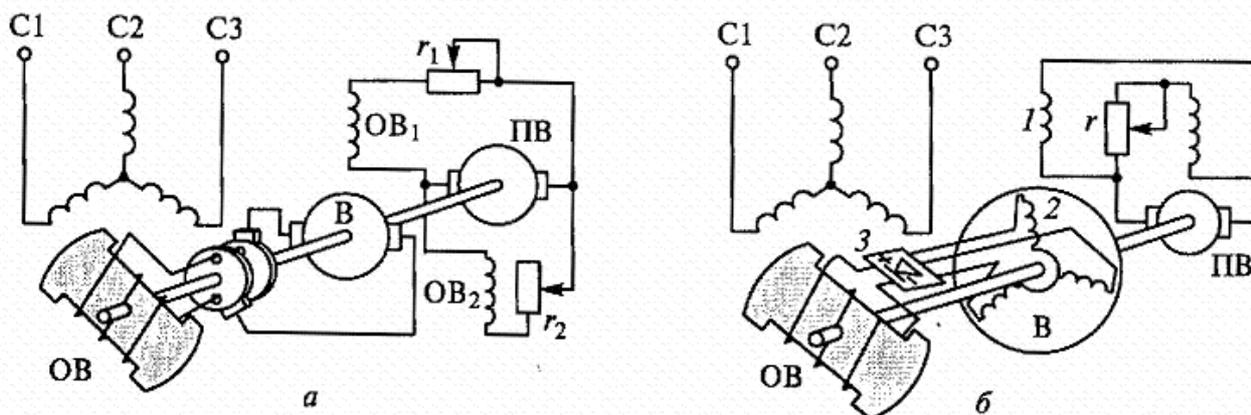
где  $p$  – число пар полюсов; в рассматриваемом генераторе два полюса, т.е.  $p = 1$

Для получения ЭДС промышленной частоты (50 Гц) в таком генераторе ротор необходимо вращать с частотой  $n_1 = 3000$  об/мин.

## 5.2. Способы возбуждения синхронных машин

Основным способом возбуждения синхронных машин является электромагнитное возбуждение, состоящее в том, что на полюсах ротора располагают обмотку возбуждения. При прохождении по этой обмотке постоянного тока возникает МДС возбуждения, которая наводит в магнитной системе машины магнитное поле.

До последнего времени для питания обмотки возбуждения применялись преимущественно специальные генераторы постоянного тока независимого возбуждения, называемые возбудителями. **(рис.5.3. а.)**



Обмотка возбуждения (ОВ) получает питание от другого генератора (параллельного возбуждения), называемого подвозбудителем (ПВ).

Ротор синхронной машины и якорей возбудителя располагаются на общем валу и вращаются одновременно. При этом ток в обмотку возбуждения синхронной машины поступает через контактные кольца и щетки. Для регулирования тока возбуждения применяют регулировочные реостаты, включаемые в цепи возбуждения возбудителя  $r_1$  и подвозбудителя  $r_2$ .

В синхронных генераторах средней и большой мощности процесс регулирования тока возбуждения автоматизируют. В синхронных генераторах получила применение бесконтактная система электромагнитного возбуждения, при которой синхронный генератор не имеет контактных колец на роторе. В качестве возбудителя в этом случае применяют синхронный генератор переменного тока. **(рис.5.3.б.)**

Обмотка 2 этого генератора, в которой наводится ЭДС (обмотка якоря), расположена на роторе, а обмотка возбуждения 1 – на статоре. В результате обмотка якоря возбудителя и обмотка возбуждения синхронной машины оказываются вращающимися, и их электрическое соединение осуществляется непосредственно, без контактных колец и щеток. Но так как возбудитель является генератором переменного тока, а обмотку возбуждения необходимо питать постоянным током, то на выходе обмотки якоря возбудителя включают полупроводниковый преобразователь 3, расположенный на валу синхронной машины и вращающийся вместе с ее обмоткой возбуждения и якорем возбудителя.

Питание постоянным током возбуждения 1 возбуждителя В осуществляется от подвозбудителя ПВ – генератора постоянного тока. Отсутствие скользящих контактов в цепи возбуждения синхронной машины позволяет повысить эксплуатационную надежность и увеличить КПД.

В синхронных генераторах, в том числе гидрогенераторах, получил распространение принцип самовозбуждения, когда энергия переменного тока, необходимая для возбуждения, отбирается от обмотки статора синхронного генератора и через понижающий трансформатор и выпрямительный полупроводниковый преобразователь ПП преобразуется в энергию постоянного тока. Принцип самовозбуждения основан на том, что первоначальное возбуждение генератора происходит за счет остаточного магнетизма машины.

Мощность, затрачиваемая на возбуждение, обычно составляет от 0,2 до 5% полезной мощности машины (меньшее значение относится к машинам большей мощности). В синхронных машинах малой мощности находит применение принцип возбуждения постоянными магнитами, когда на роторе машины располагаются постоянные магниты. Такой способ возбуждения дает возможность избавить машину от обмотки возбуждения. В результате конструкция машины упрощается, становится более экономичной и надежной. Однако из-за дефицитности материалов для изготовления постоянных магнитов с большим запасом магнитной энергии и сложности их обработки применение возбуждения постоянными магнитами ограничено машинами мощностью не более нескольких киловатт.

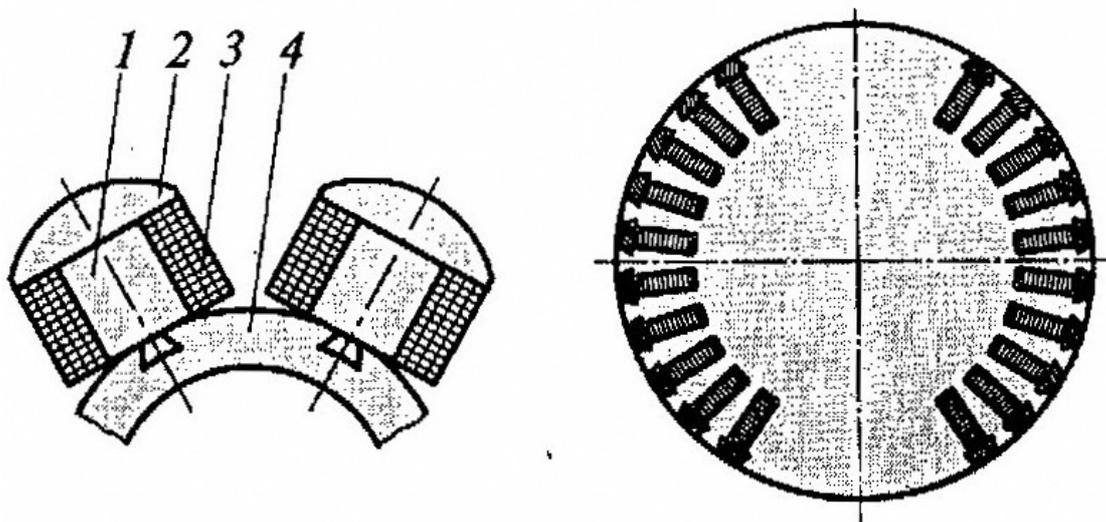
### **5.3. Типы синхронных машин и их конструктивные особенности**

Синхронная машина состоит из неподвижной части – статора и вращающейся части – ротора. Статоры синхронных машин в принципе не отличаются от статоров асинхронных двигателей, т.е. состоят из корпуса, сердечника и обмотки.

Конструктивное исполнение статора синхронной машины может быть различным в зависимости от назначения и габаритов машины. Так, в многополюсных машинах большой мощности при наружном диаметре сердечника статора более 900 мм пластины сердечника делают из отдельных сегментов, которые при сборке образуют цилиндр сердечника статора. Для удобства транспортировки и монтажа корпуса статоров крупногабаритных синхронных машин делают разъемными. Роторы синхронных машин могут иметь две принципиально различающиеся конструкции: **явнополюсную и неявнополюсную.**

В энергетических установках по производству электроэнергии переменного тока в качестве первичных (приводных) двигателей синхронных генераторов применяют в основном три вида двигателей: паровые турбины, гидравлические турбины либо двигатели внутреннего сгорания – дизельные или бензиновые. Применение любого из перечисленных типов приводных двигателей принципиально влияет на конструкцию синхронного генератора.

Если приводным двигателем является гидравлическая турбина, то синхронный генератор называется *гидрогенератором*. Гидравлическая турбина обычно развивает небольшую частоту вращения (60 – 500 об/мин), поэтому для получения переменного тока промышленной частоты (50Гц) в гидрогенераторе применяют ротор с большим числом полюсов. Роторы гидрогенераторов имеют явнополюсную конструкцию (рис.5.4.),



при которой каждый полюс выполняют в виде отдельного узла, состоящего из сердечника 1, полюсного наконечника 2 и полюсной катушки 3. Все полюсы ротора закреплены на обode 4, являющемся также ярмом магнитной системы машины, в котором замыкаются потоки полюсов.

Гидрогенераторы обычно изготавливают с вертикальным расположением вала. При таком расположении ротора синхронной машины на его подшипники действуют значительные осевые силы, создаваемые массой ротора генератора и колесом гидротурбины. Поэтому непременным элементом вертикальных гидрогенераторов является *подпятник*.

По своей конструкции вертикальные гидрогенераторы подразделяются на *подвесные и зонтичные*.

В первом случае подпятник 8 расположен в верхней части агрегата, на верхней крестовине 7, и весь агрегат «подвешен» к этой крестовине и к подпятнику (подвесное исполнение)

Во втором случае подпятник 8 находится на нижней крестовине 12 генератора или на крышке гидротурбины, и генератор в виде «зонта» расположен над подпятником (зонтичное исполнение).

Достоинствами гидрогенераторов подвесного исполнения являются:

- уменьшение потерь на трение в подпятнике благодаря более низкой окружной скорости на нем (из-за его меньшего диаметра);
- возможность обслуживания подпятника посредством крана машинного зала ГЭС;
- Более надежную защиту обмоток от масляных паров, поступающих из масляной ванны подпятника, расположенной выше статора и ротора.

Достоинства зонтичной конструкции – уменьшение высоты генератора и машинного зала, массы генератора и расхода материалов.

Получили применение гидрогенераторы с **горизонтальным расположением вала**, заключенные в водонепроницаемую оболочку, называемые капсульными генераторами. Генератор вместе с гидротурбиной размещается непосредственно в водном потоке. Такие генераторы применяют на низконапорных ГЭС. При этом не требуется машинный зал и ГЭС получается более компактной и дешевой по сравнению с ГЭС традиционного устройства. Капсульные гидрогенераторы изготавливают мощностью до нескольких десятков мегаватт.

**Паровая турбина** работает при большей частоте вращения, поэтому приводимые ею во вращение генератор, называемый **турбогенератором**, является быстроходной синхронной машиной.

Роторы такого генератора выполняют либо двухполюсными ( $n_1 = 3000$  об/мин), либо четырехполюсными ( $n_1 = 1500$  об/мин).

В процессе работы турбогенератора на его ротор действуют значительные центробежные силы. Поэтому по условиям механической прочности в турбогенераторах применяют неявнополюсной ротор, имеющий вид удлиненного стального цилиндра с профрезерованными на поверхности продольными пазами для обмотки возбуждения. Сердечник неявнополюсного ротора изготавливают в виде цельной стальной поковки вместе с хвостовиками (концами вала) или же делают его сборным.

Обмотка возбуждения неявнополюсного ротора занимает лишь 2/3 поверхности (по периметру). Оставшаяся 1/3 часть поверхности образует полюсы. Для защиты лобовых частей обмотки ротора от разрушения действием центробежных сил ротор с двух сторон прикрывают стальными бандажными кольцами (каппами), изготавливаемыми обычно из немагнитной стали.

Рассмотренные синхронные генераторы – гидрогенераторы и турбогенераторы – характеризуются значительной мощностью (от 30 до 1200 МВ\*А) и высоким напряжением на выходе (30кВ). Эти генераторы применяются на крупных электростанциях, соединенных в единую энергетическую систему России.

Наряду с этим широко используют агрегаты для автономного электроснабжения – небольших населенных пунктов и предприятий, удаленных от промышленных центров, временных промышленных установок и т.п. Эти агрегаты могут быть стационарными и передвижными. Основным видом приводного двигателя в таких агрегатах являются дизельные двигатели, а при небольшой мощности агрегата возможно применение бензиновых двигателей. Диапазон мощности синхронных генераторов для автономного электроснабжения от 5 до 800 кВт при напряжении на выходе обычно 230 и 400 В и лишь при мощности 630 и 800 кВт возможно напряжение на выходе 6300 В. Такие синхронные генераторы имеют явнополюсную конструкцию ротора с горизонтальным расположением вала и рассчитаны на частоту вращения 1500, 1000, 750, 500 и 375 об/мин.

#### **5.4. Охлаждение крупных синхронных машин**

В крупных электрических машинах иногда применяют систему охлаждения с использованием водорода в качестве охлаждающего газа. Особые свойства водорода обеспечивают водородному охлаждению ряд преимуществ.

1. Плотность технического водорода более чем в десять раз меньше плотности воздуха, что способствует снижению потерь на вентиляцию, а следовательно, повышает КПД машины. Например, в турбогенераторе мощностью 150 тыс. кВт потери на вентиляцию при воздушном охлаждении составляют 1000 кВт, а при водородном охлаждении турбогенератора такой же мощности эти потери составляют всего лишь 140 кВт, т.е. более чем в семь раз меньше.

2. Благодаря повышенной теплопроводности водорода, которая в 6 – 7 раз больше, чем у воздуха, он интенсивнее охлаждает машину. Это дает возможность при заданных габаритах изготовить машину с водородным охлаждением мощностью на 20 – 25 % больше, чем при воздушном охлаждении.

3. Водородное охлаждение снижает опасность возникновения пожара в машине, так как водород не поддерживает горения.

4. Водородное охлаждение увеличивает срок службы изоляции обмоток, так как при явлении короны, благодаря отсутствию азота, в машине не образуются нитраты – соединения, разъедающие органические составляющие изоляционных материалов.

Эффективность водородного охлаждения повышается с ростом давления водорода в машине. Но наряду с перечисленными достоинствами водородное охлаждение имеет и недостатки, сущность которых сводится к тому, что водородное охлаждение ведет к усложнению и удорожанию КА самой машины, так и ее эксплуатации. Объясняется это, в первую очередь, необходимостью содержания целого комплекса устройств водородного хозяйства, обеспечивающего подпитку, очистку и поддержание требуемого давления водорода в системе охлаждения машины. Однако в машинах большей единичной мощности (турбогенераторах, гидрогенераторах, синхронных комплексах) водородное охлаждение оправдано и дает большой экономический эффект.

Рассмотренные способы охлаждения машин являются косвенными, так как происходят без непосредственного контакта охлаждающего вещества с наиболее нагретыми элементами машины – обмотками. Отбор теплоты от обмоток при этих способах охлаждения происходит через электрическую изоляцию ( в лобовых частях) и сталь магнитопровода, что снижает эффективность процесса охлаждения. Поэтому более эффективным является непосредственное охлаждение обмоток и других нагревательных элементов машины. Для осуществления этого способа охлаждения в проводниках обмотки и сердечниках делают внутренние каналы, по которым циркулирует охлаждающее вещество – водород, вода, масло.

Непосредственный контакт охлаждающего вещества с проводами обмоток и внутренними слоями магнитопроводов усиливает интенсивность теплоотвода и

позволяет существенно повысить удельные электромагнитные нагрузки электрических машин: плотность тока, магнитную индукцию.

### 5.5. Основные уравнения и характеристики синхронных генераторов.

В процессе работы машины в обмотке статора индуцируются ЭДС и протекают токи, создающие магнитодвижущую силу (МДС), максимальное значение которой

$$F_1 = \frac{0,45 * m_1 * I_1 * w_1 * K_{01}}{p} \quad (5.3.)$$

Эта МДС создает вращающееся магнитное поле, а в воздушном зазоре  $\delta$  машины создается магнитная индукция, график распределения которой в пределах каждого полюсного деления  $\tau$  зависит от конструкции ротора.

Для синхронных машин справедливы уравнения напряжений:

*Для явнополюсной машины*

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{1d} + \dot{E}_{1q} + \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_1 r_1. \quad (5.4.)$$

где

$\dot{E}_0$  - основная ЭДС синхронной машины, пропорциональная основному магнитному потоку  $\Phi_0$ ;

$\dot{E}_{1d}$  - ЭДС реакция якоря синхронной машины по продольной оси, пропорциональная МДС реакции якоря по продольной оси  $\dot{E}_{1d}$ ;

$\dot{E}_{1q}$  - ЭДС реакция якоря по поперечной оси, пропорциональная МДС реакция якоря по поперечной оси  $\dot{E}_{1q}$ ;  $\dot{E}_{\sigma 1}$

ЭДС рассеяния, обусловленная наличием магнитного потока рассеяния  $\Phi_\sigma$ ,

Величина этой ЭДС пропорциональна индуктивному сопротивлению рассеяния обмотки статора  $X_1$

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 X_1;$$

$\dot{I}_1 * r_1$  – активное падение напряжения в фазной обмотке статора;

*Для неявнополюсной машины*

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_c - \dot{I}_1 * r_1. \quad (5.5.)$$

Здесь

$$\dot{E}_c = \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1},$$

где  $\dot{E}_c$  – синхронная ЭДС неявнополюсной синхронной машины;  
 $\dot{E}_1$  – ЭДС реакции якоря неявнополюсной синхронной машины.

Следует иметь в виду, что уравнения напряжений и соответствующие им векторные диаграммы не учитывают магнитного насыщения магнитопровода синхронной машины, которое, как известно, влияет на величину индуктивных сопротивлений, вызывая их уменьшение. Учет этого насыщения представляет сложную задачу, поэтому при расчетах ЭДС и напряжений пользуются **практической диаграммой ЭДС**, которая учитывает состояние насыщения магнитной системы, вызванное действием реакции якоря при нагрузке синхронной машины. При построении практической диаграммы ЭДС намагничивающую силу реакции якоря не разлагают на продольную и поперечную составляющие, поэтому эта диаграмма может быть применена как при расчетах явнополюсных машин, так и при расчетах неявнополюсных машин.

Практическую диаграмму ЭДС синхронного генератора строят на основании характеристик холостого хода  $E^* = f(I_B^*)$  и короткого замыкания  $I_{1к}^* = f(I_B^*)$ .

Обычно используют нормальную характеристику холостого хода, построенную в относительных единицах:

$E^* = E_0 / U_{1ном}$	0,58	1,00	1,21	1,33	1,40	1,46	1,51
$I_B^* = I_B / I_{B0ном}$	0,50	1,00	0,50	2,00	2,50	3,00	3,50

Здесь  $I_{B0ном}$  – ток возбуждения в режиме холостого хода, соответствующий ЭДС холостого хода  $E_0 = U_{1ном}$ .

Характеристику трехфазного короткого замыкания  $I_{1к}^* = f(I_B^*)$  получают по результатам опыта короткого замыкания, когда частота вращения ротора равна синхронной, а ток в обмотке возбуждения постепенно увеличивают от нуля до значения, при котором ток короткого замыкания в обмотке статора не достигнет  $I_{1к} = 1,25I_{1ном}$ .

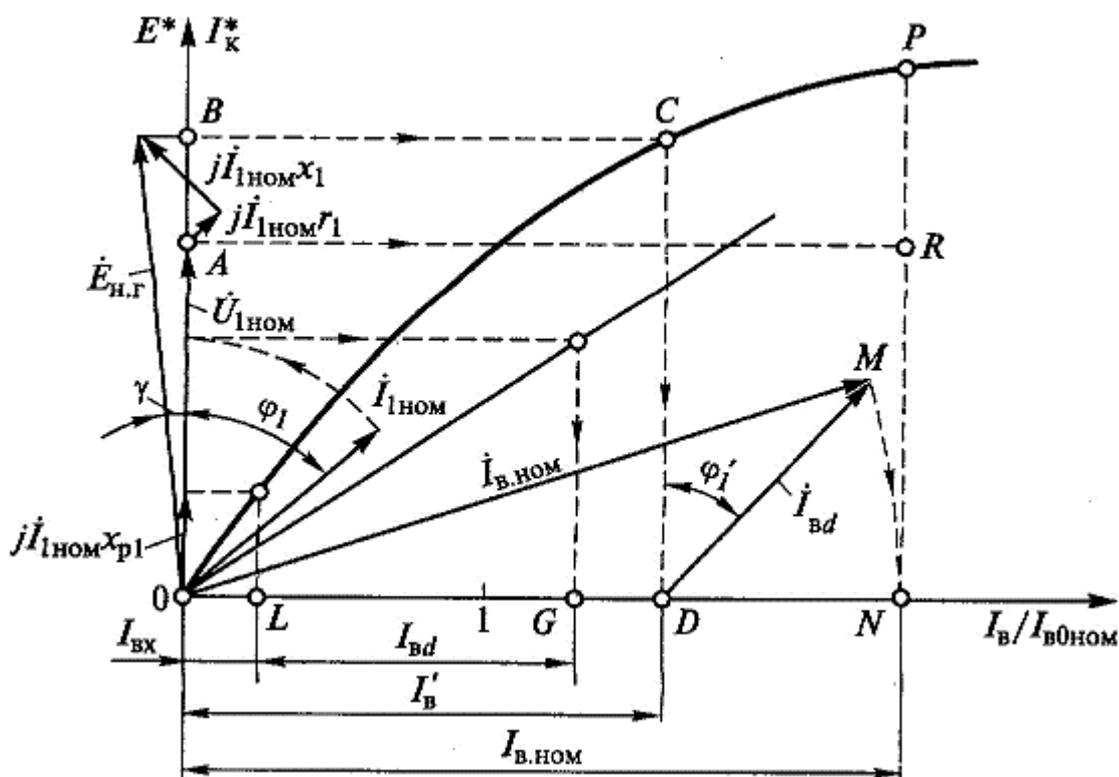
Ток возбуждения  $I_{B,к} = I_{B,к.ном}$  соответствует номинальному значению тока статора в режиме короткого замыкания. Отношение тока возбуждения  $I_{B0ном}$  к току возбуждения  $I_{B,к.ном}$  представляет величину, называемую отношением короткого замыкания ОКЗ, которое является важным параметром, определяющий свойство синхронных машин :

$$ОКЗ = \frac{I_{В\dot{0}ном}}{I_{В,к.ном}} \quad (9.6.)$$

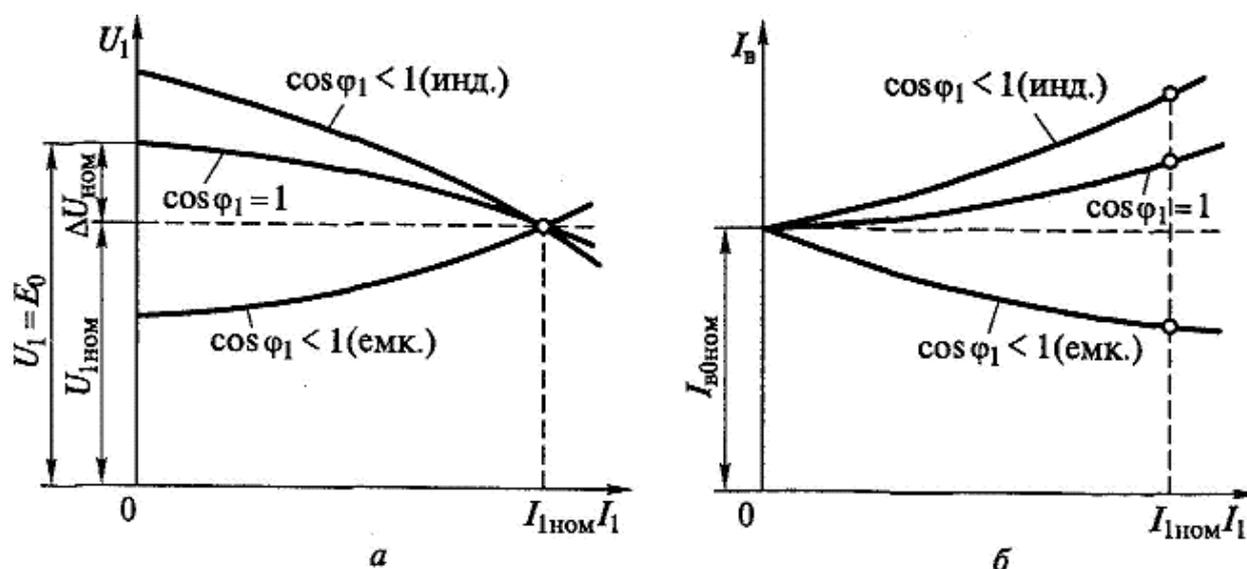
Для неявнополюсных синхронных машин  $OK3 = 0,4 - 1,0$ ; для явнополюсных машин  $OK3 = 0,8 - 1,8$ .

На **рис.5.5.** представлена практическая диаграмма ЭДС синхронного генератора, позволяющая определить изменение напряжения на выходе генератора  $\Delta U_{ном}$  при сбросе нагрузки от номинальной  $I_1 = I_{ном}$  до нулевой  $I_1 = 0$ :

$$\Delta U_{ном} = (NP - NR) / NR = E_0 - U_{1ном} / U_{1ном} \quad (5.7.)$$



Графически выраженная зависимость напряжения на выходе генератора  $U_1$  от тока нагрузки  $I_1$  при неизменном токе возбуждения представлена внешними характеристиками, построенными для разного вида нагрузок (**рис.5.6.**).



Величина  $\Delta U_{\text{ном}}$  не должна превышать 50%. Напряжение на выходе синхронного генератора при колебаниях нагрузки поддерживается неизменным быстродействующими автоматическими регуляторами тока в обмотке возбуждения, работающими в соответствии с регулировочными характеристиками генератора. В этом случае ток возбуждения при колебаниях нагрузки генератора от нулевой до номинальной изменяется таким образом, что напряжение на выходе сохраняется равным номинальному значению.

Электромагнитные моменты синхронной машины (Н \* м):

*неявнополюсной*

$$M_n = P_{эм} / \omega_1 = (m_1 * U_1 * E_0 / \omega_1 * x_c) * \sin \theta \quad (5.8.)$$

*явнополюсной*

$$M = P_{эм} / \omega_1 = (m_1 * U_1 * E_0 / \omega_1 * x_d) * \sin \theta + (m_1 * U_1^2 / 2 * \omega_1) * (1/x_d + 1/x_q) * \sin 2 * \theta \quad (5/9/)$$

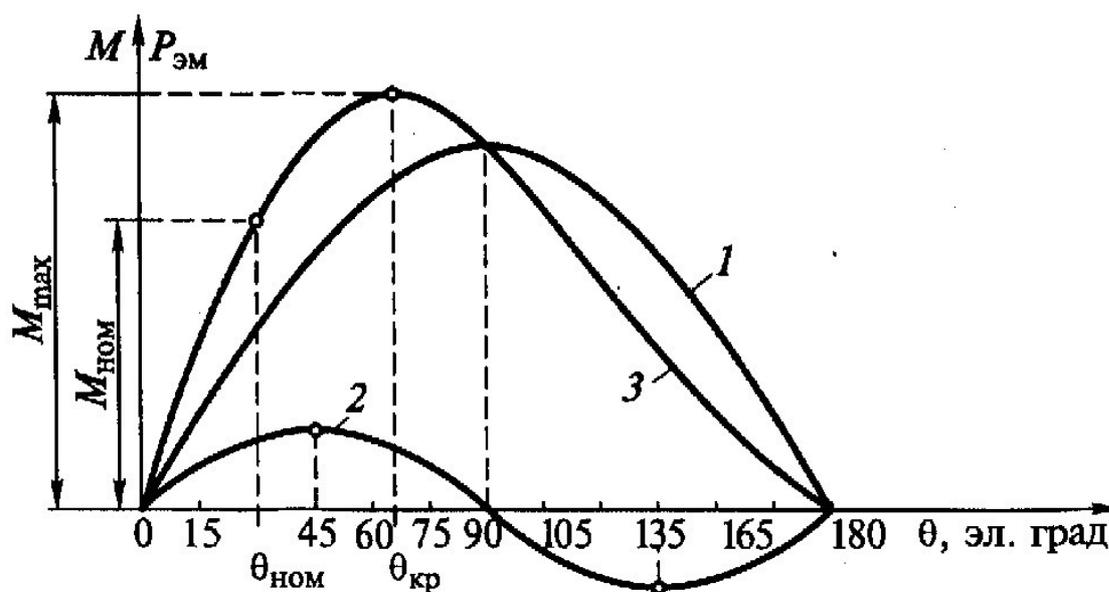
где  $x_d$  и  $x_q$  – синхронные индуктивные сопротивления явнополюсной синхронной машины по продольной и поперечной осям соответственно, Ом;  $\theta$  – угол нагрузки синхронной машины, град.

Первое слагаемое выражения представляет собой основную составляющую электромагнитного момента, которая имеет место в любой синхронной машине независимо от конструкции ротора. Непременным условием возникновения этой составляющей является наличие возбуждения машины, так как она пропорциональна основной ЭДС машины

$$E_0 = 4,44 \Phi f_1 w_1 k_{об1}.$$

Другая составляющая представляет собой реактивную составляющую электромагнитного момента. Реактивная составляющая момента имеет место и в невозбужденной машине ( $E_0 = 0$ ), лишь бы к обмотке статора было подведено напряжение  $U_1$ . Но непременным условием возникновения этого момента является явнополюсность ротора, так как только в этом случае синхронные индуктивные сопротивления по поперечной и продольной осям неравны, т.е.  $x_q < x_d$ . Из этого следует, что в неявнополюсной синхронной машине реактивная составляющая  $M_0 = 0$  и электромагнитный момент  $M_n$  определяется лишь его основной составляющей, т.е.  $M_n = M_{осн}$ .

На рис. 5.7. приведены графики зависимости электромагнитного момента и его составляющих от нагрузки синхронной машины: 1 – график основной составляющей  $M_{осн} = f(\theta)$ , он же является графиком момента  $M_n$  неявнополюсной синхронной машины; 2 – график реактивной составляющей  $M_p = f(\theta)$ ; 3 – график результирующего момента явнополюсной машины  $M_я = f(\theta)$ .



Угол нагрузки  $\theta_{ном}$  соответствует номинальному моменту  $M_{ном}$ . Максимальный момент синхронной машины определяет ее перегрузочную способность – понятие важное как для синхронных генераторов, так и для синхронных двигателей. В неявнополюсных синхронных машинах максимальный момент соответствует углу нагрузки  $\theta = 90$  эл.град, в явнополюсных машинах максимальный момент соответствует углу нагрузки  $\theta_{кр} < 90$  эл.град и обычно составляет 60 – 80 эл. град в зависимости от соотношения основного и реактивного электромагнитных моментов этой машины. Для расчета критического угла нагрузки явнополюсных синхронных машин можно воспользоваться выражением:

$$\cos\theta_{кр} = \sqrt{\beta^2 + 0.5} - \beta. \quad (5.10.)$$

Здесь

$$\beta = E_0/4 * U^*_1 (x_d/x_q - 1)$$

Синхронный генератор, включенный на параллельную работу, обладает синхронизирующей способностью. Физический смысл синхронизирующей способности синхронных генераторов состоит в следующем. В процессе работы синхронного генератора в нем действуют два вращающихся магнитных поля: поле статора и поле ротора. Оба поля вращаются синхронно и создают в машине результирующее вращающееся магнитное поле. Так как обмотки статоров всех генераторов, включенных на параллельную работу, электрически связаны между собой, то также «связанными» оказываются и результирующие магнитные поля всех генераторов, вращающихся с синхронной частотой вращения  $n_1$

Результирующее магнитное поле машины замыкается через сердечник ротора. Поэтому электрическая связь между обмотками статоров параллельно работающих машин в конечном счете переходит в магнитную связь роторов этих машин, аналогичную эластичной механической связи, которая позволяет роторам смещаться друг друга в пределах угла нагрузки  $\theta < \theta_{кр}$ . При этом роторы продолжают вращаться с синхронной частотой. Лишь при смещении ротора какой – либо из параллельно работающих машин на угол  $\theta$ , выходящий за пределы критического значения  $\theta_{кр}$ , связь ротора этой машины с роторами других машин нарушается и машина выходит из синхронизма.

Для количественной оценки синхронизирующей способности синхронной машины вводят понятие удельной синхронизирующей мощности  $p_c$  и удельного синхронизирующего момента  $m_c$ . Удельная синхронизирующая мощность определяется отношением приращения электромагнитной мощности  $\Delta P_{эм}$  к соответствующему приращению угла  $\Delta\theta$ .

$$p_c = \Delta P_{эм} / \Delta\theta$$

Удельный синхронный момент

$$m_c = \Delta M / \Delta\theta$$

Величины  $p_c$  и  $m_c$  тем больше, чем круче подъем угловой характеристики на участке, соответствующем изменению угла нагрузки  $\Delta\theta$ . В неустойчивой области угловой характеристики при  $\theta > \theta_{кр}$  значение  $p_c$  и  $m_c$  отрицательны, т.е.

устойчивая работа синхронной машины соответствует положительным значениям  $p_c$  и  $m_c$ .

При изменениях нагрузки генератора нарушается равенство между мощностью приводного двигателя и мощностью генератора. Возникающий при этом баланс мощностей  $\Delta P_{эм}$  представляет собой синхронизирующую мощность  $\Delta P_{эм} = p_c \Delta \theta$ . Синхронизирующей мощности соответствует синхронизирующий момент

$$\Delta M = \Delta P_{эм} / \omega_1 = m_c \Delta \theta \quad (5.11.)$$

Этот момент обусловлен разностью электромагнитного момента приводного двигателя и оказывает на ротор генератора действие, предотвращающее выход машины из синхронизма.

Наибольшей синхронизирующей способностью синхронная машина обладает при  $\theta = 0$ . С ростом угла  $\theta$  синхронизирующая способность машины снижается и при  $\theta = \theta_{кр}$  исчезает ( $p_c = 0, m_c = 0$ ). Синхронизирующей способностью обладают не только синхронные генераторы, но и синхронные двигатели.

При определении параметров синхронных машин пользуются U – образными характеристиками, представляющими собой зависимость тока статора  $I_1$  от тока в обмотке возбуждения  $I_b$  при неизменной нагрузке  $P_2$ . Из этих характеристик следует, что, изменяя величину тока возбуждения, появляется возможность регулировать коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$  синхронного генератора, так как изменения тока возбуждения вызывают изменения тока в цепи статора лишь за счет его реактивной составляющей. Активная составляющая тока статора при этом остается неизменной. Ток возбуждения  $I'_b$  соответствует работе генератора с коэффициентом мощности  $\cos \varphi_1 = 1$ . Создавая режим перевозбуждения  $I_b > I'_b$ , вызывают опережение по фазе тока сети  $\dot{I}_c$  относительно напряжения  $\dot{U}_1$ , что способствует повышению коэффициента мощности в сети. Необходимо иметь в виду, что при чрезмерном уменьшении тока возбуждения может наступить такое размагничивание генератора, при котором он выпадает из синхронизма, т.е. нарушится магнитная связь между намагниченными полюсами ротора и вращающимся полем статора. Это минимальное значение тока возбуждения, соответствующее конкретному значению активной нагрузки генератора, определяет предел устойчивости синхронного генератора. С ростом нагрузки генератора это предельное значение тока возбуждения увеличивается

**Тема 6.**

## Машины постоянного тока

### ***6.1. Устройство и основные свойства генераторов и двигателей постоянного тока***

#### ***6.1.1. Устройство коллекторных машин постоянного тока.***

Характерным признаком коллекторных электрических машин является наличие у них коллектора и контактных щеток – механического преобразователя переменного тока в постоянный ток, и наоборот. Необходимость в таком преобразователе объясняется тем, что в обмотке якоря коллекторной машины должен протекать переменный ток, так как только в этом случае а машине происходит непрерывный процесс электромеханического преобразования энергии.

Электрические машины постоянного тока используют как в качестве генераторов, так и двигателей. Наибольшее применение имеют двигатели постоянного тока, диапазон мощности которых достаточно широк: от долей ватта (для привода устройств автоматики) до нескольких тысяч киловатт (для привода прокатных станов, шахтных подъемников и других крупных механизмов).

Двигатели постоянного тока широко используют для привода подъемных устройств в качестве крановых двигателей и привода транспортных средств, а также в качестве тяговых двигателей.

Основные достоинства двигателей постоянного тока по сравнению с бесколлекторными двигателями переменного тока – хорошие пусковые и регулировочные свойства, возможность получения частоты вращения более 3000 об/мин, а недостатки – относительно высокая стоимость, некоторая сложность в изготовлении, пониженная надежность. Эти недостатки машин постоянного тока обусловлены наличием в них щеточно – коллекторного узла, который к тому же является источником радиопомех и пожароопасности. Но, несмотря на отмеченные недостатки, двигатели постоянного тока в некоторых случаях пока незаменимы, так как обладают большой перегрузочной способностью, хорошими пусковыми и регулировочными свойствами.

#### ***6.1.2. Обмотки якорей машин постоянного тока***

Элементом обмотки якоря является секция, которая своими концами присоединена к двум пластинам коллектора. Секции могут быть одновитковыми и многовитковыми. Пазовые стороны секций расположены в пазах сердечника якоря. Расстояние между пазовыми сторонами секции приблизительно равны полюсному делению

$$\tau = \pi * D * a / 2 * p$$

где  $D_a$  – диаметр сердечника якоря

Обычно обмотки якоря выполняют двухслойными. В зависимости от порядка присоединения секций к пластинам коллектора обмотки разделяют на волновые и петлевые, простые, сложные и комбинированные.

В простой волновой обмотке концы каждой секции присоединены к пластинам коллектора, находящемся на расстоянии, называемом шагом обмотки по коллектору,

$$y_k = (K \pm 1) / p$$

где  $K$  – число коллекторных пластин в коллекторе.

Рассмотрим схему простой волновой обмотки якоря. Секция обмотки образует две параллельные ветви ( $2a = 2$ ). Число параллельных ветвей в обмотке и число секций в каждой ветви определяют ток  $I_a$  и ЭДС  $E_a$  обмотки якоря.

$$E_a = (S/2a) * e_c;$$

$$I_a = i_c * 2 * a ,$$

Где  $S$  – количество секций в обмотке якоря;

$e_c$  – ЭДС одной секции;

$i_c$  – допустимое значение тока в секции.

В машинах постоянного тока, рассчитанных на большие токи, применяют сложную волновую обмотку, состоящую из двух простых волновых обмоток, соединяемых щетками параллельно. Такая обмотка содержит четыре параллельные ветви, следовательно, ток в ней может быть увеличен в два раза, а ЭДС при этом остается прежней.

В машинах постоянного тока низкого напряжения (значительного тока) необходима обмотка якоря с большим числом параллельных ветвей. Таким свойством обладают петлевые обмотки. В простой петлевой обмотке якоря каждая секция присоединена к двум рядам лежащим коллекторным пластинам, а число параллельных ветвей равно числу полюсов, т.е.  $2a = 2p$ .

При необходимости получить еще большее число параллельных ветвей применяют сложную петлевую обмотку якоря. Такая обмотка содержит две простые петлевые обмотки ( $m = 2$ ), поэтому у нее число параллельных ветвей удвоено, т.е.  $2a = 2 * 2p = 4p$ . Такие обмотки необходимы в машинах значительной мощности при низком напряжении сети : 12, 24, 48 В.

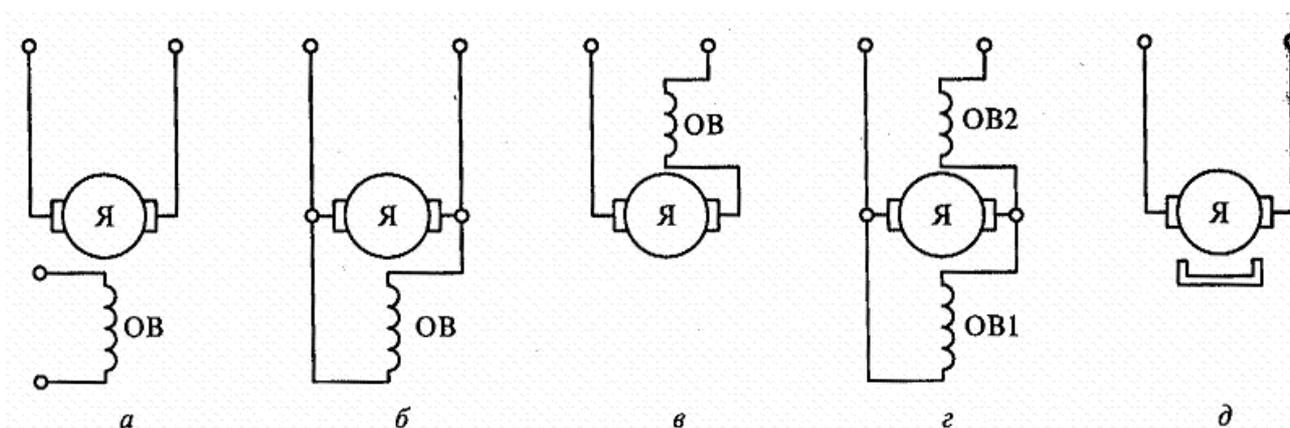
Для того чтобы распределение токов в параллельных ветвях обмотки якоря было одинаковым, необходимо, чтобы электрическое сопротивление этих ветвей не отличалось друг от друга и чтобы ЭДС, наводимые в секциях, составляющих каждую параллельную ветвь, были одинаковыми. При несоблюдении этих условий между параллельными ветвями появляются уравнивающие токи, нарушающие работу щеточно – коллекторного узла.

Исключение составляет простая волновая обмотка, секции которой равномерно распределены под всеми полюсами машины, поэтому магнитная несимметрия машины не вызывает появления в этой обмотке уравнивающих токов. Что же касается простой петлевой и всех видов сложных обмоток якоря, то в них всегда имеются причины к появлению уравнивающих токов. Это приводит к необходимости применения в указанных обмотках так называемых уравнивающих соединений, по которым замыкаются уравнивающие токи, разгружая щеточно – коллекторный узел от перегрузки. Уравнивающие соединения усложняют изготовление обмотки якоря и ведут к дополнительному расходу обмоточной меди.

В электрических машинах со значительным током в обмотке якоря простые волновые обмотки неприменимы, так как в этих обмотках число параллельных ветвей не может быть более двух. Чтобы увеличить число параллельных ветвей и избежать нежелательного применения уравнивающих соединений в машинах с большой токовой нагрузкой, используют комбинированную обмотку. Такая обмотка состоит из секций волновой и петлевой обмоток, а число параллельных ветвей в ней равно сумме параллельных ветвей петлевой и волновой обмоток. Необходимо, чтобы число параллельных ветвей волновой обмотки было равно числу ветвей петлевой обмотки. Поэтому в четырехполюсной машине комбинированную обмотку выполняют из простой петлевой ( $2a = 2p = 4$ ) и сложной волновой ( $m = 2$ ) обмоток. В этом случае число параллельных ветвей комбинированной обмотки равно  $2a_{\text{комб}} = 4 + 4 = 8$ . В такой обмотке ветви одной из составляющих обмоток служат уравнивающими соединениями для другой. В итоге комбинированная обмотка с таким числом параллельных ветвей оказывается проще сложной петлевой обмотки.

## ***6.2. Генераторы постоянного тока***

Основной магнитный поток, возбуждающий машину постоянного тока, создается обмоткой возбуждения. В зависимости от способа включения этой обмотки относительно обмотки якоря машины постоянного тока разделяются на машины независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения (**рис.6.1.**).



Способ возбуждения в значительной степени влияет на свойства машин постоянного тока.

Для генераторов постоянного тока справедливо уравнение напряжений

$$U = E_a - I_a * \Sigma r - \Delta U_{щ} \quad (6.1.)$$

где  $E_a$  – ЭДС обмотки якоря, В,

$$E_a = c_e * \Phi * n;$$

$\Sigma r$  – сумма сопротивлений в цепи обмотки якоря: собственно обмотки якоря, обмотки добавочных полюсов и т.д., Ом;

$\Delta U_{щ}$  – падение напряжения в щеточном контакте на пару щеток, зависящее от марки щеток, примененных в машине, В;

$c_e = pN / (60a)$  – величина, постоянная для данной машины;

$N$  – количество пазовых проводников в обмотке якоря;

$\Phi$  – основной магнитный поток возбуждения, Вб ;

$n$  – частота вращения якоря машины, об/мин.

С появлением тока  $I_a$  в обмотке машины на якоре возникает электромагнитный момент,  $N * m$ ,

$$M = c_m * \Phi * I_a$$

где  $c_m = pN / (2\pi a)$  – величина, постоянная для данной машины.

В генераторе электромагнитный момент  $M$  направлен встречно вращающему моменту приводного двигателя, поэтому он является тормозящим, в то время как в двигателе этот момент является вращающим, так как приводит якорь двигателя во вращение.

Электрическая мощность на выходе генератора

$$P_2 = U * I_a$$

меньше механической мощности двигателя, приводящий якорь генератора во вращение

$$P_1 = 0,105 * M * n$$

на величину потерь мощности:

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

откуда КПД генератора

$$\eta = P_2 / P_1 = (U * I_a) / (U * I_a + \Sigma P) = (1 - \Sigma P) / (U I_a + \Sigma P)$$

При оценке свойств генераторов постоянного тока используются понятием номинального измерения напряжения на выходе генератора при сбросе нагрузки:

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_0 - U_{ном}}{(U_0 - U_{ном}) / U_{ном}} * 100,$$

где  $U_0$  – напряжение на выходе генератора в режиме холостого хода, когда  $I_a = 0$ .

Величина  $\Delta U_{ном}$  зависит от способа возбуждения генератора. Например, для генератора независимого возбуждения  $\Delta U_{ном} = 5 - 10\%$ ; генератора параллельного возбуждения  $\Delta U_{ном} = 15 - 30\%$ .

У генератора смешанного возбуждения при согласном включении обмоток величина  $\Delta U_{ном}$  зависит от соотношения витков в обмотках возбуждения и может быть равна нулю или даже иметь отрицательное значение: напряжение на выходе такого генератора с повышением нагрузки несколько возрастает, компенсируя падение напряжения в проводах, соединяющих генератор с нагрузкой (потребителем).

### **6.3. Двигатель постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения**

Для двигателей постоянного тока уравнение напряжений имеет вид

$$U = E_a + I_a * \Sigma r + \Delta U_{щ}, \quad (6.2.)$$

Или, приняв  $\Delta U_{щ} = 0$ ,

$$U = E_a + I_a * \Sigma r. \quad (6.3.)$$

Отсюда ток якоря двигател

$$I_a = (U - E_a) / \Sigma r \quad (6.4.)$$

Электромагнитный момент двигателя постоянного тока, Н \* м,

$$M = c_m * \Phi * I_a = 9,55 * P_{эм} / n \quad (6.5.)$$

Момент на валу двигателя, т.е. полезный момент,

$$M_2 = M - M_0 = 9,55 * P_2 / n \quad (6.6.)$$

где  $M_0$  – момент холостого хода;  $P_2$  – полезная мощность двигателя;

$$P_2 = P_1 * \eta_{дв},$$

где  $\eta_{дв}$  – КПД двигателя;

$$\eta_{дв} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}.$$

Частота вращения якоря двигателя постоянного тока, об/мин,

$$n = \frac{U - I_a * \Sigma r}{c_e * \Phi} \quad (6.7.)$$

Уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения имеет вид

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M * (\Sigma r + R_{доб})}{c_e * c_m * \Phi^2} = n_0 - \Delta n. \quad (6.8.)$$

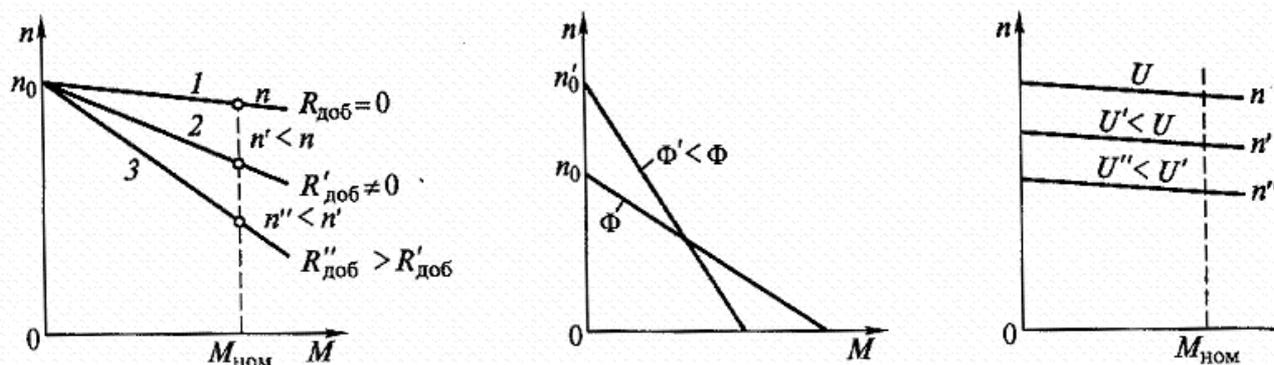
Из этого уравнения следует, что механические характеристики двигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения прямолинейны и пересекают ось ординат в точке холостого хода, при этом изменение частоты вращения двигателя  $\Delta n$ , обусловленное изменением его механической нагрузки, пропорционально сопротивлению цепи якоря

$$R_a = \Sigma r + R_{доб}.$$

Поэтому наименьшему сопротивлению цепи якоря

$$R_a = \Sigma r, \text{ когда } R_{доб} = 0,$$

соответствует наименьший перепад частоты вращения  $\Delta n_e$ . При этом механическая характеристика становится жесткой (рис.6.2.).



Механические характеристики двигателя, полученные при номинальных значениях напряжения на обмотках якоря и возбуждения и при отсутствии добавочных сопротивлений в цепи якоря, называются естественными. Если же хотя бы один из перечисленных параметров двигателя изменен (напряжение на обмотках якоря или возбуждения отличаются от номинальных значений, или же изменено сопротивление в цепи якоря введением  $R_{доб}$ ), то механические характеристики называют искусственными.

Искусственные механические характеристики, полученные введением в цепь якоря добавочного сопротивления  $R_{доб}$ , называют также реостатными.

При оценке регулировочных свойств двигателей постоянного тока наибольшее значение имеют механические характеристики  $n = f(M)$ . При неизменном моменте нагрузки на валу двигателя с увеличением сопротивления резистора  $R_{доб}$  частота вращения уменьшается. Сопротивление резистора  $R_{доб}$  для получения искусственной механической характеристики, соответствующей требуемой частоте вращения  $n$  при заданной нагрузке (обычно номинальной) для двигателей независимого (параллельного) возбуждения:

$$R_{доб} = \frac{U}{I_a} \left( 1 - \frac{n}{n_0} \right) - \Sigma r \quad (6.9.)$$

где  $U$  – напряжение питания цепи якоря двигателя, В;

$I_a$  – ток якоря, соответствующий заданной нагрузке двигателя, А;

$n$  – требуемая частота вращения, об/мин;

$n_0$  – частота вращения холостого хода, об/мин.

Частота вращения холостого хода представляет собой пограничную частоту вращения, при превышении которой двигатель переходит в генераторный режим. Эта частота вращения превышает номинальную  $n_{ном}$  на столько, на сколько номинальное напряжение  $U_{ном}$ , подводимое в цепь якоря, превышает ЭДС якоря  $E_{аном}$  при номинальной нагрузке двигателя:

$$\frac{n_0}{n_{ном}} = \frac{U_{ном}}{E_{аном}} \quad (6.10.),$$

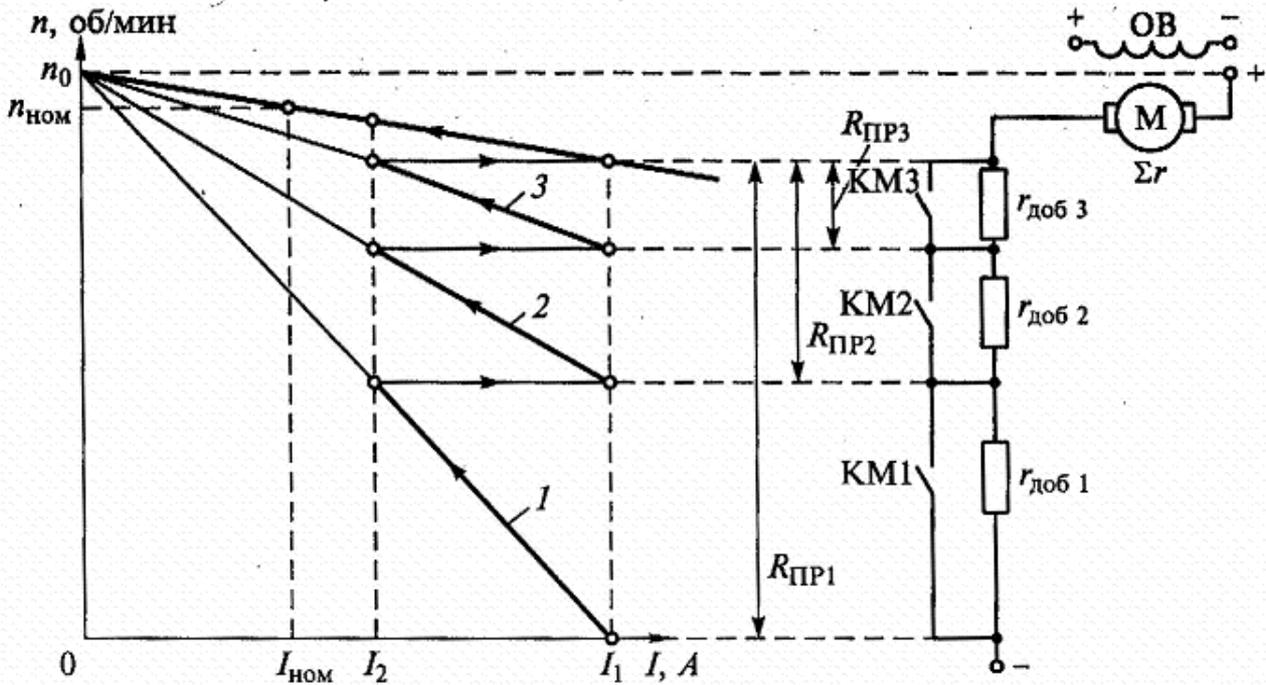
откуда

$$n_0 = n_{ном}^* \frac{U_{ном}}{E_{ном}} = \frac{n_{ном}^* U_{ном}}{U_{ном} - I_a^* \Sigma r} \quad (6.11.)$$

На форму механических характеристик двигателя влияет величина основного магнитного потока возбуждения  $\Phi$ . При уменьшении  $\Phi$  (при возрастании сопротивления резистора  $r_{пер}$ ) увеличиваются частота вращения холостого хода двигателя  $n_0$  и перепад частоты вращения  $\Delta n$ . Это приводит к значительному изменению жесткости механической характеристики двигателя. Если же изменять напряжение на обмотке якоря  $U$  (при неизменных  $R_{доб}$  и  $r_{пер}$ ), то меняется  $n_0$ , а  $\Delta n$  остается неизменным). В итоге механические характеристики смещаются вдоль оси ординат, оставаясь параллельными друг другу. Это создает наиболее благоприятные условия при регулировании частоты вращения двигателей путем изменения напряжения  $U$ , подводимого к цепи якоря. Такой метод регулирования частоты вращения получил наибольшее распространение еще и благодаря разработке и широкому применению регулируемых тиристорных преобразователей напряжения.

Ответным моментом при эксплуатации двигателей постоянного тока является их пуск. При включении двигателя в сеть в начальный момент ток в цепи якоря ограничивается лишь электрическим сопротивлением цепи якоря, так как в неподвижном якоре ЭДС не индуцируется. Поэтому начальный пусковой ток при непосредственном включении двигателя в сеть может достигать опасных значений, способных нарушить работу щеточно – коллекторного узла и вызвать « круговой огонь » на коллекторе. Кроме того, такой ток создаст чрезмерно большой пусковой момент, оказывающий на вращающиеся части электропривода ударное воздействие, способное вызвать их механическое разрушение. Эффективным средством ограничения пускового тока в двигателях постоянного тока является применение пусковых реостатов. Существует два метода расчета пусковых реостатов: графический и аналитический.

В основе графического метода лежит пусковая диаграмма двигателя (**рис.6.3.**).



Пусковая программа совмещена с трехступенчатым пусковым реостатом: К1, К2 и К3 являются контактами силовых контактов, посредством которых осуществляется переключение ступеней реостата,  $r_{доб1}$ ,  $r_{доб2}$  и  $r_{доб3}$  – резисторы ступеней пускового реостата. Механические характеристики 1, 2, 3 соответствуют ступеням пускового реостата  $R_{пр1}$ ,  $R_{пр2}$  и  $R_{пр3}$ .

Значения начального пускового тока  $I_1$  и тока переключения  $I_2$  обычно принимают

$$I_1 = (1,5 - 2,5) * I_{a ном} ;$$

$$I_2 = (1,0 - 1,3) * I_{a ном},$$

при этом ток переключений  $I_2$  должен быть не меньше тока нагрузки, соответствующего статическому моменту сопротивления нагрузки  $M_c$ , на вал двигателя. Для двигателей специального назначения, с тяжелыми условиями работы, например двигателей краново – металлургических серий, указанные значения токов могут быть увеличены.

При аналитическом методе расчет сопротивлений резисторов пускового реостата ведут по формулам:

$$r_{доб3} = \Sigma r (\lambda - 1);$$

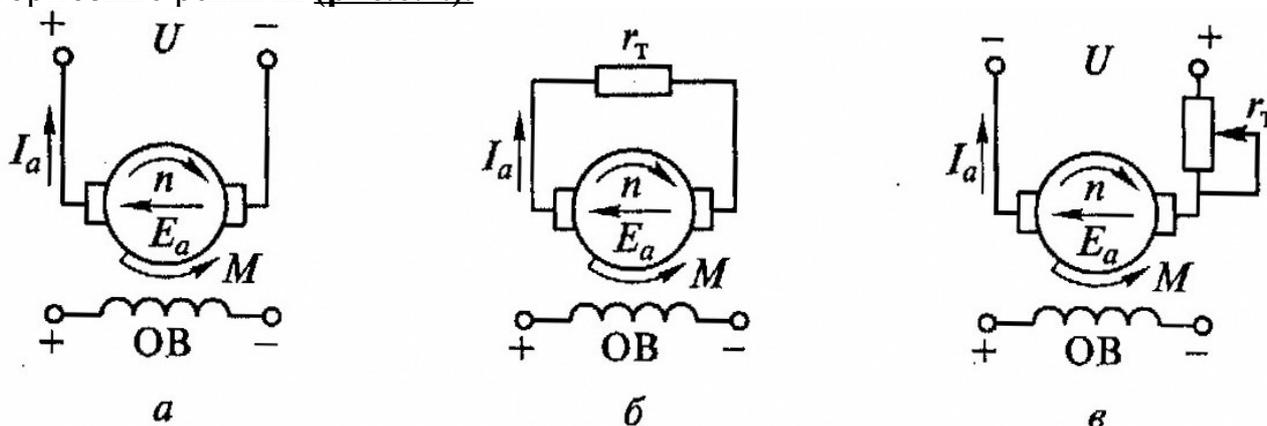
$$r_{доб2} = r_{доб3} \lambda;$$

$$r_{доб1} = r_{доб2} 2\lambda$$

В этих выражениях  $\lambda = I_1 / I_2$  представляет собой отношение начального пускового тока  $I_1$  к току переключения  $I_2$ .

При работе двигателя от регулируемого преобразователя напряжения необходимость в пусковом реостате отпадает, так как пуск двигателя можно начинать с любого пониженного значения напряжения на обмотке якоря в соответствии с допустимым значением начального пускового тока.

Помимо основного (двигательного) режима работы в двигателях постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения возможны тормозные режимы (**рис.6.4.**).



*Генераторное рекуперативное торможение.* Этот режим наступает, когда частота вращения якоря превышает частоту вращения холостого хода  $n_0$ .

В этих условиях ЭДС машины  $E_a = c_e \Phi n_0$  превышает напряжение питающей сети ( $E_a > U_{ном}$ ), при этом ток якоря, а следовательно, и электромагнитный момент меняют свое направление на противоположное. В итоге машина постоянного тока переходит в генераторный режим и вырабатываемую при этом электроэнергию отдает в сеть. Электромагнитный момент двигателя остается тормозящим и противодействует внешнему вращающему моменту, создаваемому силами инерции вращающегося с прежней скоростью якоря. Этот процесс торможения будет продолжаться до тех пор, пока частота вращения якоря, уменьшаясь, не достигнет  $n_0$ .

Таким образом, для перехода двигателя в режим генераторного рекуперативного торможения не требуется изменений в схеме включения двигателя.

*Генераторное рекуперативное торможение* – наиболее экономичный вид торможения, так как он сопровождается возвратом энергии в сеть. Применение этого способа торможения является эффективным энергосберегающим средством в электроприводе. Он целесообразен в электротранспортных средствах, работа которых связана с частыми остановками и движением под уклон. В этом случае кинетическая энергия движения транспортного средства (трамвай, троллейбус, электропоезд) преобразуется в электрическую энергию и возвращается в сеть.

Возможен способ перевода двигателя в режим генераторного рекуперативного торможения и при установившейся частоте вращения якоря. Для этого необходимо увеличить в двигателе магнитный поток возбуждения, т.е. ток в обмотке возбуждения.

Из выражения ЭДС якоря  $E_a = c_e \Phi n$  следует, что с ростом магнитного потока возбуждения  $\Phi$  при неизменной частоте вращения  $n$  ЭДС якоря  $E_a$  увеличивается, что ведет к уменьшению тока в цепи якоря:

$$I_a = \frac{U - E_a}{\Sigma r + R_{доб}} = \frac{U - c_e \Phi n}{\Sigma r + R_{доб}} \quad (6.12.)$$

При ЭДС  $E_a = U$  ток якоря  $I_a = 0$ , а частота вращения якоря достигает значения  $n = n_0$ . При дальнейшем увеличении потока возбуждения  $\Phi$ , а следовательно, возрастании ЭДС якоря  $E_a$  пограничная частота вращения снижается, а частота вращения якоря, оставаясь практически неизменной за счет сил инерции вращающихся частей электропривода, начинает превышать пограничную частоту  $n_0$ . При этом ЭДС якоря превышает напряжение сети и двигатель переходит в режим генераторного рекуперативного торможения.

*Динамическое торможение.* Необходимость в таком торможении возникает в том случае, когда после отключения двигателя от сети его якорь под действием кинетической энергии движущихся масс электропривода продолжает вращаться. Если при этом обмотку якоря, отключив от сети, замкнуть на резистор  $r_r$ , то двигатель перейдет в генераторный режим (обмотка возбуждения должна оставаться включенной в сеть). Вырабатываемая при этом электроэнергия не возвращается в сеть, как это происходит при рекуперативном торможении, а преобразуется в теплоту, которая выделяется в сопротивлении.

$$R = \Sigma r + r_r..$$

В режиме динамического торможения ЭДС якоря не меняет своего направления, но поскольку якорь отключен от сети ( $U = 0$ ), то ток якоря изменит направление, так как будет создаваться ЭДС  $E_a$ ,

$$I_a = \frac{U - E_a}{R} = - \frac{E_a}{R} \quad (6.13.)$$

т.е. станет отрицательным. В результате электромагнитный момент также изменит направление и станет тормозящим. Процесс торможения продолжается до полной остановки якоря ( $n = 0$ ).

*Торможение противовключением.* Допустим, что двигатель работает в основном (двигательном) режиме с номинальной нагрузкой. При отключении двигателя от сети вращающий момент  $M = 0$ , но якорь двигателя за счет

кинетической энергии вращающихся масс электропривода некоторое время будет продолжать вращение, т.е. произойдет выбег двигателя.

Чтобы уменьшить время выбега двигателя, применяют торможение пртивовключением. С этой целью изменяют полярность напряжения на клеммах обмотки якоря (полярность клемм обмотки возбуждения должна остаться прежней) и напряжение питания обмотки якоря становится отрицательным ( $-U$ ). Но якорь двигателя под действием кинетической энергии вращающихся масс электропривода сохраняет прежнее (положительное) направление вращения, и так как направление магнитного потока не изменилось, то ЭДС якоря  $E_a$  также не меняет своего направления и действует согласно напряжению ( $-U$ ), при этом ток якоря создается суммой напряжения сети  $U$  и ЭДС якоря  $E_a$ :

$$I_a = \frac{(-U) + (-E)}{\Sigma r + r_\tau} \quad (6.14.)$$

где  $r_\tau$  – сопротивление резистора в цепи якоря двигателя.

В этих условиях электромагнитный момент станет отрицательным.

Под действием тормозящего момента –  $M_\tau$  частота вращения якоря уменьшается, достигнув нулевого значения. Если в этот момент цепь якоря не отключить от сети, то произойдет реверсирование двигателя и его якорь под действием момента, который прежде был тормозным, начнет вращение в противоположную сторону. При этом двигатель перейдет в двигательный (основной) режим с отрицательными значениями частоты вращения и вращающего момента.

Во избежание нежелательного реверсирования операцию торможения пртивовключением автоматизируют, чтобы при нулевом значении частоты вращения цепь якоря отключилась от сети.

#### **6.4. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения**

Отличительным признаком этих двигателей является последовательное соединение обмоток якоря и возбуждения, отчего ток нагрузки двигателя является и током возбуждения. По этой причине магнитный поток возбуждения в двигателе последовательного возбуждения зависит от нагрузки.

При небольшой нагрузке магнитная система двигателя не насыщена и магнитный поток пропорционален току нагрузки

$$\Phi = c_\phi * I_a,$$

где  $c_\phi$  – коэффициент пропорциональности между током якоря  $I_a$  и потоком возбуждения  $\Phi$ .

Переходя к выражению электромагнитного момента двигателя последовательного возбуждения с ненасыщенной магнитной системой, получим

$$M = c_m * \Phi * I_a = c_m * c_\Phi * I_a^2,$$

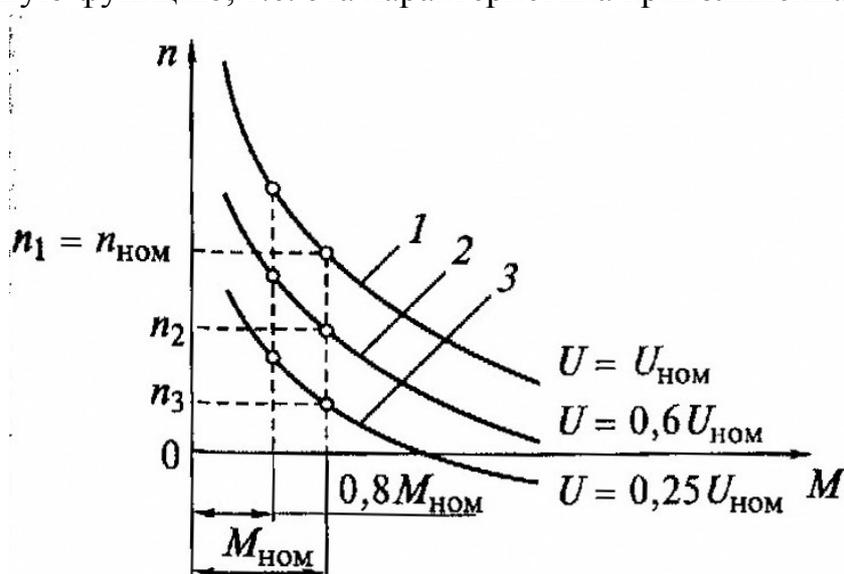
т.е. в двигателе с ненасыщенной магнитной системой электромагнитный момент  $M$  пропорционален квадрату тока нагрузки  $I_a^2$ .

Уравнение механической характеристики двигателя последовательного возбуждения имеет вид:

$$n = C_1 M^{-1/2} - B,$$

где  $C_1$  и  $B$  постоянные коэффициенты.

Из полученного уравнения, соответствующего ненасыщенной магнитной системе двигателя, следует что механическая характеристика представляет собой степенную функцию, т.е. эта характеристика криволинейна (**рис.6.5.**)



Однако при нагрузке двигателя  $M > 0,8 M_{НОМ}$  магнитная система насыщается и прямолинейная зависимость  $\Phi = f(I_a)$  нарушается. Поэтому приведенное выше уравнение определяет форму механической характеристики лишь ее начальной части, соответствующей нагрузке двигателя последовательного возбуждения  $M < 0,8 M_{НОМ}$ .

Изложенное о свойствах двигателей постоянного тока последовательного возбуждения позволяет сделать следующие выводы.

1. Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения криволинейна, при этом жесткость характеристики на разных ее участках неодинакова: при малых нагрузках частота вращения двигателя значительна и характеристика очень мягкая. С увеличением нагрузки характеристика становится более жесткой, а при номинальной нагрузке — еще более жесткой. Объясняется это тем, что при токе нагрузки  $I_a > I_{аНОМ}$  магнитная система

насыщается и магнитный поток возбуждения при дальнейшем увеличении нагрузки остается практически неизменным, не зависящим от тока нагрузки.

2. Механическая характеристика не пересекает ось ординат, так как при отсутствии нагрузки двигателя ( $M \approx 0$ ) частота вращения возрастает неограниченно. По этой причине не допускается работа двигателей последовательного возбуждения при нагрузке, составляющей менее 25% от номинальной ( $M < 0,25 M_{\text{ном}}$ ), а тем более в режиме холостого хода. Чтобы исключить возникновение режима холостого хода (что привело к «разносу» двигателя) в приводах с двигателями последовательного возбуждения недопустимо применение ременных передач и фрикционных муфт для передачи вращательного движения на рабочий механизм.

Потребляемая двигателем мощность, Вт,

$$P_1 = U \cdot I_a \approx A \cdot \sqrt{M},$$

где  $A$  – постоянный коэффициент.

Из рассмотренного следует, что у двигателей последовательного возбуждения при изменениях момента нагрузки  $M$  в широких пределах потребляемая мощность  $P_1$  и ток якоря  $I_a$  изменяются в меньших пределах, чем у двигателей независимого (параллельного) возбуждения, для которых выражение потребляемой мощности имеет вид

$$P_1 = U \cdot I_a \approx A_1 \cdot M_1,$$

где  $A_1$  – постоянный коэффициент.

Например, в двигателе последовательного возбуждения при увеличении момента нагрузки в четыре раза потребляемая мощность  $P_1$  возрастает лишь в два раза, а в двигателе независимого (параллельного) возбуждения – в четыре раза. Объясняется это тем, что при последовательном возбуждении увеличение нагрузки двигателя сопровождается одновременным ростом как тока якоря, так и магнитного потока возбуждения, и оба этих параметра способствуют увеличению вращающего момента. Это свойство двигателей последовательного возбуждения определяет области их применения – привод механизмов с тяжелыми условиями пуска работы: частые пуски, реверсы, перегрузки. Обычно двигатели постоянного тока последовательного возбуждения применяют для привода подъемных устройств и транспортных средств в качестве тяговых двигателей (трамваи, электропоезда, метро, электровозы).

В связи с отсутствием уравнений, позволяющих рассчитать механические характеристики двигателя последовательного возбуждения, пользуются универсальными естественными характеристиками, построенными в относительных единицах: тока

$I^* = I_a / I_{\text{аном}}$ ; момента  $M^* = M / M_{\text{ном}}$ ; частоты вращения в режиме естественной механической характеристики  $n^* = n_e / n_{\text{ном}}$ .

В двигателях постоянного тока последовательного возбуждения возможны тормозные режимы.

**Генераторное рекуперативное торможение** при последовательном возбуждении двигателя невозможно, так как такой двигатель не может работать в режиме холостого хода. Тем не менее рекуперативное торможение тяговых двигателей последовательного возбуждения применяют на электротранспорте, но в этом случае меняется схема соединений двигателя – он переключается на независимое возбуждение.

*Динамическое торможение* в двигателях последовательного возбуждения возможно по двум схемам включения: по схеме независимого возбуждения и по схеме самовозбуждения. При схеме с независимым питанием обмотки возбуждения для ограничения тока в этой обмотке в цепь возбуждения последовательно включают резистор.

Процесс торможения протекает так же, как и в двигателе независимого возбуждения.

Динамическое торможение по схеме с самовозбуждением предусматривает отключение от сети обмотки возбуждения и подключение ее к якору через резистор  $r_t$  таким образом, чтобы магнитный поток  $\Phi$  при переходе двигателя в режим торможения не изменил своего направления, так как в противном случае будет подавлен поток остаточного магнетизма и двигатель размагнитится. В этом случае ЭДС в обмотке якоря не будет индуцироваться и торможения не произойдет.

*Торможение противовключением* происходит так же, как и в двигателях с независимым возбуждением при изменении полярности напряжения на клеммах цепи якоря; при этом меняется направление тока в обмотке якоря и если направление тока в обмотке возбуждения останется неизменным, электромагнитный момент изменит свое направление и станет тормозящим.

### **6.5. Двигатель постоянного тока смешанного возбуждения**

Такие двигатели имеют две обмотки возбуждения: независимую, или параллельную, ОВ1 и последовательную ОВ2. Обе обмотки включают согласовано так, чтобы их намагничивающие силы были направлены в одну сторону. Встречное включение обмоток возбуждения недопустимо, так как при нагрузке двигателя последовательная обмотка возбуждения будет размагничивать магнитную систему двигателя и его работа станет неустойчивой.

Благодаря наличию независимой (параллельной) обмотки возбуждения, двигатели смешанного возбуждения могут работать в режиме холостого хода, а следовательно, в них возможен генераторный рекуперативный режим торможения.

Наличие двух обмоток возбуждения увеличивает габариты, массу и стоимость смешанного возбуждения по сравнению с двигателями независимого и последовательного возбуждения. Это ограничивает их применение лишь в случаях, когда от проводного двигателя требуется сочетание хороших регулировочных свойств с устойчивой работой при резких колебаниях нагрузки

и перегрузке. Но и здесь целесообразность применения двигателей смешанного возбуждения должна быть подтверждена технико – экономическими расчетами.

### 6.6. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока

Частота вращения двигателей постоянного тока определяется выражением

$$n = \frac{U - I_a * (\Sigma r + r_{доб})}{c_e * \Phi} \quad (6.15.)$$

откуда следует, что регулирование частоты возможно следующими способами:

- изменением сопротивления реостата  $r_{доб}$  в цепи якоря;
- изменением магнитного потока возбуждения  $\Phi$  (изменением тока в цепи возбуждения  $I_b$ );
- изменением напряжения  $U$ , подводимого к цепи якоря.

Способы регулирования оцениваются плавностью и диапазоном регулирования, экономичностью (величиной потерь и стоимостью применяемой аппаратуры).

*Регулирование частоты вращения изменением сопротивлением реостата  $r_{доб}$  в цепи якоря* возможно только в сторону ее уменьшения «вниз» от номинальной. С увеличением сопротивления  $r_{доб}$  уменьшается угол наклона искусственной механической характеристики к оси ординат, т.е. характеристика становится более мягкой, что ведет к увеличению перепада частоты вращения  $\Delta n$  при изменениях нагрузки  $M$ .

Для двигателя последовательного возбуждения механические характеристики с увеличением  $r_{доб}$  также становятся более мягкими. Достоинства регулирования частоты вращения изменением сопротивления  $r_{доб}$  в цепи обмотки якоря – простота реализации и плавность ( в зависимости от числа ступеней регулировочного реостата).

Недостатки – неэкономичность, обусловленная электрическими потерями в реостате  $r_{доб}$ , величина которых пропорциональна квадрату тока якоря, и, как следствие, уменьшение полезной мощности двигателя за счет роста потерь; возможность регулирования частоты вращения только «вниз» от номинальной.

*Регулирование частоты вращения изменением магнитного потока возбуждения  $\Phi$*  в двигателе независимого (параллельного) возбуждения реализуется посредством реостата  $r_{rg}$  в цепи обмотки возбуждения. Так, при увеличении сопротивления этого реостата уменьшаются ток возбуждения и магнитный поток  $\Phi$ , что сопровождается повышением частоты вращения.

В режиме холостого хода или при небольшом нагрузочном моменте на валу двигателя значительное уменьшения потока возбуждения  $\Phi$  сопровождается значительным ростом частоты вращения до значений, во много раз превышающих номинальную частоту вращения двигателя, что является

недопустимым по условиям коммутации и механической прочности двигателя, так как может привести к его «разносу». Учитывая это, при выборе реостата  $r_{доб}$  необходимо, чтобы при полностью введенном его сопротивлении ( $r_{пр} = r_{max}$ ) частота вращения двигателя не превысила предельно допустимого значения.

Так как регулировка тока возбуждения посредством реостата в двигателях независимого (параллельного) возбуждения происходит не в силовой цепи (цепи якоря), а в цепи возбуждения, где ток в двигателях большой и средней мощности не превышает 10 – 15 % от номинального тока якоря, то потери в этом реостате незначительны. Это свидетельствует об экономичности рассматриваемого способа регулирования частоты вращения. Недостаток рассматриваемого способа регулирования частоты вращения состоит в том, что при изменении магнитного потока  $\Phi$  меняется угол наклона механической характеристики, т.е. меняется ее жесткость. Кроме того, значительное уменьшение тока возбуждения ограничено, во - первых, предельно допустимо частоты вращения двигателя по условиям коммутации и механической прочности двигателя и, во – вторых, значительное размагничивание двигателя при уменьшении тока возбуждения может привести к «опрокидыванию» магнитного поля машины, т.е. перемагничиванию ее полюсов. Причина этого явления – действие реакции якоря по поперечной оси. Обычно допустимый диапазон регулирования частоты вращения указывается в каталоге на конкретный тип двигателя.

Рассмотренный способ регулирования частоты вращения прост в реализации и применяется при необходимости регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока «вверх» от номинальной.

*Регулирование частоты вращения изменением напряжения, подводимого к цепи якоря*, может происходить только «вниз» от номинальной частоты вращения, так как подавать на двигатель напряжение выше номинального недопустимо по условиям коммутации и электрической прочности изоляции.

Влияние величины напряжения  $U$  на вид механических характеристик было рассмотрено для двигателей независимого (параллельного) возбуждения: с уменьшением напряжения механические характеристики смещаются вдоль оси ординат, оставаясь параллельными естественной механической характеристике (при  $U = U_{ном}$ ), Такое же влияние напряжения  $U$  и в двигателях последовательного возбуждения.

Основным способом изменения напряжения, подводимого к двигателю в современном электроприводе, является его питание от управляемого тиристорного преобразователя напряжения. Электропривод с применением такого преобразователя называют тиристорным. Питание цепей якоря и возбуждения в тиристорном электроприводе должно быть отдельным (независимым), чтобы изменение напряжения в цепи якоря не сопровождалось изменением напряжения в цепи возбуждения.

Возможно также регулирование подводимого напряжения при питании двигателя от индивидуального генератора постоянного тока в системе «генератор – двигатель».

Достоинствами способа регулирования частоты вращения изменением проводимого напряжения являются: стабильность механических характеристик, плавность и широкий диапазон регулирования. Что же касается экономичности, то сам процесс регулирования экономичен, так как не сопровождается значительными потерями, но для его реализации требуются специальные тиристорные устройства. Но, несмотря на это, способ управления двигателями постоянного тока с применением тиристорных преобразователей получил широкое применение, так как эти тиристорные устройства обеспечивают не только регулирование частоты вращения, но и «мягкий» пуск двигателей без применения пусковых реостатов.

При совместной работе нескольких однотипных двигателей последовательного возбуждения частоту вращения можно регулировать изменением схемы их включения. Так, при параллельном включении двигателей (верхнее включение рубильника) каждый из них оказывается под полным напряжением сети  $U$ , а при последовательном включении (нижнее включение рубильника) каждый из двигателей оказывается под напряжением  $U/2$ . Если количество двигателей более двух, то возможно большее число вариантов их включения с более плавным переходом от минимального к максимальному. Этот способ регулирования применяют в магистральных электровозах, где одновременно работает несколько (шесть и более) тяговых двигателей, что позволяет получить большое число вариантов их включения.

Импульсивное регулирование электропривода с двигателем постоянного тока. Принцип импульсивного регулирования частоты вращения двигателя рассмотрен применительно к асинхронным двигателям. Сущность его состоит в том, что цепь якоря двигателя периодически подключается к сети напряжением  $U_{и}$ , а затем отключается. Выполняется это посредством ключа QS (обычно бесконтактного). Обмотка возбуждения ОВ двигателя при этом остается включенной в сеть постоянного тока на напряжение  $U_{в}$ . В этом случае двигатель остается постоянно возбужденным, а напряжение в цепь якоря подается импульсами. На диаграмме импульсы напряжения имеют прямоугольную форму высотой  $U_{и}$ . При этом импульсы продолжительностью  $t_{и}$  чередуются с паузами продолжительностью  $t_{п}$ . За время импульса ток в цепи якоря  $i_{а}$ , обладающий некоторой индуктивностью  $L_{а}$ , нарастает постепенно, достигая в конце импульса наибольшего значения  $I_{max}$ . При прекращении импульса, т.е. при размыкании цепи якоря ключом, ток в якоря, обладающий индуктивностью, уменьшается также постепенно, так как поддерживается за счет ЭДС самоиндукции, наводимой в цепи якоря с дросселем  $L_1$ . Поэтому за время паузы, когда цепь якоря разомкнута, ток якоря не исчезает, а замыкаясь через диод VD. Уменьшается постепенно, достигнув значения  $I_{min}$  к началу следующего импульса напряжения. При этом цепь якоря оказывается под некоторым постоянно действующим средним напряжением  $U_{ср}$ , В,

$$U_{ср} = \frac{U_{ном} * t_{и}}{T} = \gamma * U_{ном}. \quad (6.16.)$$

где  $\gamma = t_n/T$  – коэффициент управления (скважность).

Частота вращения двигателя при импульсном регулировании, об/мин,

$$n = \frac{\gamma * U - I_a * \Sigma r}{c_e * \Phi} \quad (6.17.)$$

Дроссель индуктивностью  $L_1$  совместно с индуктивностью якоря  $L_a$  снижает пульсации тока в цепи якоря. Если параметры схемы выбраны так, что пульсация тока не превышает 10%, то работа двигателя при импульсном управлении по величине потерь в цепи якоря практически не отличается от работы при постоянно действующем напряжении. При большей величине пульсации тока в цепи якоря возникают дополнительные пульсационные потери.

### 6.7. Универсальные коллекторные двигатели

Универсальными называют коллекторные двигатели, которые могут работать как от сети постоянного, так и от сети однофазного переменного тока.

Однофазные коллекторные двигатели обычно имеют последовательное возбуждение. Применение параллельного возбуждения в данном случае ограничено из – за большой индуктивности параллельной обмотки возбуждения, имеющей большое число витков. Это создает значительный фазовый сдвиг между током якоря  $I_a$  и током возбуждения  $I_b$  на угол  $\Psi$ . Среднее значение электромагнитного момента в этом случае определяется выражением, учитывающим угол сдвига фаз между током якоря и магнитным потоком:

$$M_{нар} = c_m \frac{\Phi_{max}}{\sqrt{2}} I_a * \cos(\psi + \delta) \quad (6.18.)$$

где  $\Phi_{max}$  – максимальное значение магнитного потока;

$\psi$  – угол сдвига фаз между током якоря и током возбуждения;

$\delta$  – угол сдвига фаз между током возбуждения и магнитным потоком, обусловленный наличием магнитных потерь в машине [  $\psi + \delta \approx 90^\circ$  , а следовательно ,  $\cos(\psi + \delta) \approx 0$  ].

В двигателе последовательного возбуждения ток якоря  $I_a$  и ток возбуждения  $I_b$  совпадают по фазе :  $\psi = 0$ . Поэтому среднее значение электромагнитного вращающего момента в двигателе последовательного возбуждения  $M_{посл}$  больше, чем в двигателе параллельного возбуждения:

$$M_{\text{посл}} = c_m \cdot \frac{\Phi_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \cdot I_a \cdot \cos\delta \quad (6.20.)$$

Электромагнитный момент двигателя последовательного возбуждения при работе от сети переменного тока имеет постоянную составляющую  $M_{\text{посл}}$  и переменную составляющую  $M_{\text{пер}}$ , изменяющуюся с частотой, равной удвоенной частоте сети  $f_1$ .

Результирующий момент этого двигателя является пульсирующим:

$$M_{\sim} = M_{\text{посл}} + (-M_{\text{пер}}). \quad (6.21.)$$

По своей конструкции универсальные коллекторные двигатели отличаются от двигателей постоянного тока тем, что их станина и главные полюсы делаются шихтованными из тонколистовой электротехнической стали. Это дает возможность сократить магнитные потери, которые при работе двигателя от сети переменного тока повышаются, так как переменный ток в обмотке возбуждения вызывает перемагничивание всей магнитной цепи, включая станину и сердечники полюсов.

Основной недостаток однофазных коллекторных двигателей – тяжелые условия коммутации. Дело в том, что в коммутирующих секциях помимо реактивной ЭДС и ЭДС внешнего поля наводится трансформаторная ЭДС  $e_{\text{тр}}$ , что ухудшает коммутацию.

Применение в обмотке якоря двигателя одновитковых секций ( $w_c = 1$ ) способствует ограничению ЭДС  $E_{\text{тр}}$ , но при этом увеличивается количество пластин в коллекторе, а следовательно, возрастают его размеры. Применение добавочных полюсов с обмоткой включенной последовательно в цепь якоря, позволяют добиться полной взаимной компенсации трансформаторной ЭДС только при определенных значениях тока якоря и частоты вращения. При других режимах работы двигателя условия коммутации остаются тяжелыми.

Регулирование частоты вращения и реверсирование однофазного коллекторного двигателя выполняется так же, как и в двигателях постоянного тока последовательного возбуждения.

В универсальном коллекторном двигателе стремятся получить примерно одинаковые рабочие свойства при номинальной нагрузке как на постоянном, так и на переменном токах. Достигается это тем, что обмотку возбуждения двигателя выполняют с ответвлениями: при работе двигателя от сети постоянного тока обмотка возбуждения используется полностью, а при работе от сети переменного тока – частично.

Расхождения в характеристиках двигателя на постоянном и переменном токе объясняется тем, что при работе от сети переменного тока на величину и фазу тока оказывают влияние индуктивные сопротивления обмоток якоря и возбуждения. Однако уменьшение числа витков обмотки возбуждения обеспечивает сближение характеристик лишь при нагрузке, близкой к

номинальной. Потребляемый двигателем ток при работе от сети переменного тока больше, чем при работе этого же двигателя от сети постоянного тока, так как переменный ток кроме активной еще и реактивную составляющие. Коэффициент полезного действия универсальных двигателей при переменном токе ниже, чем при постоянном, что вызвано повышенными магнитными потерями, обусловленными переменным потоком возбуждения.

## **6.8. Машины постоянного тока нетрадиционной конструкции**

### **6.8.1. Машины постоянного тока с постоянными магнитами**

В отличие от машин постоянного тока традиционной конструкции с электромагнитным возбуждением в машинах с постоянными магнитами возбуждающее магнитное поле создается постоянными магнитами. Якорь и щеточно – коллекторный узел этих машин имеет обычную конструкцию. Что же касается магнитных систем, то они могут иметь разную форму.

Для машин с большим числом полюсов ( $2p \geq 4$ ) целесообразно радиальное расположение постоянных магнитов. Недостаток этой конструкции – небольшая осевая длина каждого магнита и значительная подвижность таких магнитов размагничивающему влиянию реакции якоря. Это ведет к необходимости изготовления постоянных магнитов из материала с особо большой коэрцитивной силой (ферритбариевые).

При  $2p = 2$  постоянные скобообразные магниты имеют большую длину и способны создавать значительное магнитное поле даже при сравнительно небольшой коэрцитивной силе материалов для изготовления постоянных магнитов (альни, альнико, магнико).

Магнитная система с кольцевым магнитом более рациональна и имеет наибольшее применение. «Площадки» у полюсов постоянного магнита сделаны для уменьшения его массы, так как в этих местах постоянный магнит менее использован.

Магнитная система с торцевым магнитом обеспечивает двигателю минимальный диаметр за счет увеличения его длины. Машины постоянного тока с постоянными магнитами, как правило, используют при небольшой мощности, поэтому необходимость применения в них добавочных полюсов отпадает. Обычно машины постоянного тока с постоянными магнитами мощностью от единицы до сотен ватт используют в качестве двигателей для привода устройств бытовой техники, электроинструмента в автоматических системах (исполнительные двигатели и тахогенераторы). Отсутствие у них обмотки возбуждения намного упрощает схемы их включения.

### **6.8.2. Вентильный двигатель постоянного тока**

Благодаря широкому применению управляемых полупроводниковых приборов – тиристоров и транзисторов, появилась возможность создать на основе этих элементов полупроводниковый коммутатор, способный заменить щеточно – коллекторный узел в машинах постоянного тока. Эти приборы

работают в режиме ключа, т.е. они имеют два устойчивых состояния : открытое для прохождения тока и закрытое.

Вентильный двигатель постоянного тока представляет собой соединение синхронной машины с полупроводниковым коммутатором. В вентильном двигателе коммутатор выполняет роль инвертора – преобразователя постоянного тока сети в переменный ток обмотки якоря. Что же касается свойств (характеристик) вентильного двигателя, то они зависят от способа управления полупроводниковыми элементами коммутатора. Если управление инвертором независимое, т.е. когда работа инвертора не определяется пространственным положением ротора двигателя, то вентильный двигатель по своим характеристикам в принципе не отличается от синхронного двигателя. Но основная задача создания вентильного двигателя – получить двигатель со свойствами коллекторного двигателя постоянного тока, а это оказывается возможным лишь при зависимом управлении работой коммутатора, т.е. переключение полупроводниковых элементов инвертора из открытого состояния в закрытое, и наоборот, должно происходить, в зависимости от пространственного положения ротора.

Такое управление возможно лишь при наличии в двигателе датчика положения ротора (ДПР).

В вентильных двигателях небольшой мощности (нескольких сотен ватт) коммутаторы выполняют на транзисторах. В более мощных вентильных двигателях для этой цели применяют также и тиристоры, так как они способны коммутировать токи значительной величины. Однако тиристоры не полностью управляемые полупроводниковые приборы: посредством электрического сигнала тиристор можно открыть, но для того, чтобы его закрыть, требуется прекращение электрического тока в анодной цепи этого тиристора.

Таким образом, в основе работы вентильного двигателя лежит органическое соединение инвертора и двигателя, т.е. инвертор не является автономным, так как сигналы на переключение его полупроводниковых элементов поступают от блока управления БУ в зависимости от пространственного положения ротора.

В вентильных двигателях небольшой мощности инвертор выполняют на тиристорах, в качестве датчиков положения ротора применяют датчики ЭДС Холла, а ротор представляет собой постоянный магнит. Такой двигатель называют бесконтактным двигателем постоянного тока (БДПТ).

## **5. Методические указания по выполнению лабораторных работ**

Лабораторные работы по курсу выполняются с использованием следующих методических указаний:

1. Я.В. Кривохижа, А.Е. Серов «Трансформаторы: Лабораторные работы». Учебное пособие. Благовещенск, Амурский государственный университет, 2002

2. Я.В. Кривохижа, А.Е. Серов «Электрические машины переменного тока». Учебное пособие. Благовещенск, Амурский государственный университет, 2001

3. Кривохижа Я.В., Истомин А.С., Серов А.Е. «Машины постоянного тока.» Учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос.ун-т, 2002.

## 6. Методические указания по практическим и семинарским занятиям

### Раздел 1. Трансформаторы.

#### Задача 1

По паспортным данным и результатам осмотра однофазного двухобмоточного трансформатора установлено, что число витков первичной обмотки  $w_1=424$ , а вторичной обмотки  $w_2=244$ , действительное сечение сердечника  $S = 28,8 \text{ см}^2$ ; 10% приходится на изоляцию пластин, активное сопротивление первичной обмотки  $R_1=1,2 \text{ Ом}$ , вторичной обмотки  $R_2=1,4 \text{ Ом}$ , потери холостого хода составляют 1% от номинального значения потребляемой мощности, напряжение на первичной обмотке  $U_1=220 \text{ В}$ , активный ток обмоток  $I_1=2,95 \text{ А}$ ,  $I_2=4,85 \text{ А}$ , ток холостого хода 5% от  $I_{1 \text{ ном}}$ .

Определить амплитудное значение магнитной индукции, ЭДС, вторичной обмотки, электрические и магнитные потери, номинальный КПД.

#### Решение

Приближенно можно считать, что ЭДС первичной обмотки равна напряжению питающей сети, т.е.  $U_1 = E_1 = 4,44 f \Phi_m w_1$ . Отсюда определяем магнитный поток;

$$\Phi_m = \frac{U_1}{4,44 f w_1} = \frac{220}{4,44 * 50 * 424} = 0,0023 \text{ Вб}$$

Активное сечение стали находим как разность между действительным сечением стали и сечением изоляции:

$$S = S_d - S_{из} = 28,8 - 0,1 * 28,8 \approx 26 \text{ см}^2 = 26 * 10^{-4} \text{ м}^2$$

Амплитудное значение магнитной индукции

$$B_m = \Phi_m / S_a = 0,0023 / (26 * 10^{-4}) = 0,88 \text{ Тл}$$

Коэффициент трансформации

$$n = E_1 / E_2 = w_1 / w_2 = 424 / 244 = 1,73$$

Отсюда ЭДС вторичной обмотки

$$E_2 = E_1 / n = 220 / 1,73 = 127 \text{ В}$$

Абсолютное значение тока холостого хода

$$I_x = 5\% * I_{ном} = 0,05 * 2,95 = 0,147 \text{ A}$$

Электрические потери трансформатора

$$P_s = P_{s1} + P_{s2} = I_1^2 * R_1 + I_2^2 * R_2 = \\ = 2,95^2 * 1,2 + 4,85^2 * 1,4 = 43,3 \text{ Вт.}$$

Магнитные потери

$$P_m = P_x = 1\% * P_1 = 0,01 * 220 * 2,95 = 6,5 \text{ Вт.}$$

Сумма потерь

$$\Sigma P = P_s + P_m = 43,3 + 6,5 = 49,8 \text{ Вт.}$$

КПД трансформатора при номинальной нагрузке

$$\eta = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} = \frac{220 * 2,95 - 49,8}{220 * 2,95} = 0,92 .$$

## Задача 2

Первичную обмотку однофазного трансформатора, потребляющего мощность

$S = 12 \text{ Кв} * \text{A}$ , подключили к сети постоянного тока напряжением  $U_1 = 2 \text{ В}$ . При этом ток в обмотке  $I_1 = 20 \text{ А}$ , затем ее подключили к сети переменного тока с частотой 50 Гц и напряжением  $U = 220 \text{ В}$ , амперметр показал  $I_x = 5 \text{ А}$ , ваттметр –  $P_x = 75 \text{ Вт}$ , а вольтметр вторичной обмотки –  $U_2 = 36,6 \text{ В}$ .

Определить активное, индуктивное и сопротивления постоянному току первичной обмотки, потери и КПД трансформатора, если электрические потери первичной обмотки равны электрическим потерям вторичной обмотки, а  $\cos \varphi_{ном} = 0,9$ .

**Решение:**

Сопротивление постоянному току определяют как отношение постоянного напряжения к постоянному току:

$$R_1 = U_1 / I_1 = 2 / 20 = 0,1 \text{ Ом.}$$

Для частоты  $f = 50 \text{ Гц}$  сопротивление переменному току проводников малого сечения по значению равно сопротивлению постоянного тока. Полное сопротивление первичной обмотки переменному току

$$Z = U_1 / I_1 = 220 / 5 = 44 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление первичной обмотки

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{44^2 - 0.1^2} = 43,99 \text{ Ом}$$

Индуктивность первичной обмотки можно определить, воспользовавшись формулой индуктивного сопротивления

$$X = 2\pi fL$$

Отсюда

$$L = \frac{X}{2\pi f} = \frac{43,99}{2 \cdot 50 \cdot 3,14} = 0,14 \text{ Гн.}$$

Электрические потери в первичной обмотке при холостом ходе

$$P_{I_{0x}} = I^2 R = 5^2 \cdot 0,1 = 0,25 \text{ Вт.}$$

Потери в стали

$$P_c = P_x - P_{I_{0x}} = 75 - 0,25 = 74,75 \text{ Вт}$$

Электрические потери при холостом ходе в данном случае

0,25

$$P_{I_{0x}} = \frac{0,25}{75} \cdot 100\% = 0,33\% \text{ от общего значения потерь холостого хода.}$$

Ввиду малого значения электрических потерь при холостом ходе ими пренебрегают и считают потери холостого хода равными потерям в стали.

Номинальный ток первичной обмотки

$$I_{ном} = S_{ном} / U_{ном} = 12\,000 / 220 = 54,5 \text{ А}$$

Электрические потери первичной обмотки

$$P_{I_1} = I_{ном}^2 R = 54,5^2 \cdot 0,1 = 297,5 \text{ Вт.}$$

Сумма потерь трансформатора при условии  $P_{I_1} = P_{I_2}$

$$\sum P = P_{I_1} + P_{I_2} + P_x = 297,5 + 297,5 + 75 = 670 \text{ Вт}$$

КПД трансформатора при номинальной нагрузке

$$\eta = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = \frac{12\,000\,670 - 0,9^*}{12\,000\,0,9^*} = 0,938$$

### Задача 3

Однофазный двухобмоточный трансформатор испытали в режиме холостого хода и короткого замыкания. При опытах получили следующие данные: номинальное напряжение первичной обмотки  $U_1=10000$  В; ток холостого хода  $I_x=0,25$  А; потери холостого хода  $P_x=125$  Вт; напряжение на вторичной обмотке  $U_2=380$  В; номинальное напряжение короткого замыкания  $U_k=500$  В; номинальный активный ток первичной обмотки  $I_{1ном} = I_{1к} = 2,5$  А; номинальный ток вторичной обмотки  $I_{2ном} = I_{2к} = 79,4$  А; Потери короткого замыкания  $P_k = 600$  Вт.

В опыте короткого замыкания указаны суммарные электрические потери двух обмоток, значение которых одинаковы. Определить коэффициент мощности при холостом ходе и опыте короткого замыкания, полное, активное и индуктивное сопротивление первичной обмотки, номинальный КПД.

#### **Решение:**

Определяем коэффициент трансформации:

$$n = w_1 / w_2 = E_1 / E_2 = U_{1ном} / U_{2ном} = 10\,000 / 380 = 26,3$$

Коэффициент мощности:

при холостом ходе

$$\cos \varphi_x = \frac{P_x}{U_{1ном} I_x} = \frac{125}{10\,000 \cdot 0,25^*} = 0,05;$$

при опыте короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_{1к} I_{1ном}} = \frac{600}{500 \cdot 2,5^*} = 0,48.$$

Сопротивление при коротком замыкании первичной обмотки:

активное

$$R_{1к} = P_{1к} / I_{ном}^2 = 600 / 2,5^2 = 96 \text{ Ом};$$

полное

$$Z_{1к} = U_{1к} / I_{ном} = 500 / 2,5 = 200 \text{ Ом}$$

индуктивное

$$X = \sqrt{Z_{1к}^2 - R_{1к}^2} = \sqrt{200^2 - 96^2} = 175 \text{ Ом}$$

Номинальный КПД

$$\eta = \frac{P_{ном} - (P_x + P_k)}{P_{ном}} = \frac{10\,000\,600 + 125 - 2,5^*}{10\,000\,2,5^*} = 0,97$$

#### Задача 4

Однофазный трансформатор имеет следующие данные: номинальная мощность  $S_{ном} = 5000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ; потери холостого хода  $P_x = 1400 \text{ Вт}$ ; потери короткого замыкания при номинальной мощности  $P_k = 4500 \text{ Вт}$ ; ток холостого хода  $I_x = 4\%$  от номинального значения тока первичной обмотки. Напряжение первичной обмотки  $U_1 = 35 \text{ кВ}$ , напряжение вторичной обмотки  $U_2 = 400 \text{ В}$ . Определить полное сопротивление первичной обмотки, коэффициент мощности при холостом ходе трансформатора, коэффициент трансформации, КПД трансформатора при номинальной нагрузке, при нагрузке 0,5; 0,75; 1,25 и коэффициенте мощности  $\cos \varphi_2 = 0,8$ . При какой нагрузке КПД трансформатора будет максимальным и чему равно его значение ?

**Решение.**

Номинальный ток первичной обмотки

$$I_{ном} = S_{ном} / U_{ном} = 5\,000\,000 / 35\,000 = 142,8 \text{ А},$$

Где  $S_{ном}$  – номинальная мощность трансформатора;

$U_{ном}$  – напряжение первичной обмотки.

Полное сопротивление первичной цепи

$$Z_1 = U_{1ном} / I_{ном} = 35\,000 / 142,8 = 245 \text{ Ом}.$$

Коэффициент мощности при холостом ходе трансформатора определяем по известному значению потерь холостого хода и току холостого хода  $I_x = 4\% I_{1ном}$ ,

$$\cos \varphi_x = \frac{P_x}{U_{1ном} I_k} = \frac{1400}{35\,000 \cdot 142,8 \cdot 0,04} = 0,007.$$

Коэффициент трансформации

$$n = U_{1ном} / U_{2ном} = 35\,000 / 400 = 87,5.$$

КПД трансформатора при номинальной нагрузке

$$\eta_{1,0} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{S_2 \cos \varphi}{S_2 \cos \varphi + P_x + P_k} = \frac{5\,000\,000,8}{5\,000\,000 \cdot 0,8 + 1400 + 0,8} = 0,99852$$

КПД:

При коэффициенте нагрузки  $\beta_1 = 0,5$

$$\eta_{0,5} = \frac{\beta_1 S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta_1 S_{ном} \cos \varphi_2 + P_x + \beta_1^2 P_k} = \frac{0,5 \cdot 0,8 \cdot 000\,5\,000}{0,5 \cdot 4500 \cdot 0,5^2 + 1400 + 0,8 \cdot 000\,5\,000} = 0,99873;$$

При  $\beta_2 = 0,75$

$$\eta_{0,75} = \frac{\beta_2 S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta_2 S_{ном} \cos \varphi_2 + P_x + \beta_2^2 P_k} = \frac{0,75 \cdot 0,8 \cdot 000\,5\,000}{0,75 \cdot 4500 \cdot 0,75^2 + 1400 + 0,8 \cdot 000\,5\,000} = 0,99869$$

При  $\beta_3 = 1,25$

$$\eta_{1,25} = \frac{\beta_3 S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta_3 S_{ном} \cos \varphi_2 + P_x + \beta_3^2 P_k} =$$

$$= \frac{1,25 \cdot 0,8 * 000 \ 5 \ 000 *}{1,25 \ 4500 * 1,25^2 + 1400 + 0,8 * 000 \ 5 \ 000 *} = 0,99831.$$

Максимальный КПД возникает при коэффициенте нагрузки

$$\beta_m = \sqrt{P_x / P_k} = \sqrt{1400 / 4500} = 0,557;$$

$$\eta_{max} = \frac{\beta_m S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta_m S_{ном} \cos \varphi_2 + P_x + \beta_m^2 P_k} =$$

$$= \frac{0,557 \cdot 5 \ 000 \ 000 \ 0,8 *}{0,557 \ 4500 * 0,557^2 + 1400 + 0,8 * 000 \ 5 \ 000 *} = 0,999$$

### **Задача 5**

Однофазный автотрансформатор с первичным напряжением  $U_1 = 220$  В, вторичным напряжением  $U_2 = 127$  В имеет в первичной обмотке  $w_1 = 125$  витка и при полной активной нагрузке дает потребителю ток  $I_2 = 9$  А. Определить число витков вторичной обмотки  $w_2$ , пренебрегая током холостого хода. Определить ток в первичной обмотке  $I_1$ , на общем участке обмотки  $I_2$ , сечение проводников  $S_2$  на общем участке обмотки, сечение проводников  $S_1$  на участке, где проходит только первичный ток, мощность, передаваемую электрическим путем, коэффициент выгоды автотрансформатора, если плотность тока  $J = 2$  А / мм<sup>2</sup>.

### **Решение:**

Ввиду незначительного тока холостого хода можно считать, что наведенная ЭДС в первичной обмотке равна подводимому напряжению, напряжение вторичной обмотки. Тогда коэффициент трансформации

$$n = E_1 / E_2 = w_1 w_2 \approx U_1 / U_2 = 220 / 127 = 1,73.$$

Число витков вторичной обмотки

$$w_2 = w_1 / n = 254 / 1,73 = 147.$$

Пренебрегая потерями, можно считать  $I_1 / U_1 = I_2 / U_2$  или  $I_2 / I_1 = U_1 / U_2 = n$ .

Отсюда ток в первичной обмотке

$$I_1 = I_2 = 9 - 5,2 = 3,8$$

Ток на общем участке

$$I_{\text{общ}} = I_2 - I_1 = 9 - 5,2 = 3,8 \text{ A.}$$

Сечение проводников

в первичной цепи

$$S_1 = I_1 / J = 5,2 / 2 = 2,6 \text{ мм}^2;$$

на общем участке

$$S_2 = I_{\text{общ}} / J = 3,8 / 2 = 1,9 \text{ мм}^2;$$

Проходная мощность

$$S_{\text{пр}} = S_2 + S_{\text{эм}} = U_2 I_2 = 127 \cdot 1143 = 9^* \text{ Вт.}$$

Мощности:

передаваемая во вторичную цепь магнитной связью

$$S_{\text{эм}} = S_{\text{пр}} (1 - 1/n) = 1143 (1 - 1/1,73) = 483 \text{ Вт};$$

передаваемая электрическим путем

$$S_2 = S_{\text{пр}} - S_{\text{эм}} = 1143 - 483 = 660 \text{ Вт.}$$

Коэффициент выгодности

$$K_e = 1 - 1/n = 1 - 1/1,73 = 0,422.$$

### **Задача 6**

Трехфазный трансформатор имеет следующие данные: номинальная мощность  $S_{\text{ном}} = 250 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ , высшее напряжение  $U_1 = 10 \text{ 000 В}$ , низшее напряжение  $U_2 = 400 \text{ В}$ , активное сечение стержня и ярма  $S_c = S_{\text{я}} = 200 \text{ см}^2$ , наибольшая магнитная индукция в стержне  $B_c = 1,4 \text{ Тл}$ . Найти число витков в обмотке высшего и низшего напряжений с учетом регулирования на  $\pm 5\%$ .

**Решение:**

При холостом ходе падение напряжения незначительно, поэтому  $E_1 \approx U_1 = 10\,000\text{ В}$ .

ЭДС, индуцируемая в каждой фазе обмотки высшего напряжения,  $E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m$ .

При расчете трансформаторов пользуются понятием ЭДС, индуцируемой в одном витке, откуда

$$E_w = 4.44 f \Phi_m w = 4.44 f B_c S_c 6,2 = 1 \cdot 10^4 \cdot 200 \cdot 1,4 \cdot 50 \cdot 4,44 = 1 \cdot \text{В}.$$

Предыдущая формула примет следующий вид

$$E_1 = E_w w_1.$$

Число витков на фазу первичной обмотки высшего напряжения

$$w_1 = E_1 / E_w = 10\,000 / 6,2 = 1613$$

Так как трансформатор должен иметь регулировку напряжения на  $\pm 5\%$

$$w_1 = w_1 + 0,05 w_1 = 1613 + 0,05 \times 1613 = 1693$$

Число витков на фазу обмотки низшего напряжения

$$w_2 = E_2 / E_w = 400 / 6,2 \approx 66.$$

**Задача 7**

Амперметр на 5 А, вольтметр на 100 В и ваттметр на 5 А и 100 В (со шкалой 500 делений) включены через измерительный трансформатор тока ТШЛ – 20 10000/5 и трансформатор напряжения НТМИ – 10000/100 для измерения тока, напряжения и мощности. Определить ток, напряжение, активную мощность и коэффициент мощности первичной цепи, если во вторичной цепи измерительных трансформаторов тока  $I_2 = 3\text{ А}$ , напряжение  $U_2 = 99,7\text{ В}$ , а показания ваттметра – 245 делений.

**Решение:**

Номинальные коэффициенты трансформации трансформатора;

тока

$$K_I = I_1 / I_2 = 10\,000 / 5 = 2000;$$

напряжения

$$K_u = U_1 / U_2 = 10\ 000 / 100 = 100.$$

Ток в первичной обмотке трансформатора

$$I_1 = K_1 I_2 = 2000\ 6000 = 3\ *\ A$$

Напряжение цепи

$$U_1 = K_u U_2 = 100\ 9970 = 99,7\ *\ B.$$

Активная мощность цепи

$$P_1 = K_1 K_u P_2 = 2000\ 49000000 = 245\ * \ 100\ * \ Bm.$$

Коэффициент мощности цепи

$$\cos\varphi = P / (U_1 I_1) = 49\ 000\ 000 / (9970\ 0,82 = (60000\ *)$$

### Задача 8

Вольтметр на 100 В со шкалой на 100 делений подсоединен к вторичной обмотке трансформатора напряжения НОСК -6 -66 ( $U_1 = 6000$  В). Определить напряжение сети, если стрелка вольтметра остановилась на 95-м делении. Определить погрешности при измерении приборами первого класса точности.

**Решение:**

По данным трансформатора напряжения определяем коэффициент трансформации

$$K_u = U_1 / U_2 = 6000 / 100 = 60.$$

Напряжение в первичной цепи при показании прибора

$$U_1 = K_u U_2 = 60\ 5700 = 95\ * \ B.$$

Относительная погрешность измерения напряжения вольтметра

$$\gamma_u = \gamma_\delta \frac{U_{ном}}{U_1} = \pm 1 \frac{6000}{5700} = 1,05\%$$

Общая относительная погрешность

$$\gamma = \gamma_u + \gamma_m = 1,05\% + 1,0\% = 2,05\%$$

### Задача 9

Трехфазный трансформатор ТМ- 63 /10 имеет следующие данные: низшее напряжение  $U_2 = 400$  В, потери при холостом ходе  $P_x = 265$  Вт, потери при коротком замыкании  $P_k = 1280$  Вт, напряжение короткого замыкания  $U_k$  составляет 5,5 % от номинального значения, ток холостого хода  $I_k$  составляет 2,8 % от номинального значения. Определить: а) фазные напряжения  $U_\phi$  при группе соединения трансформатора  $Y/\Delta$ ; б) фазный  $n_\phi$  и линейный  $n_\Delta$  коэффициенты трансформации; в) номинальные токи первичных и вторичных обмоток; г) КПД при нагрузке 0,5 от номинального значения и  $\cos\varphi = 0,8$ ; д) активное и реактивное сопротивление фазы при коротком замыкании; е) абсолютное значение напряжения короткого замыкания; ж) процентное изменение напряжения на вторичной цепи при  $\cos\varphi = 0,8$ , индуктивном и емкостном характере нагрузки и при номинальном токе; з) напряжение во вторичной цепи, соответствующее этим нагрузкам.

### **Решение:**

Расшифровка марки трансформатора ТМ – 63 /10 означает: Т – трехфазный, М – масляный, 63 кВ \* А – номинальная мощность трансформатора, 10 кВ – напряжение на первичной обмотке.

Знак  $Y/\Delta$  означает, что первичная обмотка соединена в «звезду», вторичная - в «треугольник».

Согласно условиям задачи имеем  $U_\Delta = 10000$  В.

Так как первичная обмотка соединена «звездой», напряжение на фазе первичной обмотки

$$U_{1\phi} = U_\Delta / \sqrt{3} = 10\,000 / 1,73 = 5780 \text{ В.}$$

Из условия соединения вторичной обмотки «треугольником» имеем

$$U_{2\phi} = U_{2\Delta} = U_{2\text{ном}} = 400 \text{ В.}$$

Коэффициент трансформации по фазе

$$n_\phi = U_{1\phi} / U_{2\phi} = 5780 / 400 = 14,55.$$

Линейный коэффициент трансформации

$$n_l = U_{1л} / U_{2л} = U_{1ном} / U_{2ном} = 10\,000 / 400 = 25$$

Номинальный ток в первичной обмотке  $I_{1ном}$  определяем из соотношения

$$S_{ном} = \sqrt{3} U_{1ном} I_{1ном},$$

т.е.

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} U_{1ном}} = \frac{63000}{1,73\,000\,10^*} = 3,64\,A.$$

Номинальный ток вторичной обмотки при условии  $S_{2ном} \approx S_{1ном}$

$$I_{2ном} = \frac{S}{\sqrt{3} U_{2ном}} = \frac{63000}{1,73\,400^*} = 91\,A.$$

КПД при нагрузке  $0,5 P_{ном}$

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos\varphi_2}{\beta S_{ном} \cos\varphi_2 + P_x + \beta^2 P_k} = \frac{0,5\,0,8^* \,63000^*}{0,5\,1280^* \,0,5^2 + 265 + 0,8^* \,63000^*} = 0,99,$$

где  $S_{ном}$  – номинальная мощность;  $P_x$  – потери холостого хода;  $P_k$  – потери короткого замыкания;  $\beta$  – коэффициент нагрузки.

Абсолютное значение напряжения при коротком замыкании

$$U_k = 5,5\% U_{ном} = 0,055 \cdot 550 = 30,25\,B.$$

Активное сопротивление фазы при коротком замыкании

$$R_\phi = P_k / (3 I_{1к}^2) = P_k / (3 I_{1ном}^2) = 1280 / (3 \cdot 3,64^2) = 30,3\,Om.$$

Сопротивление фазы

полное

$$Z_\phi = U_{1\phi} / (3 I_{1\phi}) = 550 / (3 \cdot 3,64) = 50,3\,Om;$$

реактивное

$$X_{\phi} = \sqrt{Z_{\phi}^2 - R_{\phi}^2} = \sqrt{50,3^2 - 32,2^2} = 38,6 \text{ Ом},$$

Для определения процентного падения напряжения воспользуемся формулой

$$U_2 = \beta (U_a \% \cos \varphi_2 + U_p \% \sin \varphi_2).$$

Напряжение короткого замыкания можно выразить через ее составляющие:

$$U_k = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}.$$

Составляющие короткого замыкания:

активная

$$U_a = \frac{P_k}{S_{ном}} 100\% = \frac{1280}{63\ 000} 100\% = 2\%$$

реактивная

$$U_p = \sqrt{U_k^2 - U_a^2} = \sqrt{5,5^2 - 2^2} = 5,12 \%$$

Изменение напряжения на вторичной обмотке при индуктивной нагрузке

$$U_2 = \beta (U_a \% \cos \varphi_2 + U_p \% \sin \varphi) = 1(2,46 = (0,6 * 5,12 + 0,8 * \% , \cos \varphi_2 = 0,8$$

соответствует

$$\sin \varphi_2 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2} = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6.$$

Падению напряжения 4,6% соответствует абсолютное значение

$$\Delta U = \frac{U_2 \% U_{2ном}}{100} = \frac{4,6\ 400^*}{100} = 18,4 \text{ В.}$$

Отсюда напряжение на вторичной обмотке при номинальной индуктивной нагрузке

$$U'_2 = U_2 - \Delta U = 400 - 18,4 = 381,6 \text{ В.}$$

Изменение напряжения на вторичной обмотке при емкостной нагрузке

$$U_2 = \beta (U \% \cos \varphi - U_p \% \sin \varphi) = 1(2,1472 = (0,6 * 5,12 - 0,8 * \%$$

Падению напряжения соответствует абсолютное значение

$$\Delta U = \frac{U_2 \% U_{2\text{ном}}}{100} = \frac{-1,472\ 400^*}{100} = -5,888\ \text{В.}$$

Отсюда напряжение на вторичной обмотке при номинальной емкостной нагрузке

$$\Delta U''_2 = U_2 - \Delta U = 400 - (-5,888) = 405,888\ \text{В.}$$

### **Задача 10**

Вторичная обмотка трансформатора тока ТКЛ – 3 рассчитана на включение амперметра с пределом измерения 5 А. Класс точности приборов 0,5. Определить номинальный ток в первичной цепи и в амперметре, погрешности измерения приборов, если коэффициент трансформации  $K_1 = 60$ , а ток первичной цепи  $I_1 = 225\ \text{А}$ .

### **Решение:**

Используя коэффициент трансформации, определим номинальный ток первичной цепи трансформатора тока. В соответствии с ГОСТами на трансформаторы тока данный трансформатор имеет номинальный ток вторичной обмотки  $I_{2\text{ном}} = 5\ \text{А}$ , тогда  $K_1 = I_1 / I_2$ , откуда номинальный ток первичной обмотки  $I_{1\text{ном}} = K_1 I_2 = 60 \cdot 5 = 300\ \text{А}$ .

При токе 300А амперметр должен отклониться на всю шкалу. При токе в первичной обмотке  $I_1 = 225\ \text{А}$  ток амперметра

$$I_A = 5 \frac{I_1}{I_{\text{ном}}} = \frac{5 \times 225}{300} = 3,75\ \text{А}$$

Относительная погрешность измерения тока амперметром

$$\gamma_1 = \gamma_{\text{д}} \frac{I_{\text{ном}}}{I_1} = 0,5 \cdot \frac{5}{3,75} = 0,66\%$$

Абсолютная погрешность измерения

$$\Delta I = \frac{\gamma I_2}{100\%} = \frac{0,5 \times 3,75}{100} = 0,01875\ \text{А}$$

Абсолютная погрешность, создавая трансформатором тока,

$$\Delta I = \frac{\gamma I_2}{100\%} = \frac{0,5 \times 3,75}{100} = 0,01875 \text{ A}$$

Погрешности измерения:  
общая абсолютная

$$\Delta I = I_a + I_m = 0,01875 + 0,01875 = 0,0375 \text{ A.}$$

относительная

$$\gamma = \Delta I / I_{ном} 100\% = 0,0375 / 0,75 = 5 / 100 * \%$$

$$x_p(t) = K_p y(t)$$

## Раздел 2. Асинхронные машины.

### Задача 1.

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

$$E_1 = 4,44 * f * w_1 * \Phi * K_{o1} = 4,44 * 50 * 88 * 1,21 * 10^{-2} * 0,92 = 217,5 \text{ В}$$

ЭДС, индуцируемая в фазе обмотки неподвижного ротора

$$E_2 = 4,44 * f * w_2 * \Phi * K_{o2} = 4,44 * 50 * 12 * 1,21 * 10^{-2} * 0,92 = 30,6 \text{ В}$$

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  $s = 4\%$

$$E_{2s} = E_2 * s = 30,6 * 0,04 = 1,22 \text{ В}$$

Фазное напряжение обмотки статора

$$U_\phi = U_n / \sqrt{3} = 220 \text{ В}$$

Отсюда ЭДС в фазе обмотки статора от подводимого напряжения

$$E_1 = E_1 / U_\phi = (127,5 / 220) * 100 = 98,8\%$$

## Задача 2

Асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором марки АО2-82-6 имеет следующие паспортные данные:

напряжение  $U = 220/380$

номинальная мощность  $P_2 = 40 \text{ кВт}$

частота вращения  $n = 980 \text{ об/мин}$

КПД  $\eta = 91,5\%$

коэффициент мощности  $\cos \varphi = 0,91$

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 фазный, 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»

$$I_\phi=P_1/3*U_\phi*\cos\varphi=43715/3*220*0,91=72,8\text{А}$$

$$I_n = \sqrt{3} * I_\phi = 1,73 * 72,8 = 125,9$$

$$I_n = K_i * I_n = 5 * 125,9 = 629,5 A$$

Найдем значения фазных, линейных и пусковых токов, если обмотки статора включены по схеме «звезда» и подключены к сети с линейным напряжением

$$U = 380 B$$

Значение фазного тока найдем из формулы мощностей для линейных значений токов и напряжений

$$P_1 = \sqrt{3} * U_n * I_n * \cos\varphi$$

При соединении в «звезду»

линейный ток

$$I_\phi = I_n = P_1 / \sqrt{3} * U_n * \cos\varphi = 43715 / 1,73 * 380 * 0,91 = 73 A$$

пусковой ток

$$I_n = K_i * I_n = 5 * 73 = 365 A$$

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

$$0,9^2 * M_{ном} = 0,81 * 389,8 = 314,74 H * M$$

Соответственно пусковой момент

$$M_{n1} = 1,1 * 315,74 = 347,3 H * M$$

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  $U_{\phi} = U_{\text{л}}/\sqrt{3} = 127\text{В}$ , что составляет 57,7% от номинального напряжения, пусковой момент при переключении обмоток составит  $(0,577 * U_{\text{ном}})^2 = 128,8\text{Нм}$ , 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  $P_{\text{ном}} = 75\text{ кВт}$

номинальное напряжение сети  $U_{\text{ном}} = 220/380\text{ В}$

номинальное скольжение  $s_{\text{ном}} = 0,015$

коэффициент мощности при номинальной нагрузке  $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,92$

при холостом ходе  $\cos\varphi_{\text{х}} = 0,2$

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

$$n_{2\text{ном}} = n_1 * (1-s) = 1000 * (1-0,015) = 985 \text{ об/мин}$$

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

$$P_1 = P_{ном} / \eta = 75000 / 0,925 = 81081 \text{ Вт}$$

Номинальный фазный ток в обмотках статора при соединении в «треугольник»

$$I_{фном} = P_1 / 3 * U_{\phi} * \cos\varphi_{ном} = 81081 / 3 * 220 * 0,92 = 133,5 \text{ А}$$

$$I_{лном} = \sqrt{3} * I_{фном} = 1,73 * 133,5 = 231 \text{ А}$$

$$I_n = K_i * I_l = 6 * 231 = 1386 \text{ А}$$

Общие потери двигателя составляют разность между потребляемой и номинальной мощностью

$$\Sigma P = P_1 - P_{ном} = 81081 - 75000 = 6081 \text{ Вт}$$

Ток холостого хода определяем из формулы мощности холостого хода

$$P_x = \sqrt{3} * U_{ном} * I_x * \cos\varphi_x$$

$$I_x = P_x / \sqrt{3} * U_{ном} * \cos\varphi_x = 6081 / 1,73 * 220 * 0,2 = 79,9 \text{ А}$$

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

$$P_c = P_1 - P_{эм} = 81081 - 76125 = 4956 \text{ Вт}$$

Потери энергии в роторе

$$P_p = \Sigma P - P_c = 6081 - 4956 = 1125 \text{ Вт}$$

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 шестиполусный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет следующие паспортные данные:

номинальная мощность  $P_2 = 5,0 \text{ кВт}$

номинальное напряжение  $U = 220/380 \text{ В}$

номинальная частота вращения  $n = 940 \text{ об/мин}$

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  $f = 50 \text{ Гц}$ .

Рассчитать сопротивление регулировочного реостата, включаемого в цепь ротора для снижения частоты вращения вала двигателя до  $750 \text{ /мин}$  при номинальном моменте на валу и соединении обмоток в «звезду».

**Решение:**

Мощность, подводимую к двигателю

$$P_1 = P_{ном2} / \eta_{ном} = 5000 / 0,745 = 6711 \text{ Вт}$$

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

$$P_{\varepsilon 2} = 3 * I_{2ном}^2 * R_2$$

$$P_{\varepsilon 2} = \frac{P_{ном}}{n_{ном}} * \frac{1}{9,55}$$

откуда

$$R_2 = s_{ном} * \frac{M_{ном} * n_1}{9,55 * 3 * I_{2ном}^2} = 0,06 * \frac{50,8 * 1000}{28,65 * 152} = 0,47$$

Сопротивление регулировочного реостата

$$R_{рном} = R_2 * (s / s_{ном} - 1) = 0,47 * (0,25 / 0,06 - 1) = 1,49$$

### Раздел 3. Синхронные машины

#### Задача 1

Определить максимальное значение МДС обмотки возбуждения неявнополюсной машины, с числом обмоточных пазов ротора на полюсе, равном 16. Относительная длина обмотанной части ротора 0,714. Число витков катушки в пазу 20. Ток возбуждения 400 А.

Решение:

Обмотка возбуждения неявнополюсной синхронной машины имеет распределённое исполнение. Максимальное значение МДС имеет на оси обмотанной части полюса ротора.

Исходные данные:

$$q = 16$$

$$p = 0,714$$

$$w_k = 20$$

$$I_f = 400 \text{ А}$$

Значение магнитодвижущей силы обмоток возбуждения определяется из соотношения

$$F_{fm} = I_f * w_f,$$

где  $I_f$  - ток обмотки возбуждения,  
 $w_f$  - число витков на полюс обмотки.

$$w_f = w_k * q/2,$$

где  $q$  - число обмоточных пазов на полюс,  
 $w_k$  - число витков катушки в пазу.

1. Определение числа витков на полюс обмотки возбуждения

$$w_f = w_k * q/2 = 20 * 16/2 = 160$$

2. Определение максимального значения МДС обмотки возбуждения

$$F_{fm} = I_f * w_f = 400 \text{ А} * 160 = 64000 \text{ А}$$

3. Определение первой гармонической составляющей МДС обмотки возбуждения

$$F_{f1m} = 4/\pi * \sin(0,714 * \pi/2) / 0,714 * \pi/2 * 64000 = 65447$$

$$F_{f1m} = 4/\pi * \sin(p * \pi/2) / p * \pi/2 * F_{fm}$$

где  $p = b/\tau$  – относительная длина обмотанной части полюса ротора.  
 $b$  - длина обмотанной части полюсного деления.  
 $\tau$  - длина полюсного деления.

## Задача 2

Определить основную гармоническую МДС обмотки возбуждения неявнополюсной машины при токе возбуждения 150 А, числе витков обмотки возбуждения 160, относительной длине обмоточной части ротора 0,76, расчётный зазор составляет 3,5 см. Чему равна амплитуда основной гармонической индукции в зазоре ?

Исходные данные:

$$I_f = 150 \text{ А}$$

$$w_k = 160$$

$$p = 0,76$$

$$b' = 3,5 \text{ см}$$

Расчётные формулы:

1. Максимальная величина МДС обмотки возбуждения.

$$F_{f\max} = I_f * w_f$$

2. Амплитудное значение основной гармонической индукции в зазоре неявнополюсной машины.

$$B_{bf} = B_b = M_0 * F_f / b' \quad \text{Тл}$$

где  $M_0$  – магнитная постоянная.  
 $b'$  – относительный зазор.

3. Основная гармоническая МДС обмотки возбуждения.

$$F_{f1m} = 4/\pi * \sin(p*\pi/2) / p*\pi/2 * F_{f\max}$$

Решение:

Определение амплитудного значения МДС обмотки возбуждения неявнополюсной машины

$$F_{fm} = I_f * w_f = 160 * 150$$

Определение основной гармонической составляющей МДС обмотки возбуждения

$$F_{f1m} = 4/\pi * \sin(0,76*\pi/2)/ 0,76*\pi/2 * 160*150 = 23779 \text{ A}$$

Величина индукции в зазоре

$$B_{\delta f} = B_{\delta} - (160*150)/(3,5*10^{-2}) * (12,566*10^{-7}) = 0,855$$

$$M_0 = 4\pi * 10^{-7} = 12,566*10^{-7} \text{ Гн/м}$$

### Задача 3

Определить величину индукции на оси полюса и амплитуду основной гармонической поля возбуждения неявнополюсной машины по следующим данным:

$$U_f = 115 \text{ В}$$

$$R_f = 0,8 \text{ Ом}$$

$$w_f = 160$$

$\tau = 154 \text{ см}$  - полюсное деление.

$b = 117 \text{ см}$  - длина обмоточной части полюса.

$\delta = 3,4 \text{ см}$  - воздушный зазор.

Расчётные формулы:

1.Определение тока возбуждения

$$I_f = U_f/R_f$$

2.Определение МДС на оси полюса

$$F_{fmax} = I_f * w_f$$

3.Определение индукции по оси полюса

$$B_{\delta f} = M_0 * F_{fmax}/\delta$$

4.Определение относительной длины обмоточной части ротора

$$p = b/\tau$$

5. Определение основной гармонической составляющей индукции в зазоре

$$B_{\delta f1max} = 4/\pi * \sin(p*\pi/2)/ p*\pi/2 * B_{\delta f1max}$$

Решение:

$$1. I_f = 115\text{В}/0,8\text{Ом} = 143,75 \text{ (А)}$$

$$2. F_{f\max} = I_f * w_f = 143,75 * 160 = 23000$$

$$3. B_{bf\max} = (12,566 * 10^{-7} * 23000) / (3,4 * 10^{-2}) = 0,85$$

$$4. p = 117/154 = 0,759$$

$$5. B_{bf1\max} = 4/3,14 * \sin(0,759 * \pi/2) / (0,759 * 3,14/2) * 0,85 = 0,835 \text{ Тл.}$$

### Задача 5

Определить амплитуду основной гармонической составляющей индукции поля возбуждения неявнополюсного синхронного генератора, если относительная длина полюсного деления  $p = 0,7$ . Радиальная составляющая индукции на оси обмотки возбуждения  $B = 0,9$  Тл. Чему равна основная гармоническая индукции в точке зазора, смещённый относительно основной обмотки на угол  $\pi/3$  ?

$$B_{b1m} = 4/\pi * \sin(p * \pi/2) / p * \pi/2 * B_{b1m} = 4/\pi * \sin(0,7 * \pi/2) / 0,7 * \pi/2 * 0,9 = 0,93 \text{ Тл.}$$

$$B_{b1(j = \pi/3)} = B_{b1m} * \cos \pi/3 = 0,93 * \cos 60 = 0,5 * 0,93 = 0,465 \text{ Тл.}$$

### Задача 7

Максимальное значение МДС обмотки возбуждения на оси полюса неявнополюсной синхронной машины  $F_{fm} = 26000\text{А}$ . Определить полный поток взаимной индукции, поток основной гармоники индукции, коэффициент потока возбуждения и коэффициент формы ЭДС, если известны:

$D_i = 145\text{см}$  – внутренний диаметр

$l_6 = 200\text{см}$  – расчётная длина машины

$b' = 3,5\text{см}$  – расчётный воздушный зазор

$p = 0,76$  – относительная длина обмотанной части ротора

$2p = 2$  – число полюсов машины

При каком значении  $p$  полный поток взаимной индукции равен потоку основной гармоники ?

Решение:

$$F_{fm} = 26000A$$

$$D_i = 145\text{см}$$

$$l_6 = 200\text{см}$$

$$b' = 3,5\text{см}$$

$$p = 0,76$$

$$2p = 2$$

Заданная по условию относительная длина обмотанной части полюса  $p = b/\tau$ .  
 Распределение вдоль расточки статора магнитодвижущей силы, образованной обмоткой при протекании в ней тока возбуждения – ступенчатая кривая. При этом на необмотанной части ротора (большой зуб) МДС обмотки неизменна. Индукция в зазоре  $B_6 = B_6 = M_0 * F_f / b'$ .

Поэтому кривая индукции повторяет по форме кривую МДС. Она также ступенчата с максимальным значением индукции на оси полюса.

$$B_{6\text{max}} = M_0 * F_f / b' = (4\pi * 10^{-7}) * 26000 / (3,5 * 10^{-2}) = 0,933 \text{ Тл.}$$

При разложении ступенчато распределенной индукции в гармонический ряд первую гармоническую индукции можно определить с помощью коэффициента формы возбуждения

$$K_f = B_{b1} / B_{bm}$$

Для рассматриваемой неявнополюсной машины

$$K_f = b \sin(p\pi/2) / (\pi^2 p) = b \sin(0,76 * \pi/2) * (\pi^2 * 0,76) = 0,992$$

Соответственно

$$B_{16m} = B_{6m} * K_f = 0,993 * 0,992 = 0,926 \text{ Тл}$$

Полный поток взаимной индукции

$$\Phi_{fm} = \alpha_6 * \tau * l_6 * B_m$$

$$\alpha_6 = 1 - 0,5p = 1 - 0,5 * 0,76 = 0,62$$

после деления

$$\tau = \pi D_i / 2p = \pi * 1,45 / 2 = 2,28 \text{ м}$$

Тогда

$$\Phi_{fm} = 0,62 * 2,28 * 2 * 0,993 = 2,64 \text{ Вб}$$

Коэффициент потока возбуждения

$$K_{\phi} = \Phi_{fm} / \Phi_{flm} = 2,64 / 2,69 = 0,98$$

Коэффициент формы ЭДС  $K_b$

$$K_b = \pi/2 * \sqrt{2} * K_f = 3,14/2 * 1,41 * 0,98 = 1,133$$

Приравнивая выражение для полного потока и потока первой гармонической, получаем:

$$(1 - 0,5p) * T * I_0 * V_{m0} = (2/\pi) * T * I_0 * V_{m10}$$

$$(1 - 0,5p) * V_{m0} = (2/\pi) * V_{m0} * K_f$$

Откуда

$$P = [1 - (2/\pi)K_f]/2 = 0,736.$$

### Задача 9

Определить расчётный коэффициент полюсного перекрытия и коэффициент формы ЭДС неявнополюсной синхронной машины с учётом насыщения, если магнитное насыщение зазора  $F_0 = 22500A$ , зубцов статора  $F_{Z1} = 3400A$ , а значения коэффициентов  $a_0$  и  $K_b$  без учёта насыщения соответственно равны 0,625 и 1,13.

Решение:

1. Определение коэффициента насыщения зубцового слоя

$$K_Z = (F_0 + F_{Z1}) / F_0 = (22500 + 3400) / 22500 = 1,15$$

2. Определение по кривой

$$\zeta_b = f(K_Z)$$

и кривой

$$\zeta_a = f(K_Z)$$

Значений поправочных коэффициентов насыщения

$$\zeta_B = 0,65$$

$$\zeta_\alpha = 1,15$$

3. Определение коэффициента полюсного перекрытия и коэффициента формы ЭДС с учётом насыщения

$$K_B = K_{B0} * \zeta_B = 1,13 * 0,65 = 0,68$$

$$\alpha_B = \alpha_{B0} * \zeta_\alpha = 0,65 * 1,15 =$$

### Задача 10

В таблице приведена нормальная характеристика холостого хода турбогенератора. Представить характеристику в абсолютных единицах для генератора с номинальным напряжением  $U_{нп} = 10,5\text{кВ}$  и  $I_{фх} = 175\text{А}$ .

Обмотка статора соединена в звезду

$I_{*f}$	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$E_{*f}$	0	0,58	1	1,21	1,33	1,4	1,46

Определение базисных величин

$$U_B = U_\phi$$

$$I_B = I_\phi$$

При соединении обмоток статора в звезду

$$U_\phi = 10,500 / \sqrt{3} = 6062\text{В}$$

$$I_\phi = 175\text{А}$$

Характеристика холостого хода в абсолютных единицах

$I_f$	0	87,5	175	262,5	350	437	525
$E_f$	0	3516	6062	7335	8062	8487	8850

## Раздел 4. Машины постоянного тока

### Задача 1.

Генератор постоянного тока 1 с параллельным возбуждением имеет следующие паспортные данные: номинальная мощность  $P_{\text{ном}} = 5 \text{ кВт}$ ; напряжение  $230 \text{ В}$ , частота вращения  $n_{\text{ном}} = 1450 \text{ об./мин.}$ ; сопротивление цепи якоря  $R_{\text{я}} = 0,635 \text{ Ом}$ , сопротивление обмотки возбуждения  $R_{\text{в}} = 91 \text{ Ом}$ , магнитные и механические потери  $P_{\text{x}} = 0,052$  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

$$\Delta P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 * R_{\text{я}} = 24,262 * 0,635 = 373,7 \text{ Вт}$$

Электрические потери в обмотках возбуждения

$$\Delta P_{\text{в}} = I_{\text{в}}^2 * R_{\text{в}} = 2,522 * 91 = 577,8 \text{ Вт}$$

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	$I_{\text{ном}} = 108 \text{ А};$
КПД	$\eta = 89 \text{ \%}.$

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

$$I_{\text{я}} = I_{\text{ном}} + I_{\text{в}} = 108,7 + 2 = 110,7 \text{ А}$$

### 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

$$P_3 = P_{3я} + P_{3в} = I_я^2 R_я + I_в U_{ном} = 108,7^2 * 0,04 + 2 * 230 = 932 \text{ Вт}$$

1.9. Добавочные потери в соответствии с ГОСТом определяются в количестве 1% от номинальной мощности

$$\Delta P_d = 0,01 * P_{ном} = 0,01 * 25000 = 250 \text{ Вт}$$

1.10. Механические и магнитные потери

$$\Delta P_m + \Delta P_{мх} = \sum \Delta P - (\Delta P_3 + \Delta P_d) = 3090 - (932 + 250) = 2808 \text{ Вт}$$

2. Напряжение при холостом ходе генератора

$$U_{xx} = E - I_в R_я = 234,4 - 2 * 0,04 = 234,32 \text{ В}$$

так как нагрузочный ток представляет собой ток обмотки возбуждения.

### Задача 3.

Двухполюсный генератор постоянного тока с параллельным возбуждением имеет: сопротивление цепи якоря  $R_я = 0,155 \text{ Ом}$ ; одну пару параллельных ветвей;  $N = 500$  активных проводников; магнитный поток  $\Phi = 1,97 * 10^{-2} \text{ Вб}$ ; частоту вращения якоря  $n_{ном} = 1450 \text{ об./мин}$ . При номинальном токе в цепи нагрузки  $I_{ном} = 50 \text{ А}$  и токе возбуждения  $I_в = 1,7 \text{ А}$  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:

$$E = c_e \cdot \Phi \cdot n_{\text{НОМ}} = P \cdot N / (60 \cdot a) \cdot \Phi \cdot n_{\text{НОМ}} = 1 \cdot 500 \cdot 0,0197 \cdot 1450 / (60 \cdot 1) = 238 \text{ В}$$

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

$$U = E - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} = 238 - 51,7 \cdot 0,14 = 230 \text{ В}$$

Электромагнитный тормозной момент

$$M = c_m \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} = P \cdot N / (2 \cdot \pi \cdot a) \cdot I_{\text{я}} = 1 \cdot 500 \cdot 0,0197 \cdot 51,7 / (2 \cdot 3,14 \cdot 1) = 81 \text{ Н*м}$$

Полезная мощность, отдаваемая генератором в цепь

$$P_{2\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}} \cdot I_{\text{НОМ}} = 230 \cdot 50 = 11500 \text{ Вт}$$

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

$$\Delta P_3 = \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{эв}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}} = 48,73^2 * 0,21 + 1,77^2 * 62 = 693 \text{ Вт}$$

7. Добавочные потери составляют 1% от номинальной мощности

$$\Delta P_{\text{д}} = 0,01 P_{\text{ном}} = 0,01 * 4500 = 45 \text{ Вт}$$

8. Механические и магнитные потери

$$\Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{мх}} = \sum \Delta P - (\Delta P_3 + \Delta P_{\text{д}}) = 1055 - (693 + 45) = 317 \text{ Вт}$$

9. Условием максимального КПД является равенство постоянных и переменных потерь

$$I_1^2 * R_{\text{я}} = P_{\text{х}} + I_{\text{в}}^2 * R_{\text{в}}$$

откуда ток в цепи нагрузки при максимальном КПД

$$I_1 = [(P_{\text{х}} + I_{\text{в}}^2 * R_{\text{в}}) / R_{\text{я}}]^{-0,5} = [(317 + 45 + 1,77^2 * 62) / 0,21]^{-0,5} = 51,5 \text{ А}$$

максимальный КПД

$$\eta = 1 - \sum \Delta P / [U * (I_1 + I_{\text{в}})] = 1 - (2 * 317 + 45) / [110 * (51,5 + 1,77)] = 0,884$$

### **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:

$$\Phi = \int_0^l B_{\delta} * L_{\delta} * d_x - \text{магнитный поток на один полюс}$$

$$\Phi = 0,8 * 0,15 * 0,3 = 0,036 - \text{на один полюс}$$

$$\Phi = 0,036 / 2 = 0,018 - \text{на два полюса}$$

### **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  $I_{\pi} = 3 \cdot I_{\text{НОМ}}$

6. пусковой ток при отсутствии пускового реостата.

### Решение:

1. ЭДС обмоток якоря в номинальном режиме

$$1.1. \quad E_{\text{я}} = U_{\text{НОМ}} - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} = 220 - 100 \cdot 0,1 = 210 \text{ В}$$

$$1.2. \quad I_{\text{я}} = I_{\text{НОМ}} - I_{\text{в}} = 102 - 2 = 100 \text{ А}$$

2. Номинальная частота вращения якоря

$$2.1. \quad n_{\text{НОМ}} = E / (c_e \cdot \Phi) = 210 / (10 \cdot 1,4 \cdot 10^{-2}) = 1500 \text{ об./мин.}$$

$$2.2. \quad c_e = P \cdot N / (60 \cdot a) = 2 \cdot 600 / (60 \cdot 2) = 10$$

3. Номинальный вращающий момент

$$3.1. \quad c_m = 9,55 \cdot c_e = 9,55 \cdot 10 = 95,5$$

$$3.2. \quad M_{\text{НОМ}} = c_m \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} = 95,5 \cdot 1,4 \cdot 10^{-2} \cdot 100 = 133,7 \text{ Н*м}$$

4. Номинальная мощность на валу двигателя определяется из соотношения

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \cdot P_{\text{НОМ}} / n_{\text{НОМ}}$$

$$4.1. \quad P_{\text{НОМ}} = M_{\text{НОМ}} \cdot n_{\text{НОМ}} / 9,55 = 133,7 \cdot 1500 / 9,55 = 21000 \text{ Вт}$$

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

$$R_{р} = U_{ном} / (3 * I_{ном}) - R_{я} = 220 / (3 * 100) - 0,1 = 0,63 \text{ Ом}$$

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

$$I_{\Pi} = 2,5 * I_{\text{НОМ}}$$

7. Потери при холостом ходе
8. Ток двигателя при холостом ходе

Решение:

1. Номинальный вращающий момент

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 * P_{\text{НОМ}} / n_{\text{НОМ}} = 9,55 * 1000 / 1500 = 6,36 \text{ Н*м}$$

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)

$$I_K = U_{\text{НОМ}}/R_{\text{я}} = 110/0,88 = 125 \text{ А}$$

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

$$P_3 = P_{\text{эя}} + P_{\text{эв}} = I^2 \cdot R_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 \cdot R_{\text{в}} = 11,34^2 \cdot 0,88 + 0,66^2 \cdot 166 = 185,4 \text{ Вт}$$

10. Потери магнитные и механические

$$P_{\text{м}} + P_{\text{мх}} = \sum \Delta P - P_3 = 315 - 185,4 = 129,4 \text{ Вт}$$

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

$$n_x = n_{\text{ном}} * U_{\text{ном}} / (U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} * R_{\text{я}}) = 3000 * 220 / (220 - 5,6 * 2) = 3160 \text{ об./мин.}$$

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  $\Phi_2 = 0,5 * \Phi_{\text{ном}}$

$$n_{2\text{ном}} = n_{2x} - \Delta n_2 = 6320 - 640 = 5680 \text{ об./мин.}$$

### **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

$$P_1 = U_{\text{ном}} * I_{\text{ном}} = 220 * 5,6 = 1232 \text{ А}$$

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:

$$P_{\text{ном}} = 1,6 \text{ кВт};$$

$$U_{\text{ном}} = 230 \text{ В};$$

$$I_{\text{ном}} = 7 \text{ А};$$

$$n_{\text{ном}} = 2850 \text{ об./мин.}$$

$$\eta = 83,5 \%$$

$$R_{\text{яг}} = 1,55 \text{ Ом}$$

2. Определим общее сопротивление цепи якоря двигателя и генератора (обмотки якоря генератора и двигателя включены последовательно)

$$R_{\text{общ}} = R_{\text{ядв}} + R_{\text{яг}} = 2,0 + 1,55 = 3,55 \text{ Ом}$$

3. ЭДС генератора в номинальном режиме

$$E_{\text{г}} = U_{\text{гном}} + I_{\text{гя}} * R_{\text{яг}} = 230 + 7 * 1,55 = 240,85 \text{ В}$$

4. Напряжение на выходе генератора при номинальной нагрузке двигателя

$$U_{\text{г}} = E - I_{\text{ядв}} * R_{\text{общ}} = 240 - 5,6 * 3,55 = 220,97 \text{ В}$$

Что соответствует номинальному режиму двигателя

5. Определение частоты вращения двигателя

$$c_e * \Phi = E/n_{\text{ном}} = (U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} * R_{\text{ядв}})/n_{\text{ном}} = (220 - 5,6 * 2,0)/3000 = 0,0694 \text{ Вб}$$

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.

$$E_{\text{гmin}} = 1,5 * I_{\text{ядв}} * R_{\text{общ}} = 1,5 * 5,6 * 3,55 = 29,8 \text{ В}$$

Минимальная частота вращения при холостом ходе

$$n_{\text{min}} = E_{\text{min}}/(c_e * \Phi) = 29,8/0,0694 = 429,6 \text{ об./мин.}$$

При номинальном моменте

$$n_{\text{min}} = (E_{\text{гmin}} - I_{\text{ядв}} * R_{\text{общ}})/(c_e * \Phi) = (29,8 - 5,6 * 3,55)/0,0694 = 142,9 \text{ об./мин.}$$

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

$$P_{\text{НОМ}} = P_{\text{ГВЫХ}}/\eta = 1237,4/0,835 = 1481,9 \text{ Вт}$$

8. Для определения мощности двигателя, который приводит во вращение генератор, необходимо учесть возможные перегрузки (~30 %)

$$P_{1Г} = P_2/\eta = U_{\text{НОМ}} * 1,3 * I_{\text{ЯДВ}}/\eta = 220,97 * 1,3 * 5,6/0,835 = 1926,5 \text{ Вт}$$

### **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:

$$\text{Обмотки якоря} \quad R_{\text{я}} = 0,0443 \text{ Ом};$$

$$\text{Обмотки возбуждения} \quad R_{\text{в}} = 0,197 \text{ Ом};$$

$$\text{Пускового реостата} \quad R_{\text{п}} = 1,17 \text{ Ом}.$$

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

$$M_{\text{п}} = c_{\text{м}}*1,22\Phi*2,5*I_{\text{я}} = 3*101,7 = 305 \text{ Н*м}$$

**Задача 12.**

Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением работает при напряжении на зажимах  $U = 110$  В и токе  $I_{\text{ном}} = 24$  А. якорь двигателя вращается с частотой  $n_{\text{ном}} = 1500$  об./мин. и развивает на валу вращающий момент  $M = 14,0$  Н\*м. Общее сопротивление обмоток якоря и возбуждения  $R_{\text{общ}} = 0,35$  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

$$P_1 = U_{\text{ном}} * I_{\text{ном}} = 110 * 24 = 2640 \text{ Вт}$$

Электрические потери в обмотках якоря и возбуждения

$$P_3 = P_1 - P_{эм} = 2460 - 2438 = 201,6 \text{ Вт}$$

или

$$P_3 = I^2 * R_{общ} = 24^2 * 0,35 = 201,6 \text{ Вт}$$

КПД при номинальном режиме

$$\eta = P_{ном} / P_1 = 2200 / 2460 = 0,833$$

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

$$\begin{aligned} n_1 &= n_{ном} * (U_1 - I_я * R_{общ}) / (U_{ном} - I_я * R_{общ}) = \\ &= 1500 * (90 - 24 * 0,35) / (110 - 24 * 0,35) = 1204 \text{ об./мин.} \end{aligned}$$

мощность на валу двигателя

$$P_2 = M_{ном} * n_1 / 9,55 = 14 * 1204 / 9,55 = 1766 \text{ Вт}$$

Потребляемая мощность

$$P_1 = U_1 * I_я = 90 * 24 = 2160 \text{ Вт}$$

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  $U = 220$  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

$$P_1 = U_1 * I_{\text{ном}} = 220 * 13,3 = 2926 \text{ Вт}$$

Номинальная

$$P_{\text{ном}} = P_1 * \eta = 2926 * 0,752 = 2200 \text{ Вт}$$

Вращающий момент на валу двигателя при номинальной нагрузке

$$M = 9,55 * P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 * 2200 / 1000 = 21 \text{ Н*м}$$

## **7. Методические указания по применению современных информационных технологий для преподавания учебной дисциплины.**

1. Презентации, слайды;
2. Схемы, таблицы, рисунки под медиапроектор;
3. Лазерные пленки к проектоскопу;

## **8. Методические указания профессорско-преподавательскому составу по организации межсессионного и экзаменационного контроля знаний студентов (материалы по контролю качества образования)**

В процессе изучения дисциплины предусмотрены следующие виды промежуточного контроля знаний студентов:

- пятиминутный опрос студентов на каждой лекции;
- студенты, не посещающие лекционные и практические занятия, представляют рефераты по пропущенным темам.

К промежуточным формам контроля знаний относятся:

- блиц-опрос на лекциях по пройденному материалу;
- контрольные работы;
- выполнение рефератов с последующей их защитой;
- выступление с докладом.

## 9. Тестовые задания для проверки качества обучения

### Трансформаторы

1. При каком напряжении целесообразно а) передавать; б) потреблять электрическую энергию?

- 1) а) при высоком; б) при низком
- 2) а) при низком; б) при высоком

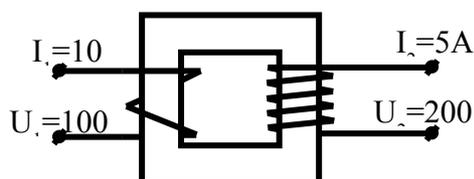
2. Укажите одно из важнейших достоинств цепей переменного тока по сравнению с цепями постоянного тока

- 1) Возможность передавать энергию на дальние расстояния
- 2) Возможность изменять величину напряжения (и тока) в цепи при помощи трансформатора
- 3) Возможность преобразования электрической энергии в тепловую при помощи простых устройств

Определите номинальный ток вторичной обмотки однофазного трансформатора, если  $S_n = 20$  кВА,  $U_{н2} = 400$  В

- 1)  $I_{н2} \approx 30$  А
- 2)  $I_{н2} = 50$  А

3. Какой трансформатор изображен на схеме?



- 1) Повышающий
- 2) Понижающий

4. Определите номинальный ток вторичной обмотки однофазного трансформатора, если  $S_n = 20$  кВА,  $U_{н2} = 400$  В

- 3)  $I_{н2} \approx 30$  А
- 4)  $I_{н2} = 50$  А

**5. Определите номинальный ток первичной обмотки трехфазного трансформатора, если  $S_n = 180$  кВА,  $U_{н1} = 20$  кВ**

- 1)  $I_{н1} \approx 5,2$  А
- 2)  $I_{н1} \approx 9$  А
- 3) Для ответа на вопрос недостаточно данных

**6. Принцип действия трансформатора основан на**

- 1) принципе Лоренца
- 2) законе Ампера
- 3) законе электромагнитной индукции

**7. Укажите строку, в которой указаны э.д.с., индуцируемые в первичной и вторичной обмотках трансформатора с изменяющимся магнитным потоком  $\Phi$**

- 1)  $e_1 = - \frac{d\Phi}{dt}$ ;  $e_2 = - \frac{d\Phi}{dt}$
- 2)  $e_1 = - \omega_1 \frac{d\Phi}{dt}$ ;  $e_2 = - \omega_2 \frac{d\Phi}{dt}$

**8. Чему равно отношение а) э.д.с. первичной и вторичной обмоток в каждый момент времени; б) действующих значений э.д.с.?**

- 1) а)  $\frac{\omega_1}{\omega_2}$ ; б)  $\frac{\omega_1}{\omega_2}$
- 2) а)  $\frac{\omega_1}{\omega_2}$ ; б)  $\frac{\omega_2}{\omega_1}$

**9. Найдите коэффициент трансформации, если при холостом ходе трансформатора вольтметром измерено напряжение на первичной и вторичной обмотках:  $U_1 = 10000$  В;  $U_2 = 400$  В**

- 1)  $k = 25$
- 2) Для ответа на вопрос недостаточно данных

**10. Определите приближенное значение тока  $I_2$  при  $U_1 = 200$  В,  $I_1 = 5$  А,  $U_2 = 100$  В**

- 1) 20 А
- 2) 10 А

**11. Какое из приведенных условий не определяет режим холостого хода трансформатора?**

- 1) Ток нагрузки равен нулю
- 2) Ток в первичной обмотке равен нулю
- 3) К первичной обмотке подведено номинальное напряжение

4) Частота тока в обмотках равна номинальной частоте

**12. Основной поток замыкается в стальном сердечнике трансформатора. Можно ли основной магнитный поток считать пропорциональным току первичной обмотки?**

- 1) Можно
- 2) Нельзя
- 3) Можно, но только на линейном участке кривой намагничивания сердечника

**13. Магнитный поток рассеяния замыкается через воздух. Можно ли считать магнитный поток рассеяния пропорциональным току первичной обмотки?**

- 1) Можно
- 2) Нельзя

**14. Ток холостого хода трансформатора**

- 1) опережает по фазе основной магнитный поток на небольшой угол
- 2) отстает по фазе от основного магнитного потока на небольшой угол

**15. Найдите действующие значения э.д.с. в обмотках, если  $\Phi_m = 0,02$  Вб,  $f = 50$  Гц,  $\omega_1 = 100$ ,  $\omega_2 = 50$ .**

- 1)  $E_1 = 444$  В;  $E_2 = 222$  В.
- 2)  $E_1 = 444$  В;  $E_2 = 0$ .
- 3) Для решения задачи недостаточно данных.

**16. Определите активную составляющую тока холостого хода трансформатора, если в режиме холостого хода он потребляет мощность 5 Вт, а напряжение на его первичной обмотке 500 В**

- 1) 0.01 А
- 2) 0.1 А
- 3) 1 А

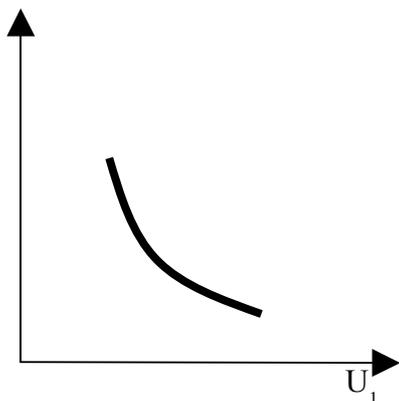
**17. В режиме холостого хода трансформатор мощностью 5 Вт и напряжением на его первичной обмотке 500 В потребляет ток 0.2 А. Найдите намагничивающую составляющую тока холостого хода**

- 1) 0.01 А
- 2) 0.1 А
- 3) 0.2 А

**18. В режиме холостого хода трансформатор потребляет 3.6 Вт, масса стали сердечника трансформатора 3 кг. Определите удельные потери в стали**

- 1) 3.6 Вт/кг
- 2) 1.2 Вт/кг
- 3) Для решения задачи недостаточно данных

**19. Изображена характеристика холостого хода трансформатора. Какая величина отложена по оси ординат?**



- 1)  $I_x$
- 2)  $P_x$
- 3)  $\cos \varphi_x$

**20. Что произойдет, если трансформатор, рассчитанный на 127 В, включат в сеть 220 В?**

- 1) Резко увеличится ток холостого хода
- 2) Резко увеличится ток холостого хода и потери в стали
- 3) Резко увеличится ток холостого хода и потери в стали, уменьшится коэффициент мощности

**21. Чему равны: а) м.д.с. первичной обмотки; б) м.д.с. первичной обмотки при холостом ходе; в) м.д.с. вторичной обмотки?**

- 1) а)  $\omega_1 I_1$ ; б)  $\omega_1 I_1$ ; в)  $\omega_2 I_2$
- 2) а)  $\omega_1 I_1$ ; б)  $\omega_1 I_0$ ; в)  $\omega_2 I_2$
- 3) а)  $\omega_1 I_1$ ; б)  $\omega_1 I_2$ ; в)  $\omega_2 I_2$

**22. Как надо преобразовать формулу результирующей м.д.с., чтобы получить формулу тока холостого хода, выраженного через токи первичной и вторичной обмоток?**

- 1) Разделить на  $\omega_1$
- 2) Разделить на  $\omega_2$
- 3) Разделить на  $k$

**23. Э.д.с. вторичной обмотки 100 В, коэффициент трансформации  $k = 0,5$ . Определите приведенное значение э.д.с. вторичной обмотки**

- 1)  $E_2' = 100$  В
- 2)  $E_2' = 200$  В
- 3)  $E_2' = 50$  В

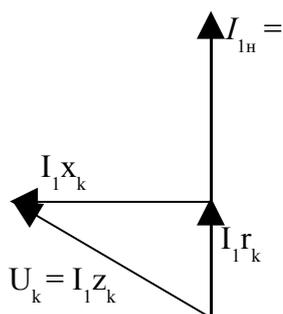
**24. На щитке трансформатора обозначены:  $U_n = 110$  кВ;  $U_k\% = 11\%$ . Какое напряжение надо подать на первичную обмотку, чтобы в режиме короткого замыкания в обмотках трансформатора протекали номинальные токи?**

- 1) 10 кВ
- 2) 12.1 кВ
- 3) Для ответа на вопрос недостаточно данных

**25. Какие приборы необходимы для опыта короткого замыкания однофазного трансформатора?**

- 1) Два амперметра, вольтметр, ваттметр
- 2) Амперметр, два вольтметра, ваттметр
- 3) Амперметр, вольтметр, ваттметр
- 4) Два амперметра, два вольтметра, ваттметр

**26. На рисунке изображена**



- 1) векторная диаграмма трансформатора
- 2) упрощенная векторная диаграмма трансформатора
- 3) упрощенная векторная диаграмма трансформатора в режиме короткого замыкания

**27. При номинальном режиме работы потери в стали сердечника трансформатора составляют 400 Вт. Определите потери в стали при опыте короткого замыкания, если  $U_k\% = 5\%$**

- 1) 1 Вт
- 2) 20 Вт
- 3) 400 Вт

**28. Что показывает ваттметр в опыте короткого замыкания трансформатора?**

- 1) Потери в стали сердечника
- 2) Потери в меди обмоток
- 3) Потери в меди первичной обмотки

**29. В опыте короткого замыкания трансформатора вольтметр показывает 5 В, амперметр – 1 А, ваттметр – 3 Вт. Определите  $z_k$ ,  $r_k$**

- 1)  $z_k = 5 \text{ Ом}; r_k = 3 \text{ Ом}$
- 2)  $z_k = 1 \text{ Ом}; r_k = 3 \text{ Ом}$
- 3)  $z_k = 5 \text{ Ом}; r_k = 1 \text{ Ом}$

**30. В опыте короткого замыкания трансформатора вольтметр показывает 5 В, амперметр – 1 А, ваттметр – 3 Вт. Определите  $x_k$ ,  $\cos \varphi_k$**

- 1)  $x_k = 3 \text{ Ом}; \cos \varphi_k = 0.6$
- 2)  $x_k = 4 \text{ Ом}; \cos \varphi_k = 0.6$
- 3)  $x_k = 4 \text{ Ом}; \cos \varphi_k = 0.8$

**31. В каком случае трансформатор нагревается больше?**

- 1) В опыте холостого хода
- 2) В опыте короткого замыкания
- 3) При номинальной нагрузке
- 4) Во всех перечисленных выше случаях нагрев трансформатора

примерно одинаков

**32. Трансформатор работает при активной нагрузке. Как изменяется напряжение на нагрузке с увеличением тока?**

- 1) Уменьшится
- 2) Не изменится
- 3) Увеличится

**33. Нагрузка трансформатора имеет индуктивный характер. Как изменяется напряжение на нагрузке при увеличении тока?**

- 1) Уменьшится
- 2) Не изменится
- 3) Увеличится

**34. Нагрузка трансформатора имеет емкостной характер. Как изменяется напряжение на нагрузке при увеличении тока?**

- 1) Уменьшится
- 2) Не изменится
- 3) Увеличится

**35. При уменьшении тока от номинального до нуля напряжение трансформатора увеличилось от 380 до 400 В. Определите изменение напряжения трансформатора, если  $\cos \varphi_2 = \text{const}$**

- 1)  $\Delta U = 20 \text{ В}$
- 2)  $\Delta U = - 20 \text{ В}$

**36. При номинальной нагрузке напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора 220 В. Вычислите напряжение при холостом ходе, если  $\Delta U\% = 5\%$**

- 1) 209 В
- 2) 225 В
- 3) 231 В

**37. Можно ли определить изменение вторичного напряжения  $\Delta U$ , если известна упрощенная векторная диаграмма трансформатора в режиме короткого замыкания (треугольник короткого замыкания)?**

- 1) Можно
- 2) Нельзя
- 3) Можно, если известен коэффициент мощности нагрузки

**38. Из треугольника короткого замыкания найдено, что  $U_a = I_1 r_k = 3$  В;  $U_p = I_1 x_k = 6$  В. Кроме того, известно, что  $\cos \varphi_2 = 0,8$ . Найдите изменение вторичного напряжения трансформатора  $\Delta U$**

- 1) 4 В
- 2) 5 В
- 3) 6 В

**39. В опыте короткого замыкания трансформатора ваттметр показал 3 кВт. Номинальная полная мощность трансформатора  $S_n = 100$  кВА. Определите  $U_a\%$**

- 1) 0,3%
- 2) 3%
- 3) 6%

**40. Номинальная полная мощность трансформатора  $S_n = 100$  кВА. Определить в процентах изменение вторичного напряжения трансформатора, если известно, что  $U_k = 5\%$ ,  $\cos \varphi_2 = 0.8$**

- 1)  $\Delta U\% = 4.8\%$
- 2)  $\Delta U\% = 5.0\%$
- 3)  $\Delta U\% = 5.2\%$

**41. Ваттметром измерена мощность на выходе трансформатора:  $P_1 = 1000$  Вт,  $P_2 = 980$  Вт. Определите к.п.д. трансформатора**

- 1) 80%
- 2) 98%

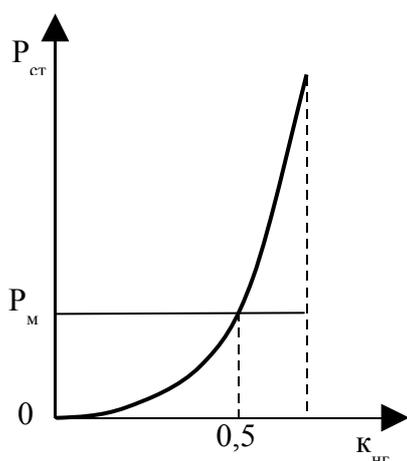
**42. Определите к.п.д. трансформатора, если  $P_2 = 970$  Вт,  $P_m = 15$  Вт,  $P_{ct} = 15$  Вт**

- 1) 97%
- 2) 98%
- 3) Задача неопределенна, так как неизвестна мощность  $P_1$

**43. Как зависят от коэффициента нагрузки трансформатора а) потери в меди, б) потери в стали?**

- 1) Пропорциональны квадрату  $k_{нг}$
- 2) а) пропорциональны квадрату  $k_{нг}$  б) не зависят от  $k_{нг}$
- 3) Не зависят от  $k_{нг}$

**44. При каком значении  $k_{нг}$  к.п.д. трансформатора будет максимальным?**



- 1) 0
- 2) 0,5
- 3) 1

**45. Чему равен к.п.д. трансформатора при холостом ходе?**

- 1) 0
- 2) 0.5
- 3) Нескольким процентам

**46. В сердечниках из а) холоднокатаной и б) горячекатаной стали создана магнитная индукция 1.6Т. Размеры сердечников и числа витков обмоток одинаковы. В какой обмотке течет больший ток?**

- 1) В обмотке, намотанной на сердечник а
- 2) В обмотке, намотанной на сердечник б
- 3) В обеих обмотках протекают одинаковые токи
- 4) Для ответа на вопрос недостаточно данных

**47. С какой целью заземляют магнитопровод трансформатора?**

- 1) Чтобы предохранить обмотки трансформатора от короткого замыкания
- 2) Чтобы выровнять потенциалы основных частей трансформатора

**48. Расположите следующие трансформаторы в порядке увеличения их мощности, если а) бак трансформатора имеет гладкую поверхность; б) бак трансформатора имеет ребристую поверхность; в) бак трансформатора имеет трубчатый радиатор**

- 1) а, б, в
- 2) в, б, а
- 3) Для ответа на вопрос недостаточно данных

**49. Можно ли прокладку между баком и крышкой трансформатора изготовить из обычной резины?**

- 1) Можно
- 2) Нельзя

**50. Можно ли расширитель трансформатора полностью залить маслом?**

- 1) Можно
- 2) Нельзя
- 3) Расширитель всегда должен быть свободен от масла

**51. Как определить уровень масла в баке трансформатора?**

- 1) Снять крышку и замерить уровень масла щупом
- 2) При помощи стеклянной трубки

**52. Каким газом заполняют верхнюю часть бака герметизированного трансформатора?**

- 1) Воздухом
- 2) Азотом

**53. Зачем на трансформаторах большой мощности (1000 кВА и более) устанавливается выхлопная труба?**

- 1) Для поддержания в баке атмосферного давления
- 2) Для предохранения бака от разрыва при коротких замыканиях обмоток

**54. Для измерения температуры масла в баке используется ртутный термометр, который**

- 1) непосредственно соприкасается с маслом, залитым в бак
- 2) отделен от масла, залитого в бак металлической гильзой

**55. Мощность понижающего трансформатора 25 кВА. Напряжение обмоток 10/0.4 кВ. Определите напряжение короткого замыкания**

- 1) 18 В
- 2) 450 В
- 3) Для ответа на вопрос недостаточно данных

**56. Определите величину тока холостого хода для понижающего трансформатора мощностью 25 кВА, напряжение обмоток 10/0.4 кВ, если ток холостого хода составляет 3% номинального тока**

- 1) 2.5 А
- 2) 0.075 А

3) Для ответа на вопрос недостаточно данных

**57. Трансформатор включен в трехфазную сеть 380/220 В. Обмотки трансформатора соединены звездой. На какое напряжение должны быть рассчитаны фазы первичной обмотки?**

1) 220 В

2) 380 В

**58. Вторичная обмотка трансформатора соединена треугольником. Трехфазная нагрузка потребляет ток 100 А. На какой ток должны быть рассчитаны фазы вторичной обмотки?**

1) 100 А

2)  $\sqrt{3}$  100 А

3)  $100/\sqrt{3}$  А

**59. Как относятся линейные напряжения при соединении обмоток  $\Delta/\Delta$ , если  $k$  – отношение фазных напряжений**

1)  $k$

2)  $\sqrt{3} k$

3)  $k/\sqrt{3}$

**60. Как относятся линейные напряжения при соединении обмоток  $\Delta/Y$**

1)  $U_{л1}/U_{л2} = \frac{k}{\sqrt{3}}$

2)  $U_{л1}/U_{л2} = k\sqrt{3}$

**61. Трансформатор, схема соединения которого  $\Delta/Y$  и  $k = 1$ , подсоединен к сети с линейным напряжением 220 В. Определите линейное напряжение на выходе трансформатора**

1) 220 В

2) 380 В

3) Задача неопределенна, так как неизвестна группа соединений обмоток

**62. При симметричной активно-индуктивной нагрузке треугольник авс повернут относительно треугольника АВС по часовой стрелке. Как располагаются эти треугольники при чисто активной симметричной нагрузке?**

1) Треугольник авс повернут относительно треугольника АВС по часовой стрелке

2) Стороны треугольника авс и АВС параллельны

3) Треугольник авс повернут относительно треугольника АВС против часовой стрелки

**63. Где устанавливаются ответвления для регулирования выходного напряжения трансформатора?**

- 1) В первичной обмотке
- 2) В обмотке высшего напряжения
- 3) Во вторичной обмотке
- 4) В обмотке низшего напряжения

**64. Как регулируют напряжение повышающего трансформатора?**

- 1) Изменением числа витков первичной обмотки
- 2) Изменением числа витков вторичной обмотки

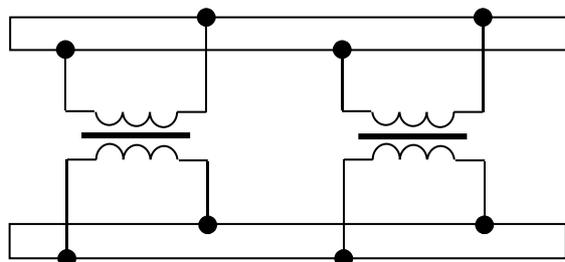
**65. Как регулируют напряжение понижающего трансформатора?**

- 1) Изменением числа витков первичной обмотки
- 2) Изменением числа витков вторичной обмотки

**66. Переключатель повышающего трансформатора перевели из положения "+5%" в положение "-5%". Как изменилось напряжение на выходе трансформатора?**

- 1) Увеличилось на 10%
- 2) Не изменилось
- 3) Уменьшилось на 10%

**67. Можно ли сказать, что трансформаторы включены на параллельную работу ?**



- 1) Можно
- 2) Нельзя

**68. При напряжении на первичных обмотках 220 В на вторичных обмотках трансформатора замерены напряжения холостого хода:  $U_1 = 110$  В;  $U_2 = 500$  В;  $U_3 = 110$  В. Какие трансформаторы нельзя включать на параллельную работу?**

- 1) Первый и третий
- 2) Второй и третий
- 3) Задача неопределенна, так как неизвестны коэффициенты трансформации

**69. Можно ли включать на параллельную работу трансформаторы, напряжения короткого замыкания которых разные?**

- 1) Можно

- 2) Нельзя
- 3) Для ответа на вопрос недостаточно данных

**70. Трансформаторы принадлежат к одной группе соединения обмоток, отношение их номинальных мощностей не превышает 1:3. Можно ли эти трансформаторы включить на параллельную работу?**

- 1) Можно
- 2) Нельзя
- 3) Для ответа на вопрос недостаточно данных

**71. Что произойдет, если включить на параллельную работу несфазированные трансформаторы?**

- 1) На выходных шинах появится удвоенное напряжение
- 2) Через обмотки трансформаторов потечет большой ток даже при отключенной нагрузке

**72. Если пренебречь активным сопротивлением обмоток, то уравнивающий ток отстает по фазе на  $90^\circ$  от э.д.с. вторичной обмотки**

- 1) того трансформатора, э.д.с. которого больше
- 2) того трансформатора, э.д.с. которого меньше

**73. Э.д.с., индуцируемая уравнивающим током во вторичной обмотке трансформатора,**

- 1) отстает по фазе на  $90^\circ$  от уравнивающего тока
- 2) опережает по фазе на  $90^\circ$  уравнивающий ток
- 3) совпадает по фазе с уравнивающим током

**74. Два трансформатора включены на параллельную работу. Э.д.с., индуцируемая уравнивающим током, совпадает по фазе**

- 1) с меньшей из э.д.с. вторичных обмоток
- 2) с большей из э.д.с. вторичных обмоток

**75. Мощности параллельно работающих трансформаторов одинаковы. Э.д.с. вторичной обмотки первого трансформатора больше э.д.с. вторичной обмотки второго трансформатора. Где протекает больший ток?**

- 1) Во вторичной обмотке первого трансформатора
- 2) В обмотках первого трансформатора
- 3) В обмотках второго трансформатора

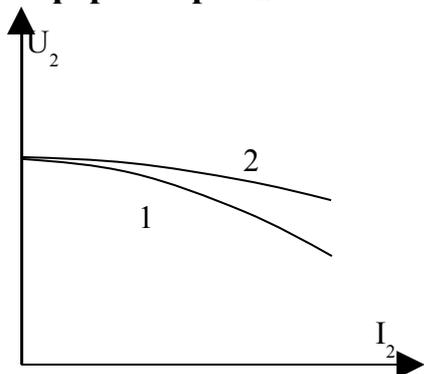
**76. Коэффициент трансформации первого трансформатора  $k_1 = 20.1$ , второго –  $k_2 = 20$ . Можно ли эти трансформаторы включить на параллельную работу, если другие условия выполнены ?**

- 1) Можно
- 2) Нельзя

77. Э.д.с. вторичных обмоток параллельно работающих трансформаторов одинаковы. Сопротивления короткого замыкания трансформаторов известны:  $z_{к1} = 0,5 \text{ Ом}$ ;  $z_{к2} = 0,4 \text{ Ом}$ . Ток первого трансформатора 12 А. Определите ток второго трансформатора

- 1) 12 А
- 2) 15 А

78. Изображены внешние характеристики двух трансформаторов. У какого трансформатора  $z_k$  больше?



- 1) У первого
- 2) У второго
- 3) Для ответа на вопрос недостаточно данных

79. Известны напряжения короткого замыкания трансформаторов:  $U_{к1} = 11 \text{ В}$ ;  $U_{к2} = 10 \text{ В}$ . Можно ли эти трансформаторы включить на параллельную работу, если другие условия выполнены?

- 1) Можно
- 2) Нельзя

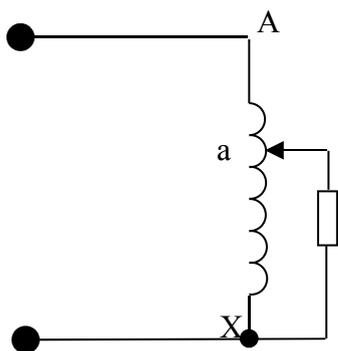
80. Какой ток протекает по той части витков обмотки, к которой подсоединена нагрузка, если  $I_1$  – ток, потребляемый автотрансформатором из сети, а  $I_2$  – ток нагрузки автотрансформатора ?

- 1)  $I_p = I_1 - I_2$
- 2)  $I_p = I_2 - I_1$
- 3)  $I_p = I_2 + I_1$

81. Чему равен ток  $I_p$  при холостом ходе автотрансформатора ?

- 1)  $I_p = 0$
- 2)  $I_p = I_1$
- 3)  $I_p = - I_1$

82. Какую часть обмотки автотрансформатора можно намотать тонким проводом?

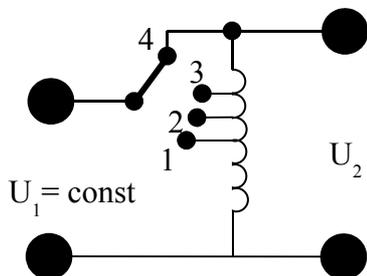


- 1) А – а
- 2) а – х
- 3) Никакую

**83. Почему при равных мощностях потери в стали и меди автотрансформатора меньше, чем потери в трансформаторе?**

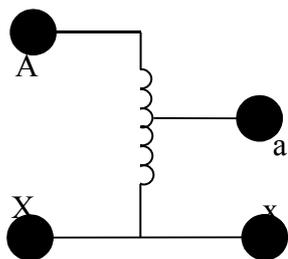
- 1) Потому что размеры магнитопровода меньше
- 2) Потому что часть мощности из первичной цепи во вторичную передается электрическим путем
- 3) Потому что часть обмотки наматывается тонким проводом

**84. Как изменилось напряжение  $U_2$ , если движок переместился из положения 4 в положение 2?**



- 1) Увеличилось
- 2) Уменьшилось

**85. Можно ли этот трансформатор использовать а) для повышения; б) для понижения напряжения?**



- 1) Можно
- 2) а) можно; б) нельзя
- 3) а) нельзя; б) можно

**86. Какой из приведенных недостатков несвойствен автотрансформатору?**

- 1) Невозможность применения в цепях трехфазного тока
- 2) Электрическая связь первичной и вторичной обмоток
- 3) Большой ток короткого замыкания
- 4) Малый коэффициент трансформации

**87. Из-за потерь напряжения в линии напряжение у потребителя значительно ниже номинального. Каким образом можно увеличить напряжение у потребителя?**

- 1) Увеличить число витков первичной обмотки силового трансформатора
- 2) Поставить вольтодобавочный трансформатор
- 3) Увеличить активную составляющую тока нагрузки

**88. Трансформатор с напряжением 380/24 В используется в качестве вольтодобавочного. Какие обмотки этого трансформатора надо включить в линию последовательно с нагрузкой?**

- 1) Обмотки низкого напряжения
- 2) Обмотки высокого напряжения
- 3) Это безразлично

**89. Э. д. с. вольтодобавочного трансформатора складывается с э. д. с. трансформатора. Нагрузка увеличилась. Как надо изменить э. д. с. вольтодобавочного трансформатора, чтобы напряжение на нагрузке не изменилось?**

- 1) Увеличить
- 2) Уменьшить
- 3) Оставить без изменения

**90. Для какой задачи не служат измерительные трансформаторы?**

- 1) Обеспечение безопасности измерений в высоковольтных сетях
- 2) Расширение пределов измерений приборов
- 3) Повышение точности измерительных приборов

### Асинхронные машины

- 1. Магнитное поле вращается против часовой стрелки с угловой скоростью  $\omega$ . Куда направлены а) ток в верхнем проводнике рамки б) сила, действующая на верхний проводник рамки**
  - 1) а от нас б) вправо
  - 2) а) к нам б) влево
  - 3) а) от нас б) влево
  
- 2. Определить скольжение, если скорость вращения поля 3000 об/мин, а скорость вращения ротора 2940 об/мин.**
  - 1) 2%
  - 2) 5%
  
- 3. Три катушки обмотки статора питаются трехфазным током частотой 500 Гц. Скорость вращения ротора 2850 об/мин. Определить скольжение.**
  - 1) 2%
  - 2) 5%
  - 3) 10%
  
- 4. Определить скорость вращения ротора, если  $s=0,05$ ;  $p=1$ ;  $f=50$  Гц.**
  - 1) 2950 об/мин
  - 2) 2900 об /мин
  - 3) 2850 об/мин
  
- 5. Как изменится скольжение, если увеличить момент механической нагрузки на валу двигателя?**
  - 1) Увеличится
  - 2) Не изменится
  - 3) Уменьшится
  
- 6. Как изменится ток в обмотке ротора асинхронного двигателя при уменьшении механической нагрузки на валу?**
  - 1) Увеличится
  - 2) Уменьшится
  - 3) Не изменится
  
- 7. С какой скоростью вращаются векторы векторной диаграммы асинхронного двигателя?**
  - 1) Со скоростью скольжения

- 2) Со скоростью вращения ротора
- 3) Со скоростью вращения магнитного поля статора
- 4) Со скоростью, несколько меньшей скорости вращения магнитного поля статора

**8. Укажите условие, когда асинхронная машина работает как генератор**

- 1) Скорость вращения ротора больше, чем скорость вращения магнитного поля статора
- 2) Скорость вращения поля ротора больше, чем скорость вращения магнитного поля статора
- 3) Скорость вращения поля статора больше, чем скорость ротора
- 4) Магнитное поле статора и ротор вращаются в противоположные стороны

**9. Как практически осуществляется торможение асинхронного двигателя методом противовключения?**

- 1) Меняют полярность напряжения питания
- 2) Резко снижают величину питающего напряжения
- 3) Меняют местами два любых провода из трех, идущих к обмотке статора
- 4) Переключают обмотки двигателя со звезды на треугольник и наоборот

**10. В магнитном поле, пульсирующем с частотой 50 Гц, вращается ротор асинхронного двигателя со скоростью 2850 об/мин.**

**Определить скольжение а) относительно прямого б) относительно обратного поля**

- 1) а) 5% б) 5%
- 2) а) 5% б) 195%
- 3) а) 10% б) 5%

**11. Электромагнитная мощность трехфазного асинхронного двигателя 500 кВт. Полная механическая мощность 460 кВт. Определить скольжение, при котором работает двигатель.**

- 1) 4%
- 2) 8%
- 3) 16%
- 4) Для ответа на вопрос недостаточно данных

**12. Как изменится вращающий момент трехфазного асинхронного двигателя при увеличении скольжения от 0 до 1?**

- 1) Уменьшается
- 2) Увеличивается
- 3) Сначала уменьшается, потом увеличивается
- 4) Сначала увеличивается, потом уменьшается

**13. С каким скольжением работает асинхронный генератор?**

- 1) Со скольжением больше 1
- 2) Со скольжением больше 2
- 3) Со скольжением, равным нулю
- 4) Со скольжением меньше нуля

**14. Каким образом осуществляется ступенчатое изменение скорости вращения трехфазного асинхронного двигателя?**

- 1) Изменением сопротивления цепи обмотки статора
- 2) Изменением частоты приложенного напряжения
- 3) Переключением секций обмотки статора
- 4) Ступенчатое регулирование скорости не проводится

**15. Однофазные коллекторные двигатели серии УЛ называют универсальными потому что?**

- 1) Они используются для привода различных приборов
- 2) Они могут питаться как от сети переменного тока, так и от сети постоянного тока
- 3) Они могут питаться как от сети трехфазного тока, так и от сети однофазного тока
- 4) Их можно включать как в низковольтные, так и высоковольтные сети

**16. Укажите основной недостаток асинхронного двигателя**

- 1) Зависимость скорости вращения от механического момента на валу
- 2) Отсутствие устройства для плавного регулирования скорости
- 3) Низкий КПД

**17. Как изменится индуктивное сопротивление, пусковой и рабочей клеток по мере увеличения скорости вращения ротора асинхронного двигателя?**

- 1) Уменьшится
- 2) Увеличится
- 3) Не изменится
- 4) Распределится примерно одинаково

**18. Определить потребляемую двигателем мощность, если его полезная мощность 400 Вт, а КПД 0,8.**

- 1) 600 Вт
- 2) 500 Вт

**19. Как изменится ток ротора и скорость вращения ротора, если уменьшить напряжение на обмотке статора на 5-10% при неизменном моменте на валу двигателя. Указать неправильный ответ.**

- 1) Ток не изменится
- 2) Ток увеличится
- 3) Скорость не изменится

4) Скорость увеличится

**20. Определите вращающий момент асинхронного двигателя, если мощность составляет 5,8 кВт. а скорость вращения 2900 об/мин.**

- 1) 19,1 Н\*м
- 2)  $19,1 \cdot 10^{-3}$  Н\*м

**21. В каком положении находится пусковой реостат а) в момент пуска б) при работе двигателя**

- 1) а) полностью введен б) выведен, кольца закорочены
- 2) а) полностью выведен б) полностью введен

**22. Определите полную механическую мощность и полезную мощность на валу двигателя, если механические и добавочные потери в сумме составляют 5 Вт;  $U_{1\phi}=100$ ;  $I_{1\phi}=2$ А;  $\cos\phi=0,8$ ;  $r_1=1$  Ом;  $I_{2\phi}=10$  А;  $r_2=0,1$  Ом**

- 1)  $P_{\text{мехп}}=440$  Вт;  $P_2=430$  Вт
- 2)  $P_{\text{мехп}}=430$  Вт;  $P_2=425$  Вт

**23. Можно ли пульсирующее магнитное поле рассматривать как результат наложения двух магнитных полей, вращающихся с одинаковой скоростью в противоположные стороны?**

- 1) Можно
- 2) Нельзя

**24. Определите частоту тока, индуктируемого в роторе а) прямым б) обратным полем для двигателя, ротор которого вращается со скоростью 2850 об/мин в магнитном поле, пульсирующем с частотой 50 Гц**

- 1) а) 2,5 Гц б) 5 Гц
- 2) а) 5 Гц б) 97,5 Гц
- 3) а) 2,5 Гц б) 97,5 Гц

**25. Во сколько раз индуктивное сопротивление обмотки ротора для обратного тока больше, чем для прямого для двигателя, ротор которого вращается со скоростью 2850 об/мин в магнитном поле, пульсирующем с частотой 50**

- 1) в 20 раз
- 2) в 24 раза
- 3) в 39 раз

**26. Чему равен пусковой момент однофазного асинхронного двигателя. не имеющего пусковой обмотки?**

- 1) Половине максимального момента

- 2) От половины до двух третей пускового момента аналогичного трехфазного двигателя
  - 3) Нулю
- 27. Трехфазный асинхронный двигатель подключен к сети промышленной частоты. Скольжение равно 5%. Определить частоту тока в роторе**
- 1) 50 Гц
  - 2) 5 Гц
  - 3) 2,5 Гц
  - 4) 1 Гц
- 28. Активное сопротивление цепи ротора асинхронного двигателя увеличено. Как изменился а) максимальный момент б) пусковой момент**
- 1) а) увеличился б) уменьшился
  - 2) а) увеличился б) не изменился
  - 3) а) не изменился б) увеличился
  - 4) не изменился б) уменьшился
- 29. Каким образом осуществляется плавное регулирование в широких пределах скорости вращения асинхронного двигателя с фазной обмоткой ротора?**
- 1) Изменением числа пар полюсов вращающегося магнитного поля обмотки статора
  - 2) Изменением частоты и напряжения, приложенного к двигателю
  - 3) Изменением сопротивления цепи обмотки ротора
  - 4) Плавное регулирование скорости не производится
- 30. Можно ли в качестве фазорегулятора использовать а) трехфазный б) однофазный асинхронный двигатель?**
- 1) Можно
  - 2) Нельзя
  - 3) а) можно б) нельзя
  - 4) а) нельзя б) можно
- 31. Напряжение сети 380 В. В паспорте асинхронного двигателя указано напряжение 220/380 В. Как должны быть соединены обмотки статора в рабочем положении?**
- 1) Треугольником
  - 2) Звездой
- 32. Момент нагрузки для асинхронного двигателя увеличился. Как изменится вращающий момент, если а) рабочая точка на устойчивой части б) рабочая точка на неустойчивой части кривой  $M=f(s)$ ?**

- 1) а) увеличится б) увеличится
- 2) а) увеличится б) уменьшится
- 3) а) уменьшится б) увеличится

**33. Если ротор асинхронного двигателя с глубоким пазом вращается с номинальной скоростью, то**

- 1) плотность тока в верхней части стержней максимальна
- 2) в нижней части беличьей клетки плотность тока максимальна
- 3) плотность тока в стержнях беличьей клетки одинакова

**34. Какой из перечисленных способов регулирования скорости асинхронных двигателей в настоящее время наиболее экономичен?**

- 1) Изменением частоты тока статора
- 2) Изменением числа пар полюсов
- 3) Изменением напряжения на обмотке статора

**35. Почему сердечник статора и ротор набирают из листов стали, изолированных лаком друг от друга?**

- 1) Для уменьшения потерь на вихревые токи
- 2) Для уменьшения потерь на перемагничивание
- 3) Для уменьшения двух названных выше видов потерь

**36. Чем отличается двигатель с фазной обмоткой от двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора?**

- 1) Наличием контактных колец и щеток
- 2) Наличием пазов для охлаждения
- 3) Количеством катушек обмотки статора

**37. Укажите маркировку асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой и вентилятором, укрепленным на валу снаружи двигателя**

- 1) А
- 2) А2
- 3) АО2

**38. Определите мощность, потребляемую двигателем из сети, если  $U_{1\phi}=100$ ;  $I_{1\phi}=2$ А;  $\cos\phi=0,8$ ;  $r_1=1$  Ом;  $I_{2\phi}=1$ А;  $r_2=0,1$ Ом**

- 1) 600 Вт
- 2) 480 Вт

**39. Вращающий момент асинхронного двигателя увеличился. Как изменились потери на нагрев обмоток ротора?**

- 1) Увеличились
- 2) Уменьшились
- 3) Не изменились

**40. Как изменяются при уменьшении скольжения а) ток в роторе б) угол сдвига по фазе между э.д.с. и током ротора?**

- 1) а) уменьшаются б) уменьшаются
- 2) а) увеличиваются б) увеличиваются
- 3) а) уменьшаются б) увеличиваются

**41. Активное и индуктивное сопротивления неподвижного ротора асинхронного двигателя соответственно равны 1 Ом и 2 Ом. Чему равны эти величины, если двигатель работает со скольжением 5%?**

- 1) 0,05 Ом; 0,1 Ом
- 2) 1 Ом; 0,1 Ом
- 3) 1 Ом; 2 Ом

**42. В неподвижном роторе индуцируется Э.д.с. 20 В. Определите э.д.с. в роторе, когда двигатель работает со скольжением 4%.**

- 1) 0,8 В
- 2) 8 В

**43. Как изменится ток в роторе асинхронного двигателя, если скольжение увеличилось?**

- 1) Увеличился
- 2) Уменьшился
- 3) Не изменился

**44. На сколько процентов уменьшается начальный пусковой и максимальный моменты, ток ротора и критическое скольжение, если напряжение на обмотке статора двигателя уменьшится на 20% по сравнению с номинальным?**

- 1)  $M_{п}$  на 36%
- 2)  $M_{к}$  на 36%
- 3)  $I_{2g}$   $uf$  36%
- 4)  $s_{к}$  не изменится

**45. Какая клетка у двигателя с двойной беличьей клеткой имеет большее индуктивное сопротивление?**

- 1) Пусковая
- 2) Рабочая
- 3) Клетки имеют примерно равные индуктивные сопротивления

**46. Какие из следующих величин не используются при построении рабочих характеристик: скорость вращения, кпд, коэффициент мощности, ток, потребляемый из сети, скольжение?**

- 1) Скорость вращения и скольжение
- 2) Коэффициент мощности и кпд

- 3) Ток, потребляемый из сети
- 4) При построении рабочих характеристик используются все названные величины

**47. Какие величины должны быть постоянными при построении рабочих характеристик двигателя?**

- 1)  $U_1 I_1$
- 2)  $P_2 n_2$
- 3)  $U_1 f_1$
- 4)  $s n_1$

**48. Почему вращающий момент асинхронного двигателя растет относительно быстрее, чем возрастает мощность на валу?**

- 1) Потому что ток, потребляемый из сети, при повышении нагрузки увеличивается
- 2) Потому что скорость ротора при увеличении нагрузки уменьшается

**49. Как изменяются при увеличении нагрузки на валу скольжение и скорость ротора асинхронного двигателя?**

- 1) скорость уменьшается, скольжение увеличивается
- 2) скорость увеличивается, скольжение уменьшается

**50. Почему при значительном увеличении нагрузки на валу двигателя его коэффициент мощности уменьшается?**

- 1) Потому что уменьшаются скольжение и индуктивное сопротивление ротора
- 2) Потому что увеличиваются скольжение и индуктивное сопротивление ротора

**51. Сопротивление одной фазы обмотки ротора асинхронного двигателя 0,5 Ом. Выбрать сопротивление пускового реостата для этого двигателя**

- 1) 0,5 Ом
- 2) 5 Ом
- 3) Для выбора недостаточно данных

**52. При каком скольжении обычно работает асинхронный генератор**

- 1) 0,03-0,05
- 2) 0,3-0,5
- 3)  $-(0,03-0,05)$

**53. Асинхронный генератор с возбуждением от сети**

- 1) Потребляет активную мощность из сети
- 2) Отдает в сеть большую реактивную мощность

**54. За счет каких источников создаются в асинхронном генераторе а) вращающееся магнитное поле б) активная мощность, отдаваемая в сеть**

- 1) а) реактивной мощности сети б) мощности первичного двигателя
- 2) а) активной мощности сети б) реактивной мощности сети
- 3) а) мощности первичного двигателя б) реактивной мощности сети

**55. Укажите основной недостаток асинхронного генератора**

- 1) Непостоянство частоты вырабатываемого напряжения
- 2) Малый коэффициент мощности
- 3) Непостоянство величины вырабатываемого напряжения

**56. При работе однофазного асинхронного двигателя в режиме индукционного регулятора**

- 1) Ротор неподвижен, но магнитное поле ротора вращается с синхронной скоростью
- 2) Ротор неподвижен, магнитное поле пульсирует вдоль оси ротора
- 3) Ротор неподвижен, магнитное поле пульсирует вдоль оси статора

**57. Напряжение на выходе однофазного индукционного регулятора равно**

- 1) Сумме напряжения сети и э.д.с. ротора
- 2) Сумме напряжения сети и э.д.с. статора

**58. Можно ли включить на параллельную работу однофазный индукционный регулятор и однофазный трансформатор?**

- 1) Можно
- 2) Нельзя

**59. Как изменяются а) начальная фаза и б) величина напряжения фазорегулятора в зависимости от угла поворота ротора?**

- 1) а) пропорционально углу поворота ротора б) не изменяется
- 2) а) не изменяется б) пропорционально углу поворота ротора

**60. При работе трехфазного асинхронного двигателя в режиме индукционного регулятора**

- 1) ротор асинхронного двигателя вращается с синхронной скоростью
- 2) ротор неподвижен, но магнитное поле ротора вращается с синхронной скоростью

**61. Напряжение на выходе трехфазного индукционного регулятора равно**

- 1) Сумме напряжения сети и э.д.с. ротора
- 2) Сумме напряжения сети и э.д.с. статора

3) Векторной сумме напряжения сети и э.д.с. статора

**62. Можно ли включить на параллельную работу трехфазный индукционный регулятор и трехфазный трансформатор?**

- 1) Можно
- 2) Нельзя

### Синхронные машины

**1. В обмотках якоря трехфазного синхронного генератора индуктируются токи, частота которых равна 50 Гц. Индуктор генератора имеет два полюса. С какой скоростью вращается магнитное поле якоря?**

- 1) 50 об/мин
- 2) 300 об/мин
- 3) 3000 об/мин

**2. В неподвижных обмотках якоря трехфазного синхронного генератора образуется вращающееся магнитное поле, скорость которого составляет 1500 об/мин. С какой скоростью вращается ротор генератора**

- 1) Задача неопределенная, т.к. неизвестна частота тока в обмотках якоря
- 2) Задача неопределенна, т.к. неизвестно число полюсов ротора
- 3) 1500 об /мин
- 4) 3000 об/ мин

**3. Как изменить направление вращения вращающегося магнитного поля?**

- 1) Изменить порядком следования фаз токов
- 2) Изменить фазы токов во всех катушках на 180 градусов

**4. Изменится ли направление вращения магнитного поля якоря синхронного генератора при изменении вращения индуктора?**

- 1) Изменится
- 2) Не изменится

**5. Две катушки сдвинуты в пространстве на угол 90 градусов, питаются двухфазным током частотой 50 Гц. Определить скорость вращения магнитного поля.**

- 1) Для решения задачи недостаточно данных
- 2) 314 рад /сек
- 3) 314 об /сек

**6. Как направлены по отношению к вектору тока**

**а) э.д.с. рассеяния**

**б) э.д.с. активного сопротивления**

- 1) а) совпадает по фазе  
б) отстает по фазе на 90 градусов
- 2) а) отстает по фазе на 90 градусов  
б) совпадает по фазе

**7. Определить э.д.с. магнитного потока якоря синхронного генератора, если ток нагрузки 10А, а индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря 0,1 Ом**

- 1) 10,1 В
- 2) 1В

**8. Определить э.д.с. магнитного потока якоря синхронного генератора, если ток нагрузки 10А, а индуктивное сопротивление реакции якоря 0,3 Ом**

- 1) 1В
- 2) 2В
- 3) 3В

**9. Определить  $E_{сх}$  при  $E_{рс}=1 В$  и  $E_{я}=3В$**

- 1) Задача неопределенна, т.к. неизвестен ток нагрузки
- 2) Задача неопределенна, т.к. неизвестно взаимное расположение векторов  $E_{я}$  и  $E_{рс}$

**10. Двухполюсный ротор синхронного генератора вращается со скоростью 3000 об мин. Определить частоту тока**

- 1) 50 Гц
- 2) 500Гц

**11. Статором называется**

- 1) неподвижная часть генератора
- 2) та часть генератора, где индуцируется э.д.с.
- 3) часть генератора, где создается магнитный поток возбуждения

**12. Якорем называется**

- 1) неподвижная часть генератора
- 2) ротор генератора
- 3) часть генератора, где создается магнитный поток возбуждения
- 4) та часть генератора, где индуцируется э.д.с

**13. Можно ли трехфазную обмотку синхронного генератора большой мощности расположить на роторе?**

- 1) Можно
- 2) Нельзя
- 3) Можно, но нецелесообразно

**14. Каким образом нельзя питать обмотку ротора синхронного генератора?**

- 1) Постоянным током от специального генератора постоянного тока
- 2) Постоянным током от выпрямителей, включенных на зажимах синхронного генератора
- 3) Переменным током, вырабатываемым в синхронном генераторе

**15. Определить ток  $I_{вн}$ , если при холостом ходе и номинальной скорости вращения напряжения на зажимах генератора равно номинальному, а ток возбуждения равен 0,4 А.**

- 1)  $I_{вн} = 0,4$  А
- 2) Для ответа на вопрос недостаточно данных

**16. Определить ток  $I_{вк}$ , если ток якоря короткозамкнутого генератора равен номинальному току, а ток возбуждения равен 0,5А?**

- 1) Для ответа на вопрос недостаточно данных
- 2) 0,7 А
- 3) 0,8А

**17. Какой из указанных типов генераторов может иметь  $K_{0кз} = 0,7$**

- 1) С явно выраженными полюсами
- 2) С неявно выраженными полюсами
- 3) Любой из этих генераторов

**18. Определить ток возбуждения, если  $I = 0$ ,  $U = U_n$ ,  $n = n_n$ ,  $K_{0кз} = 1,2$ ,  $I_{вк} = 0,5$  А**

- 1) 0,6 А
- 2) 1,2 А
- 3) Для ответа на вопрос недостаточно данных

**19. Якорь трехфазного синхронного четырехполюсного генератора имеет 60 пазов. Определить число пазов, приходящихся на полюс и фазу**

- 1) 5
- 2) 10
- 3) 15
- 4) 20

**20. При активно – емкостной нагрузке магнитное поле полюсов ротора синхронного генератора**

- 1) ослабляется и искажается
- 2) усиливается и искажается
- 3) ослабляется
- 4) усиливается

**21. В какой угловой фазе находится напряжение на индуктивном сопротивлении рассеяния статора синхронной машины по отношению к току якоря?**

- 1) Отстает на 90 градусов
- 2) отстает на угол, близкий к 90 градусов
- 3) Опережает на угол 90 градусов
- 4) Опережает на угол, близкий к 90 градусов

**22. Каково назначение демпфирующей обмотки в синхронном генераторе?**

- 1) Устранить искрение под щетками
- 2) Скомпенсировать реакцию якоря
- 3) Ограничить колебания напряжения на зажимах генератора после изменения нагрузки
- 4) Ограничить колебания ротора около положения равновесия после изменения нагрузки

**23. Длина окружности статора синхронного генератора равна 1 м. Определить полюсное деление, если число пар полюсов равно 2.**

- 1) 15 см
- 2) 25 см
- 3) 50 см
- 4) Для решения задачи недостаточно данных

**24. При уменьшении тока нагрузки от номинального до нуля напряжение синхронного генератора понизилось с 230 В до 207 В. Вычислить процентное изменение напряжения генератора**

- 1) 9%
- 2) 10%
- 3) 11%

**25. Механическая нагрузка на валу генератора увеличилась. Как изменилась скорость двигателя?**

- 1) Значительно увеличилась
- 2) Немного уменьшилась
- 3) Не изменилась
- 4) Увеличилась

**26. Коэффициент мощности увеличивается**

- 1) при увеличении активной составляющей мощности
- 2) при увеличении индуктивной составляющей мощности
- 3) при увеличении емкостной составляющей мощности

**27. Изменится ли э.д.с. генератора, если ток нагрузки генератора не изменился, а коэффициент мощности уменьшился?**

- 1) Изменится
- 2) Не изменится

**28. При увеличении активно-индуктивной нагрузки магнитное поле полюсов ротора синхронного генератора**

- 1) Увеличивается
- 2) Уменьшается
- 3) Увеличивается и искажается
- 4) Уменьшается и искажается

**29. Почему станину генератора отливают в виде сплошной детали, а сердечник набирают из отдельных листов электротехнической стали?**

- 1) Потому что сердечник используется для отвода тепла от обмотки
- 2) Потому что сердечник является магнитопроводом для вращающегося магнитного поля

**30. Какие роторы применяются**

**а) в гидрогенераторах**

**б) в турбогенераторах**

- 1) а) явнополюсные  
б) неявнополюсные
- 2) а) неявнополюсные  
б) явнополюсные

**31. Для обеспечения синусоидальной формы индуцируемой э.д.с зазор между статором и ротором делают**

- 1) Меньшим у середины полюсного наконечника, большим по краям
- 2) Большим у середины полюсного наконечника, меньшим по краям
- 3) Строго одинаковыми по всей окружности ротора

**32. На какой напряжение часто рассчитываются мощные синхронные генераторы?**

- 1) 400 В
- 2) 6300 В

**33. Укажите обозначение горизонтального синхронного генератора с возбуждением от полупроводниковых выпрямителей.**

- 1) СГД
- 2) СГС
- 3) СГТ
- 4) ВГС

**34. Каково назначение синхронного компенсатора?**

- 1) Предназначен для увеличения коэффициента мощности сети
- 2) Предназначен для увеличения КПД энергосистемы

- 3) Предназначен для уменьшения броска тока при пуске синхронных двигателей

**35. Какая машина используется в качестве синхронного компенсатора?**

- 1) Перевозбужденный синхронный генератор
- 2) Перевозбужденный синхронный двигатель
- 3) Недовозбужденный синхронный двигатель

**36. Ток якоря синхронного компенсатора увеличился. Как изменится результирующий магнитный поток машины?**

- 1) Пропорционально увеличился
- 2) Уменьшился
- 3) Практически не изменился

**37. Что надо сделать, чтобы синхронный двигатель потреблял из сети реактивный ток, опережающий по фазе напряжение сети?**

- 1) Обеспечить работу двигателя в режиме холостого хода
- 2) Установить ток возбуждения, превышающий номинальный ток
- 3) Выполнить оба названных выше условия

**38. Какова реактивная мощность синхронного компенсатора, включенного в сеть мощностью 1000 кВт для увеличения коэффициента мощности от 0,7 до 1?**

- 1) 1000 кВар
- 2) 500 кВар

**39. Зависимость тока возбуждения от тока нагрузки будет регулировочной характеристикой генератора, если**

- 1)  $f = \text{const}$
- 2)  $\cos \varphi = \text{const}$
- 3)  $U = \text{const}$
- 4) Выполняются все перечисленные условия

**40. Как изменится ток возбуждения, если при постоянном напряжении на зажимах генератора ток нагрузки увеличился?**

- 1) Увеличился
- 2) Не изменился
- 3) Уменьшился
- 4) Для ответа на вопрос недостаточно данных
- 5)

**41. Почему при увеличении активно-индуктивной нагрузки напряжение на зажимах генератора резко уменьшается?**

- 1) Вследствие падения напряжения на внутреннем сопротивлении якоря статора
- 2) Вследствие увеличения размагничивающего действия реакции якоря
- 3) Вследствие двух причин, указанных выше

**42. Как надо изменять ток возбуждения, чтобы при увеличении емкостной нагрузки напряжение на зажимах генератора не изменялось?**

- 1) Увеличивать
- 2) Уменьшать

**43. Как надо изменять сопротивление в цепи возбуждения, чтобы напряжение генератора не изменялось при увеличении активно – индуктивной нагрузки?**

- 1) Увеличивать
- 2) Уменьшать

**44. В каком случае ток в катушке обмотки якоря максимален, если цепь нагрузки имеет чисто индуктивный характер?**

- 1) Когда стороны катушки находятся над серединами полюсов
- 2) Когда середина катушки находится над северным полюсом
- 3) Когда середина катушки находится над южным полюсом

**45. Магнитный поток реакции якоря при индуктивной нагрузке**

- 1) Уменьшает поле под набегающим краем полюса и настолько же увеличивает под сбегающим
- 2) Увеличивает магнитное поле машины
- 3) Уменьшает магнитное поле машины

**46. При увеличении индуктивной нагрузки напряжение на зажимах синхронного генератора**

- 1) Увеличивается
- 2) Уменьшается
- 3) Не изменится

**47. Магнитный поток реакции якоря при емкостной нагрузке**

- 1) Искажает магнитное поле машины
- 2) Увеличивает магнитное поле машины
- 3) Уменьшает магнитное поле машины

**48. При увеличении емкостной нагрузки напряжение на зажимах синхронного генератора**

- 1) Увеличивается
- 2) Уменьшается
- 3) Не изменится

**49. Какие из указанных потерь не относятся к постоянным?**

- 1) Механические потери
- 2) Потери на гистерезис
- 3) Потери на нагрев обмоток статора

**50. Мощность, потребляемая двигателем, измеряется ваттметром. В каком случае ваттметр покажет постоянные потери в двигателе?**

- 1) Когда двигатель работает в режиме холостого хода
- 2) Когда возбуждение двигателя отключено
- 3) Когда ротор двигателя неподвижен

**51. Фазный ток, потребляемый синхронным двигателем, равен 10 А. Определить тепловые потери в обмотке статора, если активное сопротивление фазы обмотки равно 0,5 Ом?**

- 1) 150 Вт
- 2) 250 Вт

**52. Определить добавочные потери синхронного двигателя мощностью 100 кВт**

- 1) 0,5 кВт
- 2) 5 кВт

**53. Полезная мощность на валу синхронного двигателя 4,5 кВт.**

**Номинальная мощность двигателя 10 кВт. При холостом ходе двигатель потребляет 250 Вт. Потери на нагрев обмотки статора составляют 200 Вт. Определить КПД двигателя.**

- 1) 0,7
- 2) 0,8
- 3) 0,9

**54. Почему фазы обмотки трехфазного синхронного генератора предпочитают собирать звездой?**

- 1) Чтобы увеличить э.д.с. генератора
- 2) Чтобы устранить влияние реакции якоря
- 3) Чтобы устранить влияние третьей гармоники э.д.с.
- 4) Чтобы устранить влияние пятой гармоники э.д.с.

**55. При выполнении каких условий зависимость  $U=f(I)$  будет внешней характеристикой синхронного генератора?**

- 1)  $\omega = \text{const}$
- 2)  $\cos\varphi = \text{const}$
- 3)  $I_b = \text{const}$  Всех перечисленных выше условий

**56. В двухполюсном синхронном генераторе обмотки соседних фаз смещены**

- 1) на 120 пространственных градусов
- 2) на 120 электрических градусов
- 3) на 120 электрических градусов или или что то же самое на 120 пространственных градусов

**57. В четырехполюсном синхронном генераторе обмотки соседних фаз смещены**

- 1) на 60 пространственных градусов
- 2) на 120 электрических градусов
- 3) на 60 пространственных градусов или на 120 электрических градусов

**58. Что надо сделать, чтобы ротор синхронного двигателя втянулся в синхронизм?**

- 1) Увеличить напряжение сети
- 2) Увеличить ток возбуждения
- 3) Раскрутить ротор до скорости, близкой к синхронной
- 4) Можно использовать любой из вышеперечисленных способов

**59. Какой способ пуска синхронных двигателей не применяется?**

- 1) При помощи вспомогательного двигателя
- 2) Асинхронный пуск с ротором, замкнутым на гасящее сопротивление
- 3) Асинхронный пуск с глухоприсоединенным возбудителем
- 4) Многоступенчатый пуск через ограничительные сопротивления в цепи статора

**60. Стрелка амперметра, включенного в цепь обмотки ротора синхронного двигателя, колеблется возле некоторого ненулевого значения. В каком режиме находится двигатель?**

- 1) Скорость близка к синхронной, но возбуждение еще не включено
- 2) Скорость близка к синхронной, возбуждение включено, но двигатель еще не вошел в синхронизм.
- 3) Двигатель вошел в синхронизм

**61. Какой ток потребляет синхронный двигатель при асинхронном пуске, если при номинальной нагрузке на валу он потребляет из сети ток 10А?**

- 1) 7 А
- 2) 50 А

**62. Почему при асинхронном пуске обмотку ротора синхронного двигателя замыкают на сопротивление, а не оставляют разомкнутой?**

- 1) Чтобы уменьшить напряжение на зажимах ротора при пуске
- 2) Чтобы уменьшить ток на зажимах ротора при пуске

**Машины постоянного тока**

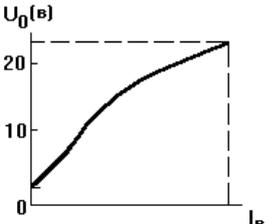
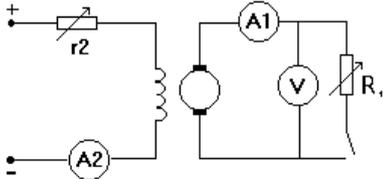
<p>Определить скорость вращения якоря МП, если <math>E=100\text{В}</math>, <math>N=120</math>, <math>\Phi=5\cdot 10^{-2}</math> в·сек., <math>p=2</math>. <math>a=2</math></p>	500 об/мин
	1000 об/мин
	1500 об/мин
	2000 об/мин
<p>Определить магнитный поток двигателя постоянного тока, если <math>2p=4</math>, <math>2a=4</math>, число проводников обмотки якоря <math>N=40</math>, ток якоря <math>I=31,4\text{А}</math> и вращающий момент <math>M=80\text{нм}</math></p>	0,1 в·сек.
	0,2 в·сек.
	0,3 в·сек.
	0,4 в·сек.
<p>В двигателе последовательного возбуждения с насыщенной магнитной системой момент двигателя равен:</p>	$cI_{\text{я}}0,2$
	$cI_{\text{я}}2$
	$cI_{\text{я}}$
	$cI_{\text{я}}3$
<p>Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением имеет номинальные данные <math>U_{\text{н}}=220\text{В}</math>, <math>I_{\text{н}}=91\text{А}</math>, <math>P_{\text{н}}=16\text{кВт}</math>, <math>\omega_{\text{н}}=54\text{сек.}^{-1}</math>. Половина всех потерь мощности в двигателе выделяется в якоре. Определить скорость идеального холостого хода двигателя</p>	$85\text{ сек}^{-1}$
	$75\text{ сек}^{-1}$
	$80\text{ сек}^{-1}$
	$60\text{ сек}^{-1}$

<p>При прочих равных условиях скорость генератора постоянного тока увеличилась в 4 раза. Как изменилась ЭДС машины?</p>	Не изменилась
	Увеличилась в 2 раза
	Увеличилась в 4 раза
	Увеличилась в 16 раз

Мощность генератора 10 кВт. Укажите примерное значение мощности возбуждения.	10 кВт
	5 кВт
	2 кВт
	200 Вт
По обмотке якоря ДПТ протекает ток 10А. ПротивоЭДС – 100В, $r_{я} = 0,1$ Ом. Определите напряжение на зажимах двигателя.	99 В
	100 В
	101 В
	110 В
На щитке ГПТ указана мощность 0,4 кВт. Суммарные потери при номинальной нагрузке составили 0,1 кВт. Найдите КПД генератора.	0,8
	0,75
	0,67
	0,6

При прочих равных условиях скорость генератора постоянного тока увеличилась в 4 раза. Как изменилась ЭДС машины?	Не изменилась
	Увеличилась в 2 раза
	Увеличилась в 4 раза
	Увеличилась в 16 раз
Мощность генератора 10 кВт. Укажите примерное значение мощности возбуждения.	10 кВт
	5 кВт
	2 кВт
	200 Вт

По обмотке якоря ДПТ протекает ток 10А. ПротивоЭДС – 100В, $r_{я} = 0,1$ Ом. Определите напряжение на зажимах двигателя.	99 В
	100 В
	101 В
	110 В
На щитке ГПТ указана мощность 0,4 кВт. Суммарные потери при номинальной нагрузке составили 0,1 кВт. Найдите КПД генератора.	0,8
	0,75
	0,67
	0,6

Скорость вращения генератора с независимым возбуждением увеличилась в 2 раза. <b>Как изменилась ЭДС генератора?</b>	Не изменилась
	Увеличилась в 2 раза
	Увеличилась примерно в 2 раза
<b>Определите ЭДС остаточного магнетизма</b> 	2 В
	Около 20 В
	Данных недостаточно
Какие приборы нужны для снятия внешней характеристики? 	$r_2, A_1, V$
	$R_1, r_2, A_1, A_2, V$
	$R_1, r_2, A_1, V$

При х.х. генератора на его зажимах установлено номинальное значение 115 В. При номинальном токе напряжение 103,5 В. Определите процентное изменение напряжения.	5 %
	10 %
	15 %

Средняя величина индукции $B_{cp}=1\text{Тл}$ , длина якоря $l=0,25\text{ м}$ и полюсное деление $\tau=0,1\text{м}$ . Определить величину магнитного потока	$0,1\text{ в}\cdot\text{сек}^{-1}$
	$0,05\text{ в}\cdot\text{сек}^{-1}$
	$0,025\text{ в}\cdot\text{сек}^{-1}$
	$0,01\text{ в}\cdot\text{сек}^{-1}$
Напряжение сети $U=220\text{В}$ , ЭДС обмотки якоря $218\text{ В}$ , сопротивление якорной цепи $0,1\text{Ом}$ . Ток якоря двигателя:	4380 А
	20 А
	10 А
	8 А
Определить номинальный вращающий момент двигателя постоянного тока с независимым возбуждением мощностью $2,5\text{кВт}$ , напряжением $110\text{В}$ , током якоря $28,3\text{А}$ . Скорость вращения $\omega_n=250\text{сек}^{-1}$	10 Нм
	20 Нм
	30 Нм
	40 Нм
Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением имеет номинальные данные $U_n=220\text{В}$ , $I_n=91\text{А}$ , $P_n=16\text{кВт}$ , $\omega_n=54\text{сек}^{-1}$ . Половина всех потерь мощности в двигателе выделяется в якоре. Скорость якоря двигателя $\omega=24\text{сек}^{-1}$ . Определить КПД двигателя на искусственной механической характеристике при $M_c=M_n$ . Потерями магнитными и механическими пренебречь	0,2
	0,4
	0,6
	0,8

Определить поток возбуждения $\Phi$ , если $E=100\text{В}$ , $p=2$ , $n=1000$ об/мин	$0,1 \text{ в}\cdot\text{сек}^{-1}$
	$0,05 \text{ в}\cdot\text{сек}^{-1}$
	$0,025 \text{ в}\cdot\text{сек}^{-1}$
	$0,01 \text{ в}\cdot\text{сек}^{-1}$
При токе якоря, равном току короткого замыкания, двигатель имеет КПД, равный:	0
	0,25
	0,5
	1
Наибольшим пусковым моментом обладает двигатель с:	параллельным возбуждением
	последовательным возбуждением
	смешанным возбуждением
Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением имеет номинальные данные $U_n=220\text{В}$ , $I_n=91\text{А}$ , $P_n=16\text{кВт}$ , $\omega_n=54\text{сек}^{-1}$ . Половина всех потерь мощности в двигателе выделяется в якоре. При каком сопротивлении якорной цепи двигатель имеет на искусственной механической характеристике скорость $\omega=36 \text{ сек}^{-1}$ при $M_c=M_n$ :	$r_{\text{я}}$
	$2\cdot r_{\text{я}}$
	$3\cdot r_{\text{я}}$
	$4\cdot r_{\text{я}}$

В каком случае машина постоянного тока не применяется?	Двигатели для электрофицированного транспорта
	Возбудители синхронных генераторов
	Системы электроснабжения автомобилей
	Источники питания сварочных трансформаторов

Номинальное напряжение машины постоянного тока серии ПН равно 230 В. Какая это машин?	Генератор
	Двигатель
	Для ответа на вопрос недостаточно данных
Две машины серии П имеют номинальные напряжения 110 и 115 В. Какие это машины?	Двигатели
	Генераторы
	Двигатель и генератор
	Для ответа на вопрос недостаточно данных
С какой целью в электротехническую сталь, применяемую для изготовления электрических машин, добавляют кремний?	Для уменьшения удельной электропроводности
	Для повышения механической прочности

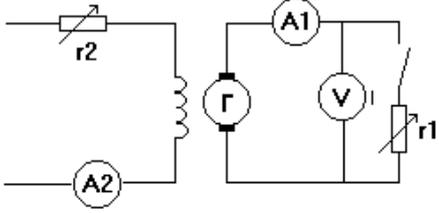
На какие виды потерь делятся постоянные потери?	Магнитные потери, механические потери
	Потери на гистерезис, потери на вихревые токи
Как изменились потери на вихревые токи в стали якоря, если скорость двигателя увеличилась в 2 раза?	Увеличилась в 2 раза
	Увеличилась в 4 раза
Что можно сказать о магнитных потерях, если при прочих равных условиях масса стали якоря первого двигателя на 10% меньше, чем у второго?	Магнитные потери у второго двигателя больше, чем у первого
	Магнитные потери у второго двигателя больше на 10%, чем у первого
	Магнитные потери у второго двигателя меньше, чем у первого

<p>В режиме холостого хода двигатель постоянного тока потребляет 100Вт. Мощность цепи возбуждения 30Вт. Чему равны постоянные потери двигателя?</p>	130 Вт
	Около 100 Вт
	Около 70 Вт

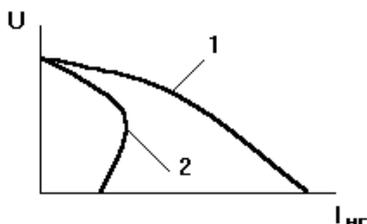
<p>Как изменяется напряжение на зажимах генератора постоянного тока с параллельным возбуждением при уменьшении нагрузки от номинальной до нуля?</p>	Уменьшается
	Не изменяется
	Увеличивается
	Уменьшается до нуля
<p>Номинальное напряжение генератора постоянного тока 230 В. Номинальная мощность - 115 кВт. Определите номинальный ток.</p>	1150 А
	1000 А
	500 А
	250 А
<p>Какой из названных факторов не влияет на величину момента холостого хода двигателя постоянного тока?</p>	Трение в подшипниках
	КПД вентилятора
	Потери на вихревые токи
	Тепловые потери в обмотке якоря
<p>Скорость двигателя увеличилась в 3 раза. Как изменились потери на вихревые токи в стали?</p>	Увеличились в 3 раза
	Увеличились в 9 раз
	Не изменились
	Немного уменьшились

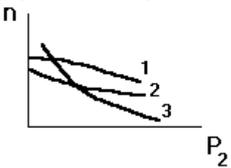
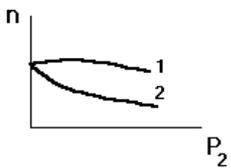
Какая из указанных справа составных частей электрической машины характерна только для машины постоянного тока?	Щеткодержатели со щетками
	Подшипниковые щиты с подшипниками
	Якорь с коллектором
	Сердечники полюсов из литой стали
Сколько параллельных ветвей должна иметь простая волновая обмотка в восьмиполюсной машине	8
	6
	4
	2
Где устанавливаются щетки: а) при отсутствии в машине постоянного тока дополнительных полюсов; б) при наличии дополнительных полюсов?	На геометрической нейтрали
	За физической нейтралью
	а) на геометрической нейтрали; б) за физической нейтралью:
	а) за физической нейтралью; б) на геометрической нейтрали:
Каким законом определяется принцип работы электродвигателя постоянного тока?	Законом Ома
	Законами Кирхгофа
	Законом Ампера
	Законом электромагнитной индукции

<p>Определите процентное изменение напряжения по графику</p>	6 %
	10 %
	15 %

<p>ЭДС генератора <math>E = 240</math> В. Сопrotивление обмотки якоря <math>r_{\text{я}} = 0,1</math> Ом. Определите напряжение на зажимах генератора при токе нагрузки 100</p>	240В
	230 В
	220 В
<p>Какие приборы необходимы для снятия регулировочной характеристики?</p> 	$A_1, A_2, r_1, r_2, V$
	$A_1, A_2, r_1, r_2$
<p>В схеме, изображенной выше, сопротивление реостата <math>r_1</math> уменьшилось. Как изменилось показание вольтметра?</p>	Не изменилось
	Уменьшилось
	Увеличилось
<p>Как должны быть включены обмотки возбуждения компаундного генератора, чтобы их магнитные потоки складывались?</p>	Согласно
	Встречно
<p>Определите напряжение на зажимах генератора, если ЭДС <math>E = 152,2</math> В, ток якоря 50 А, ток в шунтовой обмотке 2 А, сопротивление якоря 0,1 Ом, сопротивление серийной обмотки 0,1 Ом</p>	114,8 В
	115,4 В
	115,2 В

Регулировочная характеристика компаундного генератора показывает, как надо изменять ток в шунтовой обмотке	Чтобы при изменении нагрузки поддерживать постоянным напряжение на зажимах генератора
	Чтобы при изменении нагрузки поддерживать постоянное напряжение на зажимах потребителя
Как надо включить обмотки возбуждения компаундного генератора, чтобы уменьшить влияние тока нагрузки на напряжение генератора?	Согласно
	Встречно

Какое из приведенных условий не является условием самовозбуждения генератора с параллельным возбуждением?	Наличие ЭДС остаточного магнетизма
	Правильная полярность тока в обмотке возбуждения
	Малое сопротивление обмотки возбуждения
	Малое сопротивление обмотки якоря
Укажите внешнюю характеристику генератора параллельного возбуждения 	Кривая 1
	Кривая 2
Какой ток опасен для генератора параллельного возбуждения?	Ток короткого замыкания
	Критический ток
Как зависит от увеличения скорости вращения якоря ток короткого замыкания генератора параллельного возбуждения	Зависимости нет
	Увеличивается
	Уменьшается

<p>Как надо включить обмотки возбуждения компаундного двигателя, чтобы:</p> <p>а) обеспечить постоянство скорости вращения;</p> <p>б) устранить режим “разноса” при сбросе нагрузки?</p>	а) согласно; б) согласно
	а) согласно; б) встречно
	а) встречно; б) согласно
<p>Приведены скоростные характеристики двигателей параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. Укажите характеристику компаундного двигателя</p> 	Кривая 1
	Кривая 2
	Кривая 3
	На графике ее нет
<p>Какая кривая является скоростной характеристикой двигателя смешанного возбуждения а) с согласным, б) со встречным включением обмоток?</p> 	а) кривая 1; б) кривая 2
	а) кривая 2; б) кривая 1
<p>Как изменится скорость двигателя для условий предыдущей задачи при согласном включении обмоток?</p>	Увеличится
	Уменьшится
	Не изменится

<p>Скорость вращения двигателя прямо пропорциональна:</p>	магнитному потоку $\Phi$
	ЭДС обмотки якоря
	току якоря
	статическому моменту

Определить момент двигателя, имеющего $P_2=10$ кВт и $\omega=100\text{сек}^{-1}$ :	25 Нм
	50 Нм
	100 Нм
	10 Нм
При изменении нагрузки на валу двигателя ток в сети изменяется в наименьших пределах у двигателя с:	параллельным
	последовательным
	смешанным возбуждением
Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением имеет номинальные данные $U_n=220\text{В}$ , $I_n=91\text{А}$ , $P_n=16\text{кВт}$ , $\omega_n=54\text{сек}^{-1}$ . Половина всех потерь мощности в двигателе выделяется в якоре. Определить величину добавочного сопротивления в цепи якоря двигателя, при котором он имеет скорость $\omega=24\text{сек}^{-1}$ при $M_c=M_n$ :	$2 \cdot r_{\text{я}}$
	$3 \cdot r_{\text{я}}$
	$4 \cdot r_{\text{я}}$
	$5 \cdot r_{\text{я}}$

Определить ЭДС обмотки якоря, если $\Phi=5 \cdot 10^{-2}$ в·сек., $p=2$ , $n=1000$ об./мин., $a=2$ , $N=120$	100 В
	200 В
	300 В
	400 В
В двигателе последовательного возбуждения с ненасыщенной магнитной системой момент двигателя равен:	$cI_{\text{я}}0,5$
	$cI_{\text{я}}$
	$cI_{\text{я}}1,5$
	$cI_{\text{я}}2$

<p>Определите переменные потери в двигателе параллельного возбуждения, если <math>I_a = 10 \text{ A}</math>, <math>R_a = 0,1 \text{ Ом}</math> при <math>75^\circ \text{C}</math>, <math>I_b = 0,2 \text{ A}</math>, <math>U = 100 \text{ В}</math></p>	20 Вт
	30 Вт
<p>Вычислите переменные потери в двигателе последовательного возбуждения, если <math>I_a = 10 \text{ A}</math>, <math>R_a = 0,1 \text{ Ом}</math>, <math>R_c = 0,1</math> при <math>75^\circ \text{C}</math></p>	10 Вт
	20 Вт
	Для ответа на вопрос недостаточно данных
<p>Определите переменные потери в двигателе смешанного возбуждения, если <math>I_a = 10 \text{ A}</math>, <math>R_a = 0,1 \text{ Ом}</math>, <math>R_c = 0,1</math> при <math>75^\circ \text{C}</math>; <math>I_b = 0,1 \text{ A}</math>, <math>U = 100 \text{ В}</math></p>	10 Вт
	20 Вт
	30 Вт
<p>Определите добавочные потери двигателя постоянного тока мощностью 10 кВт</p>	0,1 кВт
	0,5 кВт

<p>Укажите строку, где в указанном ниже порядке названы потери: механические, магнитные, переменные, в щеточном контакте, добавочные</p>	$P_{\text{мех}}, P_{\text{м}}, P_{\text{ст}}, P_{\text{щ}}, P_{\text{д}}$
	$P_{\text{д}}, P_{\text{ст}}, P_{\text{м}}, P_{\text{щ}}, P_{\text{мех}}$
	$P_{\text{мех}}, P_{\text{ст}}, P_{\text{м}}, P_{\text{щ}}, P_{\text{д}}$

Какую мощность а) потребляет; б) отдает двигатель постоянного тока?	а) электрическую; б) электрическую
	а) механическую; б) электрическую
Определите КПД генератора постоянного тока, на щитке которого указана мощность 0,3 кВт, а суммарные потери при номинальной нагрузке составляют 0,1 кВт	0,67
	0,8
	0,75
Определите КПД двигателя постоянного тока, потребляющего из сети мощность 1 кВт; суммарные потери в этом режиме работы - 150 Вт	0,75
	0,8
	0,85

Сколько параллельных ветвей должна иметь простая волновая обмотка в четырехполюсной машине?	2
	4
	6
	8
Какой способ улучшения коммутации целесообразно использовать в мощных машинах постоянного тока при изменяющейся нагрузке?	Установку щеток на геометрической
	Установку щеток на физической нейтрали
	Установку дополнительных полюсов
	Сдвиг щеток с физической нейтрали

Как надо включить обмотки возбуждения компаундного генератора, чтобы уменьшить влияние тока нагрузки на напряжение генератора?	Параллельно
	Последовательно
	Согласно
	Встречно
Что произойдет, если момент нагрузки на валу двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением уменьшить до нуля?	Перегреется обмотка якоря
	Перегреется обмотка возбуждения
	Двигатель остановится
	Двигатель войдет “вразнос”

**10. Комплекты экзаменационных билетов для каждого из предусмотренных экзаменов по дисциплине и контрольные вопросы к зачету.**

1. Назначение и принципы действия электрических машин .
2. Закон электромагнитной индукции. Закон Ампера.
3. Классификация электрических машин.
4. Преобразование энергий в электрических машинах.
5. Обратимость электрических машин.
6. Техничко – экономические требования к электрическим машинам.
7. Характеристики электрических машин.
8. Понятие об устойчивой работе электрических машин.
9. Номинальные данные электрических машин.
10. Стандартизация основных параметров электрических машин.

11. Нагревание электрических машин.
12. Способы охлаждения электрических машин.
13. Конструктивные формы исполнения электрических машин.
14. Материалы, применяемые в электрических машинах.
15. Качество и надежность электрических машин.
16. Вибрация электрических машин.
17. Шумы в электрических машинах.
18. Серии электрических машин.
19. Назначение и область применения трансформаторов.
20. Принцип действия трансформатора.
21. Конструкция трансформатора.
22. Схемы соединения обмоток трансформатора.
23. Номинальные параметры трансформатора.
24. Режимы работы трансформатора.
25. Процессы в трансформаторе при холостом ходе.
26. Работа трансформатора под нагрузкой.
27. Опыт короткого замыкания.
28. Схема замещения трансформатора.
29. Векторная диаграмма трансформатора.
30. Группы соединения трансформатора.
31. Расчетное определение параметров трансформатора.
32. Внешняя характеристика трансформатора.
33. Коэффициент полезного действия трансформаторов.
34. Регулирование вторичного напряжения трансформаторов.
35. Параллельная работа трансформаторов.
36. Многообмоточные трансформаторы и автотрансформаторы.
37. Назначение и области применения асинхронных машин.
38. Устройство и принцип действия асинхронных машин.
39. Потери и КПД асинхронной машины.
40. Электромагнитный момент асинхронной машины.

41. Конструкция и трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
42. Конструкция трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором.
43. Основные уравнения и электрическая схема замещения асинхронного двигателя.
44. Механическая характеристика трехфазного асинхронного двигателя.
45. Рабочие характеристики трехфазных асинхронных двигателей.
46. Пусковые свойства асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором.
47. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.
48. Асинхронные двигатели в тормозных режимах.
49. Однофазные и конденсаторные асинхронные двигатели.
50. Асинхронные машины нетрадиционной конструкции: индукционный регулятор напряжения и фазорегулятор, асинхронный двигатель с экранированными полюсами, линейный асинхронный двигатель.
51. Автоматическое управление асинхронными двигателями.
52. Назначение и области применения синхронных машин.
53. Способы возбуждения синхронных машин.
54. Типы синхронных машин и их конструктивные особенности.
55. Устройство и принцип действия синхронного генератора.
56. Основные уравнения и характеристики синхронных генераторов.
57. Серии синхронных генераторов.
58. Синхронные двигатели и компенсаторы.
59. Принцип работы и пуск синхронного двигателя.
60. Характеристики синхронных двигателей.
61. Серии синхронных двигателей.
62. Назначение и принцип работы синхронных компенсаторов.
63. Серии синхронных компенсаторов.
64. Синхронные машины нетрадиционной конструкции: индукторные синхронные машины, синхронные генераторы с когтеобразными полюсами,

синхронные машины с постоянными магнитами, синхронные реактивные двигатели, гистерезисные двигатели, реактивные двигатели.

65. Устройство и принцип действия машин постоянного тока.

66. Обмотки якорей машин постоянного тока.

67. Генераторы постоянного тока.

68. Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения.

69. Двигатели постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения.

70. Двигатели постоянного тока смешанного возбуждения.

71. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока.

72. Универсальные коллекторные двигатели.

73. Машины постоянного тока нетрадиционной конструкции: машины постоянного тока с постоянными магнитами, вентильные двигатели постоянного тока.

74. Серии электрических машин постоянного тока общего назначения.

## **11. Карта обеспеченности дисциплины кадрами профессорско-преподавательского состава.**

### **Карта обеспеченности дисциплины кадрами профессорско-преподавательского состава**

Вид учебной нагрузки	ППС
Лекции	Пейзель В.М., старший преподаватель
Практические занятия	Пейзель В.М., старший преподаватель
Лабораторные занятия	Пейзель В.М., старший преподаватель
Зачет	Пейзель В.М., старший преподаватель