

Владимирский государственный университет

Н. П. БАДАЛЯН

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Учебное пособие

Владимир 2026

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Н. П. БАДАЛЯН

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Учебное пособие

Электронное издание



Владимир 2026

ISBN 978-5-9984-2197-6

© ВлГУ, 2026

УДК 621.31
ББК 31.26

Рецензенты:

Доктор технических наук
профессор кафедры электроники, приборостроения и биотехнических систем
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
В. П. Крылов

Кандидат технических наук, доцент
зав. кафедрой электротехники Ковровской государственной технологической
академии имени В. А. Дегтярева
Е. А. Чащин

Издается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Бадалян, Н. П. Электромеханика [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Н. П. Бадалян ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2026. – 177 с. – ISBN 978-5-9984-2197-6. – Электрон. дан. (3,85 Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; диск-вод CD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Рассмотрены электрические машины постоянного и переменного тока, а также трансформаторы. Изложены принципы устройства, режимы работ, эксплуатационные свойства трансформаторов и электрических машин. Для практических занятий подобраны простые задачи преимущественно качественного характера. Приведены примеры решения задач.

Предназначено для студентов вузов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Ил. 114. Табл. 1. Библиогр.: 31 назв.

ISBN 978-5-9984-2197-6

© ВлГУ, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 7 |
| Глава 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ | 10 |
| 1.1. Основные определения и классификация электрических машин ... | 10 |
| 1.2. Принцип действия электрической машины и трансформатора..... | 11 |
| 1.3. Материалы, применяемые для трансформаторов и электрических машин..... | 12 |
| Глава 2. ТРАНСФОРМАТОРЫ..... | 16 |
| 2.1. Общие сведения о трансформаторах | 16 |
| 2.2. Конструкция..... | 17 |
| 2.3. Номинальные величины..... | 19 |
| 2.4. Уравнение для магнитодвижущей силы и намагничивающий ток трансформатора..... | 20 |
| 2.5. Электродвижущая сила обмоток трансформатора..... | 20 |
| 2.6. Индуктивности обмоток..... | 21 |
| 2.7. Уравнения напряжения | 22 |
| 2.8. Холостой ход трансформатора | 24 |
| 2.9. Опыт короткого замыкания..... | 26 |
| 2.10. Работа трансформатора под нагрузкой | 29 |
| 2.11. Изменение напряжения трансформатора..... | 31 |
| 2.12. Энергетические диаграммы..... | 32 |
| 2.13. Коэффициент полезного действия | 33 |
| 2.14. Регулирование напряжения трансформатора..... | 35 |
| 2.15. Схемы и группы соединений обмоток трансформаторов..... | 36 |
| 2.16. Группы соединений обмоток | 36 |
| 2.17. Параллельная работа трансформаторов..... | 39 |
| 2.17.1. Условия включения трансформаторов на параллельную работу | 39 |
| 2.17.2. Параллельная работа трансформаторов при неодинаковых коэффициентах трансформации | 40 |
| 2.17.3. Параллельная работа трансформаторов при неодинаковых группах соединений | 41 |

| | |
|---|----|
| 2.17.4. Параллельная работа трансформаторов с неодинаковыми напряжениями короткого замыкания..... | 42 |
| Глава 3. АВТОТРАНСФОРМАТОР | 45 |
| Глава 4. НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ | 47 |
| 4.1. Метод симметричных составляющих | 47 |
| 4.2. Несимметричная нагрузка трехфазного трансформатора при соединении его обмоток Y/Y_0 | 49 |
| 4.3. Несимметричная нагрузка трехфазного трансформатора при соединении обмоток Δ/Y_0 | 52 |
| 4.4. Несимметричная нагрузка трансформаторов при соединении обмоток Y/Y , Y/Δ , Δ/Y | 53 |
| Глава 5. ТРАНСФОРМАТОРЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ... 54 | |
| 5.1. Трансформаторы напряжения..... | 54 |
| 5.2. Трансформаторы тока..... | 55 |
| 5.3. Сварочные трансформаторы | 57 |
| 5.4. Регулировочные трансформаторы | 58 |
| <i>Контрольные вопросы</i> | 60 |
| Глава 6. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ | 62 |
| 6.1. Общие замечания | 62 |
| 6.2. Устройство и основные элементы конструкции..... | 63 |
| 6.3. Обмотки статора и ротора..... | 64 |
| 6.3.1. Электродвижущая сила витка..... | 64 |
| 6.3.2. Электродвижущие силы катушки, катушечной группы и фазы обмотки | 66 |
| 6.4. Принцип действия асинхронного двигателя и его энергетическая диаграмма..... | 68 |
| 6.5. Режимы работы машин двигателем, тормозом и генератором..... | 70 |
| 6.6. Векторная диаграмма асинхронного двигателя..... | 71 |
| 6.7. Асинхронный генератор и его векторная диаграмма | 72 |
| 6.8. Устойчивость работы машины | 73 |
| 6.9. Схемы замещения..... | 76 |

| | |
|--|---------|
| 6.10. Круговая диаграмма..... | 77 |
| 6.11. Рабочие характеристики двигателей..... | 79 |
| 6.11.1. Определение рабочих характеристик опытным путем | 79 |
| 6.11.2. Определение рабочих характеристик по круговой диаграмме | 80 |
| 6.11.3. Определение рабочих характеристик расчетным путем..... | 82 |
| 6.12. Пуск электрических двигателей | 83 |
| 6.12.1. Общие замечания | 83 |
| 6.12.2. Двигатели с контактными кольцами | 83 |
| 6.12.3. Короткозамкнутые двигатели | 85 |
| 6.12.4. Регулирование частоты вращения | 87 |
| Глава 7. ОДНОФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ..... | 90 |
| 7.1. Общие сведения..... | 90 |
| 7.2. Однофазный двигатель, полученный из трехфазного | 91 |
| 7.3. Переходные процессы в асинхронных машинах..... | 92 |
| 7.4. Коэффициент полезного действия и $\cos\varphi$ асинхронных двигателей..... | 95 |
| 7.5. Современные асинхронные машины..... | 96 |
| <i>Контрольные вопросы</i> | 98 |
| Глава 8. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ | 103 |
| 8.1. Общие сведения..... | 103 |
| 8.2. Холостой ход генератора | 105 |
| 8.3. Трехфазный синхронный генератор. Симметричная нагрузка..... | 106 |
| 8.3.1. Реакция якоря..... | 107 |
| 8.3.2. Активное и индуктивное сопротивления обмотки якоря... .. | 108 |
| 8.3.3. Характеристики и векторные диаграммы..... | 109 |
| 8.3.4. Индукционная нагрузочная характеристика..... | 111 |
| 8.3.5. Регулировочные характеристики | 112 |
| 8.3.6. Внешние характеристики | 113 |
| 8.4. Несимметричная нагрузка трехфазного генератора | 114 |
| 8.5. Параллельная работа генераторов..... | 115 |
| 8.6. Внезапное короткое замыкание синхронной машины | 117 |
| 8.7. Качания синхронной машины..... | 119 |
| 8.8. Потери и коэффициент полезного действия | 120 |
| <i>Контрольные вопросы</i> | 122 |

| | |
|---|-----|
| Глава 9. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА | 124 |
| 9.1. Устройство и основные элементы конструкции..... | 124 |
| 9.2. Получение постоянного тока при помощи коллектора..... | 125 |
| 9.3. Якорные обмотки машин постоянного тока | 127 |
| 9.4. Магнитная цепь и ее расчет | 129 |
| 9.5. Реакция якоря..... | 131 |
| 9.6. Электромагнитный вращающий момент | 133 |
| 9.7. Двигатели..... | 135 |
| 9.7.1. Общие вопросы | 135 |
| 9.7.2. Двигатель с параллельным возбуждением | 137 |
| 9.7.3. Двигатель с последовательным возбуждением | 140 |
| 9.7.4. Двигатель со смешанным возбуждением | 141 |
| <i>Контрольные вопросы</i> | 142 |
| Глава 10. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ... 144 | |
| 10.1. Сельсины..... | 144 |
| 10.2. Поворотные трансформаторы. Индуктосины. Редуктосины | 147 |
| 10.3. Тахогенераторы | 149 |
| 10.4. Шаговые электродвигатели..... | 150 |
| <i>Контрольные вопросы</i> | 151 |
| Контрольные работы | 152 |
| Задачи и тестовые вопросы | 155 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 173 |
| РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... | 174 |

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития нашей цивилизации (да и в будущем) электрическая энергия – основной вид энергии для человеческой деятельности. Электрические силовые и информационные преобразователи в современном машинном производстве определяют уровень развития общества.

Основу электроэнергетики составляют силовые электрические преобразователи (СЭП) (синхронные генераторы, трансформаторы, электродвигатели переменного и постоянного тока), которые изучают в курсах «Электрические машины» и «Электромеханика».

Электротехника – область науки и техники, изучающая электрические и магнитные явления и их использование в практических целях.

Электромеханика – область науки и техники, связанная с использованием электрических, магнитных и механических процессов для целенаправленного преобразования энергии – электрической в механическую или, наоборот, механической в электрическую.

Машину, в которой осуществляется такое преобразование, называют **электромеханическим преобразователем** или **электрической машиной**. В качестве энергоносителя используется магнитное поле.

История электромеханики начинается с 1822 г., когда был создан первый электрический двигатель М. Фарадея. В конце XIX в. М. О. Доливо-Добровольский предложил трехфазную систему переменных токов и асинхронный двигатель. В 20-х гг. XX в. в России был реализован план ГОЭЛРО.

Принято различать электромагнитные поля (ЭМП), используемые в качестве источника электрической энергии (генераторы), и ЭМП, используемые в качестве источника механической энергии (двигатели). Электромагнитные поля с более сложным целевым назначением принято относить к категории специальных электрических машин.

Существуют следующие законы электромеханического преобразования энергии.

1. Закон электромагнитной индукции:

– в формулировке М. Фарадея

$$e_n = Blv.$$

Электродвижущая сила (ЭДС) в проводнике длиной l , движущемся в магнитном поле с индукцией B со скоростью v ;

– в формулировке Д. Максвелла

$$e_k = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Электродвижущая сила в контуре при изменении магнитного потока Φ , сцепляющегося с контуром, состоящим из w витков, определяется скоростью (с обратным знаком) изменения потокосцепления, которое равно $\Psi = w\Phi$, если все трубки потока Φ сцепляются со всеми витками контура.

2. Закон электромагнитного взаимодействия устанавливает закономерность возникновения электромагнитной (или электродинамической) силы, действующей на проводник с электрическим током или на тело из ферромагнитного материала, расположенные в магнитном поле. Известны различные подходы для определения этих сил. Так, если проводник длиной l с электрическим током i расположен в однородном магнитном поле с индукцией B , то действующую на него электромагнитную силу удобно определять по закону Ампера как

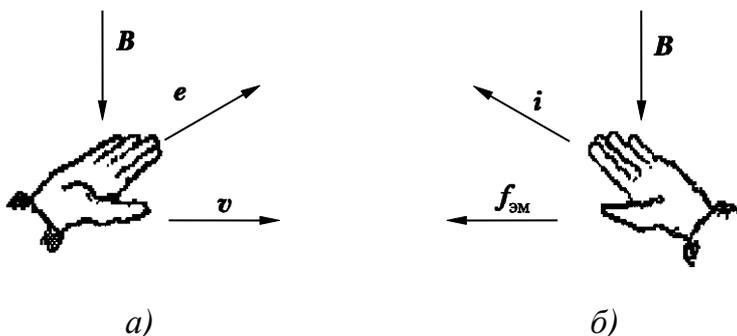
$$f_{\text{эм}} = Bli.$$

Электромагнитная сила, действующая на проводник длиной l с электрическим током i , находящимся в магнитном поле с индукцией B ,

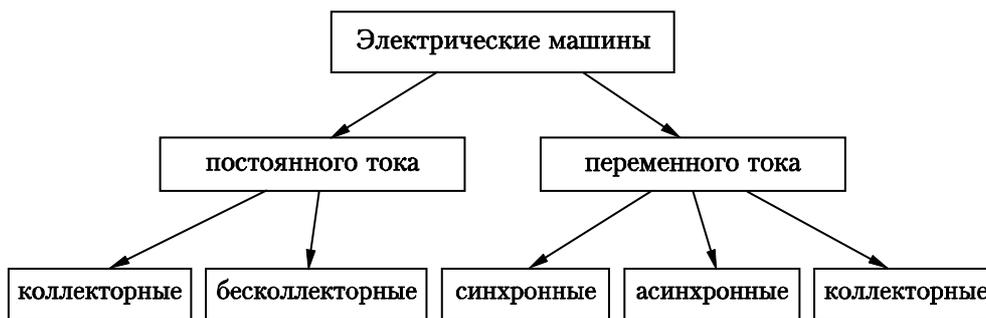
$$f_{\text{эм}} = \frac{B_n H_n}{2} = \frac{B_n^2}{2\mu_0},$$

где B_n и H_n – соответственно магнитные индукция и напряженность на поверхности ферромагнитного тела; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха.

Удельная, на единицу поверхности, электромагнитная сила действует на ферромагнитное тело, находящееся в магнитном поле. Проявляются эти силы в виде сил магнитного притяжения трубок потока.



Правила: а – правой руки; б – левой руки



Классификация электрических машин

Классификация электрических машин

| Признак классификации | Электрические машины | | | | |
|-----------------------|---|----------------------------------|---|--|---|
| Назначение | Двигатели | | Генераторы | Спецмашины | |
| Род тока | Переменного тока | | Постоянного тока | | |
| Напряжение | Высоковольтные свыше 10,5 кВт | | Общепромышленные стандартного напряжения от 6,3 кВт до 220 В | Низковольтные менее 110 В | |
| Мощность | Микрома- шины до 0,5 кВт | Малой мощности 0,5–20,0кВт | Средней мощности 20 – 250 кВт | Большой мощности 250 – 10 000 кВт | Предель- ной мощности свыше 10 МВт ЭМПТ и 1000 ЭМ- ПрТ |
| Частота вращения | Высокоскоростные 3000 – 100 000 об/мин | | Среднескоростные 500 – 3000 об/мин | Низкоскоростные 500 об/мин – 1 об/год | |

Глава 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

1.1. Основные определения и классификация электрических машин

Электрические машины – основные элементы электрических установок. Их используют в качестве источников (генераторов) электрической энергии; в качестве двигателей, чтобы приводить в движение самые разнообразные рабочие механизмы на заводах и фабриках; в сельском хозяйстве, на строительных работах и т. д.

Электрические машины, предназначенные для преобразования механической энергии в электрическую, называют **генераторами**; электрические машины, предназначенные для обратного преобразования электрической энергии в механическую, называют **двигателями**.

Электрические машины применяют также для преобразования рода тока (например, переменного тока в постоянный), частоты и числа фаз переменного тока, постоянного тока одного напряжения в постоянный ток другого напряжения. Такие машины называют **электромашинными преобразователями**.

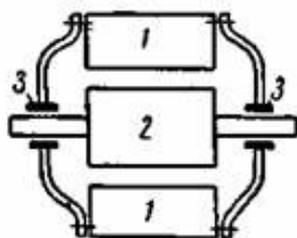


Рис. 1.1. Обычная конструктивная схема электрической машины:
1 – статор;
2 – ротор;
3 – подшипники

Электрическая машина имеет две основные части – вращающуюся, называемую **ротором**, и неподвижную, называемую **статором** (рис. 1.1).

К электрическим машинам относят также трансформатор.

Трансформатор представляет собой статический электромагнитный аппарат, который служит для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения, но той же частоты. Хотя трансформатор и не является машиной (не имеет движущихся частей), его теорию изучают вместе с теорией электрических машин, так как основные соотношения между величинами, характеризующими рабочий процесс трансформатора, применимы и к электрическим машинам.

1.2. Принцип действия электрической машины и трансформатора

Принцип действия электрической машины основан на физических законах электромагнитной индукции и электромагнитных сил. Согласно указанным законам, а также законам Ома, Джоуля – Ленца и магнитной цепи, можно получить основные соотношения между величинами, характеризующими рабочий процесс машины. Обратимся для этого к рис. 1.2. Здесь показаны два полюса электромагнита, создающего магнитное поле. В магнитном поле между полюсами помещен проводник, сечение которого изображено кружком.

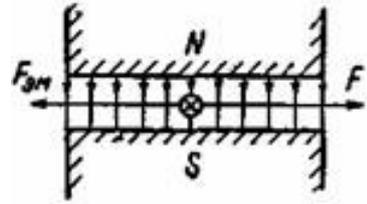


Рис. 1.2. К объяснению принципа действия электрических машин

Если этот проводник передвигать, например слева направо, то в нем согласно закону электромагнитной индукции возникнет ЭДС

$$e = Blv, \quad (1)$$

где B – индукция в месте, где находится проводник; l – активная длина проводника, т. е. та его часть, которая находится в магнитном поле; v – скорость движения проводника относительно поля (если индукция B выражена в $\text{В} \cdot \text{с}/\text{см}^2$, l – см, v – см/с, то получим ЭДС e в вольтах; если B выражена в гауссах, то для получения e в вольтах надо правую часть выражения (1) умножить на 10^{-8}).

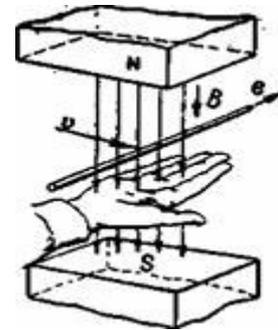


Рис. 1.3. Правило правой руки

Направление наведенной ЭДС определяется по правилу правой руки, причем следует иметь в виду, что это правило дается для определения направления ЭДС в проводнике, перемещающемся относительно магнитного поля (рис. 1.3).

Если концы проводника замкнуты на внешнее сопротивление, то по нему пойдет ток, имеющий такое же направление, как и ЭДС. Это направление (от нас) указано крестиком на рис. 1.2.

В результате взаимодействия тока i в проводнике и поля возникнет электромагнитная сила

$$F_{эм} = Bil, \quad (2)$$

направление которой определяется по правилу левой руки (рис. 1.4) (если B выражена в $\text{В} \cdot \text{с}/\text{см}^2$, i – в амперах, l – в сантиметрах, то получим силу $F_{\text{эм}}$ в $\text{Вт} \cdot \text{с}/\text{см}$ или $\text{Дж}/\text{см}$; для получения $F_{\text{эм}}$ в килограммах надо правую часть выражения (2) умножить на 10,2 и при B в гауссах – еще на 10^{-8}).

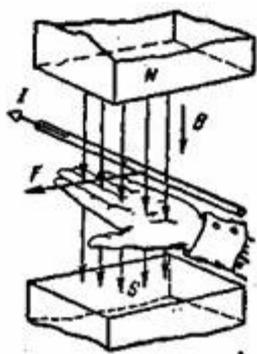


Рис. 1.4. Правило левой руки

1.3. Материалы, применяемые для трансформаторов и электрических машин

Для изготовления трансформаторов и электрических машин применяют конструкционные, активные и изоляционные материалы.

Конструкционные материалы идут на изготовление тех частей и деталей машин и трансформаторов, которые служат главным образом для передачи и восприятия механических воздействий. В электрических машинах в основном применяют те же конструкционные материалы, что и в общем машиностроении: чугун (простой, ковкий), сталь (литую, кованую), цветные металлы и их сплавы, пластмассы.

Активные материалы служат в качестве магнитных и проводниковых (токопроводящих) материалов для создания в трансформаторах или машинах необходимых условий, в которых протекают электромагнитные процессы. Некоторые части электрических машин работают в сложных физических условиях, поэтому к ряду материалов предъявляют требования, относящиеся одновременно как к их механическим, так и к магнитным и электрическим свойствам.

Изоляционные материалы используют для электрической изоляции токопроводящих частей трансформаторов и машин от других их частей и друг от друга.

Выделяют следующие виды активных материалов.

1. **Магнитные материалы.** Для сердечников трансформаторов применяют специальную электротехническую листовую сталь с относительно большим содержанием кремния (до 4–5 %) толщиной обычно 0,5 или 0,35 мм при частоте переменного тока 50 Гц. При более высоких частотах тока, например при 300–400 Гц и выше, выбирают сталь толщиной 0,20 и 0,10 мм. В этом случае значительно снижаются потери от вихревых токов, наведенных переменным магнитным полем, имеющим место в сердечнике трансформатора.

Для изготовления отдельных частей магнитной системы электрических машин применяют различные ферромагнитные материалы: листовую электротехническую сталь различных сортов, чугуны, стальное литье, листовую (конструкционную) сталь, кованую сталь. Те части машины, где имеет место переменное магнитное поле, собирают из изолированных друг от друга листов электротехнической стали с содержанием кремния до 2 – 3 % обычно толщиной 0,5 мм.

Потери мощности в листовой стали от гистерезиса и вихревых токов характеризуются удельными потерями, т. е. потерями в 1 кг стали при частоте 50 Гц и синусоидальном изменении индукции при амплитуде, равной 10 000 Гс. Удельные потери составляют для листовой стали, применяемой для нормальных машин, при толщине 0,5 мм – около 3 Вт/кг; для листовой стали с содержанием кремния до 4 – 5 %, применяемой для трансформаторов, при толщине 0,5 мм – около 1,4 – 1,5 Вт/кг, при толщине 0,35 мм – около 1,3 – 1,2 Вт/кг. Указанную листовую сталь называют *горячекатаной* (по способу изготовления). В последние годы она в ряде случаев вытесняется *холоднокатаной* листовой сталью, имеющей более высокие электромагнитные свойства (большее значение магнитной проницаемости и меньшие удельные потери). Холоднокатаную сталь в настоящее время широко применяют для трансформаторов и крупных электрических машин. Чугуны применяют для частей магнитной системы крайне редко из-за его плохих магнитных свойств.

Стальное литье и кованую сталь, так же как и конструкционную листовую сталь, применяют для тех частей магнитной системы машин, в которых имеет место постоянное магнитное поле.

2. Проводниковые материалы. К ним относится прежде всего медь – сравнительно недорогой материал, имеющий малое удельное сопротивление.

Наряду с медью для проводников применяют также алюминий и иногда некоторые сплавы (латунь, фосфористую бронзу). Для обмоток трансформаторов и электрических машин изготавливают медные и алюминиевые провода круглых и прямоугольных сечений с различными видами изоляции. Для изоляции применяют хлопчатобумажную пряжу, телефонную бумагу, асбест, стеклопряжу, пластмассы, синтетические пленки, специальные эмалевые лаки. Провода с хлопчатобумажной изоляцией широко применяют для нормальных трансформато-

ров и электрических машин. Для машин небольшой и средней мощности (примерно до 300 кВт) на напряжения до 700 В часто выбирают провода с эмалевой изоляцией. Применяемые при этом нагревостойкие эмалевые лаки позволяют получить тонкое и вместе с тем достаточно надежное изоляционное покрытие проводов.

Режим работы электрической машины или трансформатора при условиях, для которых машина или трансформатор предназначены заводом-изготовителем, называют **номинальным режимом работы**. Он характеризуется величинами, указанными на заводском щитке машины или трансформатора и называемыми *номинальными*.

Обычно электрические машины и трансформаторы предназначены для номинального продолжительного режима работы, при котором они могут работать с установившимися превышениями температуры их отдельных частей над температурой воздуха, не превосходящими допускаемых стандартами. Другие номинальные режимы работы – кратковременный и повторно-кратковременный – характерны главным образом для электрических машин, работающих в условиях электрической тяги или обслуживающих подъемные краны, лифты, прессы и т. п.

Любое преобразование энергии сопровождается потерями. В электрических машинах и особенно в трансформаторах потери относительно невелики, но от них зависят размеры машин и трансформаторов, а не только их коэффициент полезного действия (КПД). Эти размеры рассчитывают таким образом, чтобы тепло, образующееся вследствие потерь в стали, в обмотках и на трение, могло быть отдано окружающей среде при некотором превышении температуры нагретых частей над температурой окружающей среды. Превышение температуры не должно быть больше определенных значений, зависящих от нагревостойкости примененных изоляционных материалов.

За температуру окружающей среды (воздуха) условно принимают температуру 35 °С. Допустимые превышения температуры при изоляции класса *A* принимают равными 55 – 70 °С; при изоляции класса *B* – 70 – 95 °С; при изоляции классов *E*, *F* и *H* примерные допустимые значения превышений температуры соответственно равны 70 – 75, 90 – 105 и 115 – 130 °С (указанные пределы допустимых значений превышения температуры зависят от выполнения обмоток и способа измерения температуры).

Допустимые значения температуры, определенные на основании длительного опыта эксплуатации электрических машин и трансформаторов, соответствуют сроку службы изоляционных материалов, составляющему примерно 20 – 25 лет. Он заметно сокращается при увеличении температуры сверх допустимой. При этом наблюдается более быстрое «старение» изоляции, которое проявляется прежде всего в ухудшении ее механических свойств (изоляция становится хрупкой и механически непрочной). Отдача тепла зависит не только от размеров охлаждаемых поверхностей, но и от интенсивности движения омывающего их воздуха (или другой охлаждающей среды). Применение правильно выбранной системы охлаждения (системы вентиляции) способствовало прогрессу электромашино- и трансформаторостроения и обусловило возможность строить машины и трансформаторы на огромные мощности (500 000 кВт и выше в одной единице).

Глава 2. ТРАНСФОРМАТОРЫ

2.1. Общие сведения о трансформаторах

Трансформатор представляет собой статический электромагнитный аппарат с двумя (или более) обмотками, имеющими между собой магнитную связь, осуществляемую переменным магнитным полем, и служит для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения при сохранении частоты тока неизменной. Кроме электрических параметров тока и напряжения в специальных случаях могут изменяться частота, число фаз.

Различают следующие виды трансформаторов.

1. *Силовые трансформаторы*, предназначенные для передачи и распределения электрической энергии, вырабатываемой на электростанциях.

Преобразование электрической энергии в основном производится на следующих напряжениях:

- генераторное напряжение 6, 10, 15, 75, 18, 24 кВ;
- напряжение передающих линий 110, 220, 330, 400, 500, 750 кВ;
- напряжение промышленных распределительных сетей 220, 110, 35, 20, 10, 6 кВ;
- напряжение в пунктах потребления 220, 380, 660 В. Таким образом, электрическая энергия, передаваясь от электрической станции к потребителю, подвергается в трансформаторах многократному преобразованию, в среднем 3 – 5 раз.

Максимальные мощности силовых трансформаторов достигают 1 000 000 кВА с напряжением до 1150 кВ.

2. *Измерительные трансформаторы*, предназначенные для включения в схемы электрических измерений.

3. *Сварочные, электропечные трансформаторы* для обеспечения различных технологических процессов.

4. *Маломощные трансформаторы* систем связи, автоматики и телемеханики.

5. *Трансформаторы для преобразования числа фаз и частоты.*

2.2. Конструкция

Конструктивно трансформатор представляет собой систему двух и более электрически не связанных обмоток, расположенных на стержнях замкнутого ферромагнитного магнитопровода (сердечника) (рис. 2.1).

Между обмотками существует магнитная связь, осуществляемая переменным магнитным полем. Ферромагнитный магнитопровод предназначен для усиления магнитной связи между обмотками.

Обмотку, потребляющую энергию из сети, называют *первичной*, а обмотку, отдающую энергию в сеть, – *вторичной*.

Различают обмотки *высшего напряжения* (ВН) и обмотки *низшего напряжения* (НН). Соответственно выделяют трансформаторы *повышающие* и *понижающие*.

Трансформаторы с двумя обмотками называют *двухобмоточными*. *Многообмоточные трансформаторы* имеют несколько вторичных или первичных обмоток.

В зависимости от числа фаз трансформаторы подразделяют на *однофазные*, *трехфазные* и *многофазные*. **Фазы** – это части электрической цепи обмотки, соединенные друг с другом. Выделяют три типа соединения фаз трехфазных обмоток – *звезда*, *треугольник*, *зигзаг*. По способу расположения на стержнях различают *концентрические* и *чередующиеся обмотки*.

Изоляцию обмоток между собой и от сердечника называют *главной* или *корпусной*. Изоляцию между витками, катушками, слоями обмотки – *продольной*.

Части магнитопровода, замыкающие стержни с обмотками, называют **ярмами**. Для уменьшения потерь энергии от вихревых токов магнитопровод собирают из отдельных, изолированных друг от друга листов электротехнической стали. При частоте $f < 150$ Гц сердечник изготовляют из листов электротехнической стали толщиной 0,35 – 0,50 мм.

Изоляцию листов осуществляют с помощью лаковой пленки, которую наносят с двух сторон листа. При высоких частотах применяют более тонкую листовую сталь. При частоте порядка 100 000 Гц и выше

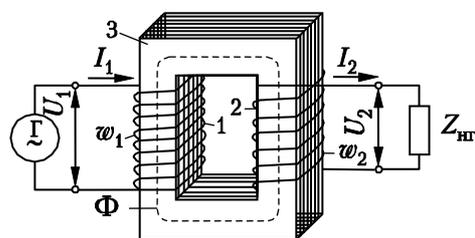


Рис. 2.1. Принцип устройства трансформатора:

Г – генератор переменного тока, $Z_{нг}$ – сопротивление нагрузки

применяют трансформаторы без ферромагнитного сердечника (так называемые воздушные трансформаторы).

Высококачественные трансформаторы весьма малой мощности для радиотехнических, счетно-решающих и других устройств изготавливают с сердечниками из ферритов, которые представляют собой особый вид магнитодиэлектриков с малыми магнитными потерями.

Различают *стержневую* и *броневую* конструкции магнитопровода. В стержневой конструкции ярмо замыкает сердечник по торцам стержней. В броневой конструкции ярмо охватывает стержни с боковых поверхностей, закрывая их броней.

Сердечник трансформатора вместе с элементами крепежа называют **остовом**. Остов помещают в трансформаторный бак, заполненный трансформаторным маслом или диэлектрической жидкостью (совтолом), выполняющими функцию охлаждающих сред.

Конструктивные основные элементы трансформатора:

- расширительный бак, заполняемый при тепловом расширении масла;
- газовое реле, сигнализирующее о выделении пузырьков газа при тепловом разложении твердой изоляции и масла;
- выхлопная труба со стеклянной мембраной, предохраняющей трансформаторный бак от механических деформаций при взрывообразных выделениях газа;
- электрические выводы – изоляторы, внутри которых расположены медные стержни;
- термометры для контроля температуры масла (95 °С);

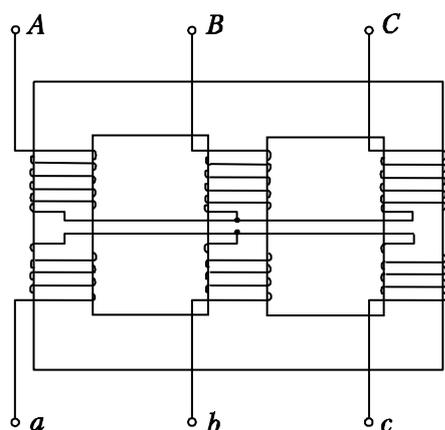


Рис. 2.2. Трехфазный трехстержневой трансформатор

- переключатель для регулирования напряжений;
- пробки, краны для заливки и спуска отбора проб масла.

На рис. 2.2 представлен трехфазный трехстержневой трансформатор.

Трансформаторы – необходимые элементы в системе электропередачи. Передача большой мощности на дальние расстояния практически может быть осуществлена только при относительно небольшом значении тока и, следовательно, при высоком напряжении.

В начале линии электропередачи устанавливают трансформаторы, повышающие напряжение переменного тока, вырабатываемого на электрических станциях. Напряжение в начале линии электропередачи берут тем выше, чем больше длина линии и передаваемая мощность. Оно достигает 220 – 250 кВ при расстоянии 200 – 400 км и при мощности 300 – 200 тыс. кВт. При расстоянии около 1 тыс. км и мощности порядка 1 млн кВт требуется напряжение 400 – 500 кВ.

В конце линии электропередачи устанавливают понижающие напряжение трансформаторы, так как для распределения энергии по заводам, фабрикам и жилым домам необходимы сравнительно низкие напряжения.

Впервые трехфазная линия электропередачи высокого напряжения (15 000 В; из Лауфена на Неккаре до Франкфурта-на-Майне; протяженность около 175 км), положившая начало широким работам по электрификации, была построена в 1891 г. при ближайшем участии русского инженера М. О. Доливо-Добровольского.

2.3. Номинальные величины

Номинальные величины соответствуют основному режиму работы трансформатора. Их указывают в каталогах и на табличке, прикрепленной к трансформатору.

Номинальная мощность трансформатора – полная мощность, равная для однофазного трансформатора

$$S_n = U_{1n} I_{1n},$$

для трехфазного

$$S_n = \sqrt{3} U_{1л, н} I_{1л, н}.$$

Поскольку КПД трансформатора весьма велик, мощности обмоток принимают равными $S_1 = S_2 = S_n$.

Номинальные напряжения трансформатора – линейные напряжения каждой из обмоток при холостом ходе, когда ток нагрузки равен нулю.

Номинальные токи трансформатора – линейные токи, вычисленные по номинальным значениям мощности и напряжения.

Дополнительно на щитке указывают частоту питающего напряжения, схему и группу соединений обмоток, напряжение короткого замыкания, режим работы (продолжительный, кратковременный), полную массу.

2.4. Уравнение для магнитодвижущей силы и намагничивающий ток трансформатора

$$\begin{aligned} \dot{F}_\mu &= \dot{F}_1 + \dot{F}_2; \\ \dot{I}_\mu w_1 &= \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_\mu + \left(-\frac{w_2}{w_1} \dot{I}_2 \right); \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_\mu + \left(-\frac{\dot{I}_2}{k} \right); \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_\mu + (-\dot{I}_2 /), \end{aligned}$$

где $k = w_1/w_2$ – коэффициент трансформации; w_1, w_2 – число витков первичной и вторичной обмоток; F_1, F_2 – магнитодвижущая сила (МДС) первичной и вторичной обмоток; F_μ – результирующая МДС обеих обмоток; I_μ – ток намагничивания сердечника трансформатора; I_1, I_2 – первичный и вторичный ток; I_2' – компенсационная составляющая первичного тока, или приведенный к первичной обмотке вторичный ток.

2.5. Электродвижущая сила обмоток трансформатора

Если приложенное к обмотке напряжение синусоидальное, то магнитный поток Φ можно считать также гармонически изменяющимся во времени

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

$$\omega = 2\pi f \quad ;$$

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = \omega w_1 \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right);$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = \omega w_2 \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right);$$

$$E_{1m} = \omega w_1 \Phi_m;$$

$$E_{2m} = \omega w_2 \Phi_m;$$

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\pi w_1 f \Phi_m = 4,44 w_1 f \Phi_m;$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\pi w_2 f \Phi_m = 4,44 w_2 f \Phi_m;$$

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2};$$

в комплексной форме

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= -j\omega w_1 \dot{\Phi} = -jI_\mu \dot{x}_m; \\ \dot{E}_{\sigma 1} &= -j\omega \dot{\Psi}_{\sigma 1} = -jI_1 \dot{x}_{\sigma 1}; \\ \dot{E}_2 &= -j\omega w_2 \dot{\Phi} = -jI_\mu \frac{\dot{x}_m}{k}; \\ \dot{E}_{\sigma 2} &= -j\omega \dot{\Psi}_{\sigma 2} = -jI_2 \dot{x}_{\sigma 2}, \end{aligned}$$

где Φ , Φ_m – мгновенное и максимальное значения магнитного потока взаимной индукции; ω – угловая частота сети; f – частота сети; e_1 , e_2 , E_{1m} , E_{2m} , E_1 , E_2 – ЭДС от потока взаимной индукции Φ в первичной и вторичной обмотках соответственно, мгновенные значения, амплитудные значения, действующие значения; $x_m = \omega M'$ – индуктивное сопротивление первичной обмотки, соответствующее потокосцеплению поля взаимной индукции; $x_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1}$ – индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки; $x_{\sigma 2} = \omega L_{\sigma 2}$ – индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки.

2.6. Индуктивности обмоток

Потокосцепление с первичной обмоткой, обусловленное потоком взаимной индукции, $w_1 \Phi$.

По определению собственная индуктивность первичной обмотки от потока взаимной индукции в магнитопроводе

$$M' = \frac{w_1 \Phi}{i_\mu}.$$

Из закона полного тока

$$i_\mu w_1 = \frac{\Phi}{\Lambda_\mu}.$$

Тогда

$$M' = w_1^2 \Lambda_\mu,$$

где $\Lambda_\mu = f(i_\mu)$ – магнитная проводимость магнитопровода.

Взаимная индуктивность обмоток

$$M = \frac{M'}{k} = w_1 w_2 \Lambda_\mu.$$

Потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ замыкаются в основном по воздуху и линейно зависят от токов i_1 , i_2 соответственно. Однако отдельные трубки линий магнитных полей рассеяния сцеплены с различным количеством витков обмоток, поэтому определение соответствующих

потокосцеплений $\Psi_{\sigma 1}, \Psi_{\sigma 2}$ требует специальных расчетов. Индуктивности рассеяния

$$L_{\sigma 1} = \frac{\Psi_{\sigma 1}}{i_1};$$

$$L_{\sigma 2} = \frac{\Psi_{\sigma 2}}{i_2};$$

или

$$L_{\sigma 1} = w_1^2 \Lambda_{\sigma 1}$$

$$L_{\sigma 2} = w_2^2 \Lambda_{\sigma 2}$$

где $\Lambda_{\sigma 1}, \Lambda_{\sigma 2}$ – постоянные эквивалентные магнитные проводимости для потоков рассеяния.

2.7. Уравнения напряжения

Математическая модель установившегося режима работы трансформатора (рис. 2.3)

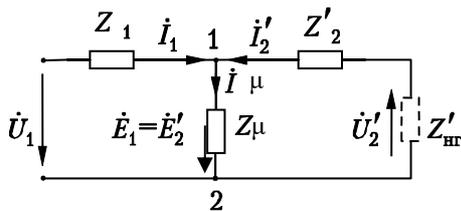


Рис. 2.3. T-образная схема замещения трансформатора

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jx_{\sigma 1} \dot{I}_1 + r_1 \dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

$$-\dot{U}_2 = -\dot{E}_2 + jx_{\sigma 2} \dot{I}_2 + r_2 \dot{I}_2 = -\dot{E}_2 + \dot{I}_2 Z_2$$

$$\dot{E}_1 = -j\omega w_1 \dot{\Phi}$$

$$\dot{E}_2 = -j\omega w_2 \dot{\Phi}$$

$$\dot{\Phi} = \Lambda_{\mu} \dot{F}_{\mu}$$

$$\dot{F}_{\mu} = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2$$

где $Z_1 = r_1 + jx_{\sigma 1}$, $x_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1}$ – комплексное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки; $Z_2 = r_2 + jx_{\sigma 2}$, $x_{\sigma 2} = \omega L_{\sigma 2}$ – комплексное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки; E_1, E_2 – ЭДС, индуцируемые в обмотках полем взаимной индукции.

Введя в математическую модель индуктивное сопротивление первичной обмотки, обусловленное потоком взаимоиндукции Φ , получим

$$\dot{U}_1 = j \dot{I}_{\mu} x_m + \dot{I}_1 Z_1$$

$$-\dot{U}_2 = j \frac{x_m}{k} \dot{I}_{\mu} + \dot{I}_2 Z_2$$

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

Умножив второе уравнение на k , получим систему уравнений приведенного трансформатора, которой соответствует эквивалентная электрическая схема замещения,

$$\dot{U}_1 = jx_m \dot{I}_\mu + \dot{I}_1 Z_1$$

$$-\dot{U}'_2 = jx_m \dot{I}_\mu + \dot{I}'_2 Z'_2$$

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

Уточнение модели требует учета активных потерь в сердечнике от потока взаимоиндукции Φ на гистерезис и вихревые токи. Мощность потерь учитывают введением в математическую модель фиктивного активного сопротивления r_m . Сопротивление r_m образует дополнительный параллельный контур по отношению к сопротивлению x_m и ЭДС E_1 , связанным с тем же потоком Φ . Эквивалентирова параллельную цепь последовательной ветвью с общим намагничивающим током I_μ , рассчитывают комплексное сопротивление с эквивалентными активной и реактивной составляющими

$$Z_\mu = r_\mu + jx_\mu.$$

Параллельная цепь с сопротивлениями r_m и jx_m заменяется последовательной цепью r_μ и jx_μ .

Тогда потери в сердечнике равны

$$P_{\text{мг}} = I_\mu^2 r_\mu.$$

Пренебрегая полями рассеяния и активным сопротивлением обмотки, составляющие комплексного сопротивления Z_μ можно определить опытным путем.

Окончательно система уравнений и схема замещения имеют следующий вид:

$$\dot{U}_1 = jZ_\mu \dot{I}_\mu + \dot{I}_1 Z_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

$$-\dot{U}'_2 = jZ_\mu \dot{I}_\mu + \dot{I}'_2 Z'_2 = -\dot{E}'_2 + \dot{I}'_2 Z'_2$$

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

где

$$\dot{U}_2 k = \dot{U}'_2;$$

$$\dot{E}_2 k = \dot{E}'_2;$$

$$\frac{i_2}{k} = i_2';$$

$$Z_2 k^2 = (r_2 k^2 + jx_{\sigma 2} k^2) = (r_2' + jx_{\sigma 2}') = Z_2'.$$

2.8. Холостой ход трансформатора

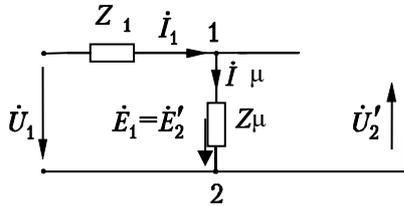


Рис 2.4. Схема замещения опыта холостого хода

Холостой ход трансформатора – такой режим работы, при котором к первичной обмотке подводится напряжение, а вторичная обмотка разомкнута и ток в ней равен нулю (рис. 2.4).

Ток холостого хода – величина тока в первичной обмотке трансформатора в режиме холостого хода при номинальном первичном напряжении. Выражается в процентах по отношению к первичному номинальному току.

$$I_{00/\%} = \frac{I_0}{I_{1н}} 100.$$

Схемы опытов холостого хода однофазного и трехфазного двухобмоточных трансформаторов приведены на рис. 2.5.

Расчетное определение параметров

$$r_m = \frac{U_1^2}{p_{мг}};$$

$$p_{мг} = I_{0a}^2 r_m = I_0^2 r_{\mu};$$

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2}$$

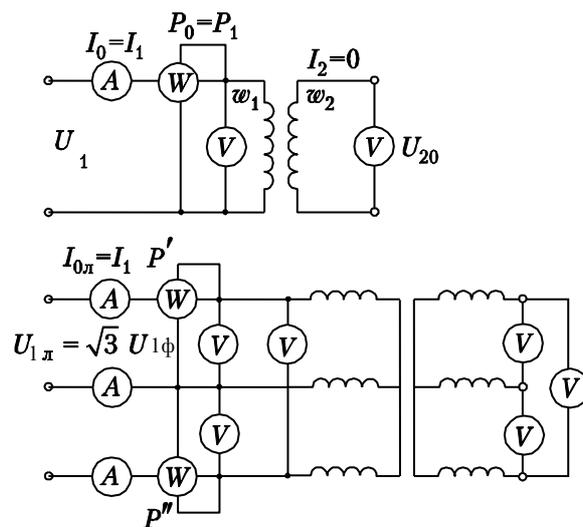


Рис. 2.5. Схемы опытов холостого хода двухобмоточных трансформаторов: сверху – однофазного; внизу – трехфазного

Обозначим первичное напряжение в опыте холостого хода $U_1 = U_0$.

Ток первичной обмотки, равный в режиме холостого хода току намагничивания, обозначим $I_1 = I_\mu = I_0$.

Уравнение трансформатора при холостом ходе

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_0 Z_\mu + \dot{I}_0 Z_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1;$$

$$-\dot{U}'_2 = \dot{I}_0 Z_\mu = -\dot{E}'_2;$$

$$\dot{I}_\mu = \dot{I}_1 = \dot{I}_0.$$

Измеряются первичные напряжения U_0 , ток I_0 и мощность P_0 , а также вторичное напряжение U_2 .

На основе данных опыта для однофазного трансформатора определяют полное, активное и индуктивное сопротивления холостого хода

$$z_0 = \frac{U_0}{I_0}; \quad r_0 = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2};$$

коэффициент трансформации

$$k = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_0}{U_2};$$

коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 I_0};$$

где $z_0 = |Z_1 + Z_\mu|$; $r_0 = r_1 + r_\mu$;

$x_0 = x_{\sigma 1} + x_\mu$.

В силовых трансформаторах $r_1 \ll r_\mu$ и $x_{\sigma 1} \ll x_\mu$. Поэтому можно считать

$$z_0 \approx z_\mu; \quad r_0 \approx r_\mu; \quad x_0 \approx x_\mu;$$

$$P_0 \approx p_{\text{МГ}}; \quad U_0 \approx E_1.$$

Уравнению напряжения холостого хода соответствует векторная диаграмма холостого хода (рис. 2.6).

При увеличении U_0 насыщение сердечника увеличивается, вследствие чего I_0 растет быстрее U_1 . Поэтому z_0 и x_0 с ростом U_0 также уменьшаются.

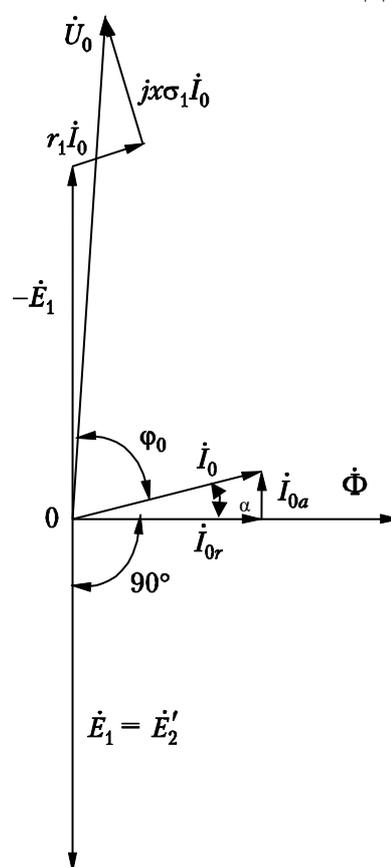


Рис. 2.6. Векторная диаграмма трансформатора при холостом ходе

По характеристикам холостого хода (рис. 2.7) устанавливают значения соответствующих величин для $U_0 = U_H$.

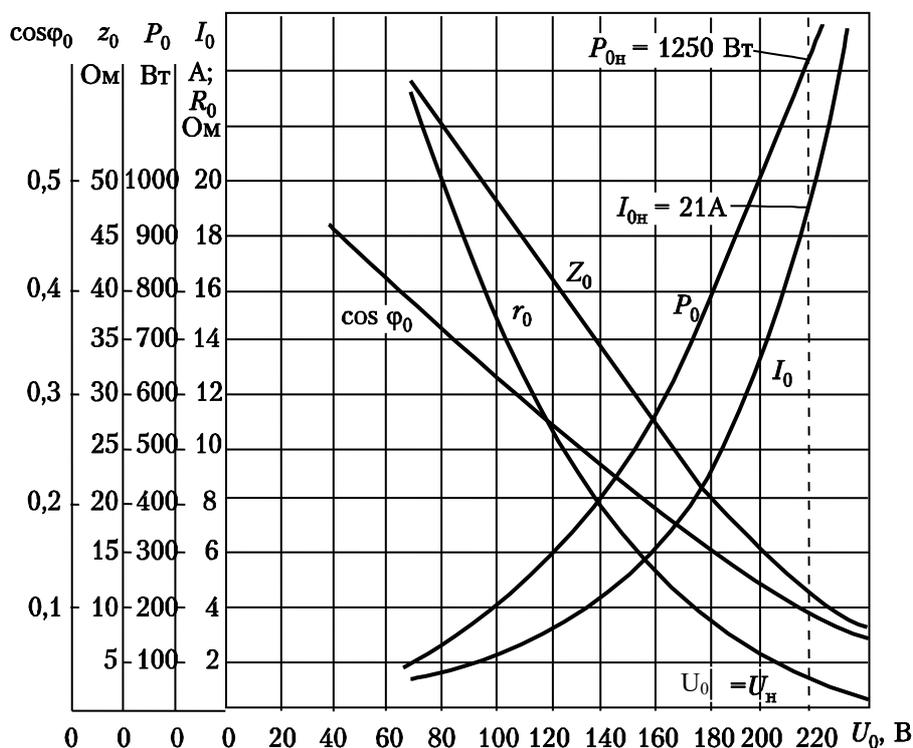


Рис. 2.7. Характеристики холостого хода трансформатора U/U_0 , 240 кВ · А, 3150/380 В, измеренные со стороны НН

2.9. Опыт короткого замыкания

Под **коротким замыканием трансформатора** понимают такой режим его работы, при котором его вторичная обмотка замкнута накоротко и вторичное напряжение равно нулю.

Опыт короткого замыкания должен быть произведен при пониженном первичном напряжении, при котором ток в первичной обмотке достигает номинального значения. Величину напряжения при таких условиях называют **напряжением короткого замыкания** $U_{1к}$. В относительных единицах или процентах

$$u_{к\%} = \frac{U_{1к}}{U_{1Н}} 100 = u_{к} 100.$$

При пониженном первичном напряжении уменьшится поток Φ , что вызовет более сильное уменьшение намагничивающего тока I_{μ} . Поэтому в уравнении для токов можно принять $I_{\mu} = 0$.

Схема опытов короткого замыкания двухобмоточных трансформаторов представлена на рис. 2.8.

Уравнения напряжения трансформатора при коротком замыкании

$$\dot{U}_k = -\dot{E}_{1k} + \dot{I}_{1k}Z_1;$$

$$0 = -\dot{E}'_{2k} + \dot{I}'_{2k}Z'_2;$$

$$0 = \dot{I}_{1k} + \dot{I}'_{2k},$$

откуда

$$\dot{U}_k = \dot{I}_{1k}(Z_1 + Z'_2) = \dot{I}_{1k}Z_k.$$

Из схемы замещения (рис. 2.9) сопротивление короткого замыкания

$$Z_k = Z_1 + \frac{Z_\mu Z'_2}{Z_\mu + Z'_2};$$

$$z_k = |Z_1 + Z'_2|; \quad r_k = r_1 + r'_2;$$

$$x_k = x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2}.$$

Потери при коротком замыкании равны активной мощности

$$p_k = I_{1k}^2 r_k = P_k.$$

Полное z_k , активное r_k и реактивное x_k сопротивления короткого замыкания рассчитывают по формулам, аналогичным формулам сопротивлений холостого хода.

Для однофазного трансформатора

$$z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}}; \quad r_k = \frac{P_{1k}}{I_{1k}^2}; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{1k}}{U_{1k} I_{1k}}.$$

Поскольку $x_{\sigma 1}$ и $x'_{\sigma 2}$ определяются потоками, замыкающимися по воздуху, то их значения, а также значение z_k , не зависят от U_k и I_k .

Треугольник, изображенный на рис. 2.10, называют *треугольником короткого замыкания*. Его катеты представляют собой активную и реактивную составляющие напряжения короткого замыкания

$$u_{ka} = u_k \cos \varphi_k; \quad u_{kr} = u_k \sin \varphi_k; \quad \varphi_k = \arctg \left(\frac{x_k}{r_k} \right).$$

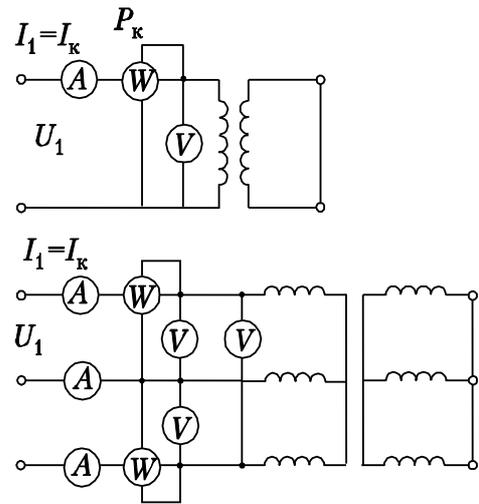


Рис. 2.8. Схема опытов короткого замыкания двухобмоточных трансформаторов: наверху – однофазного; внизу – трехфазного

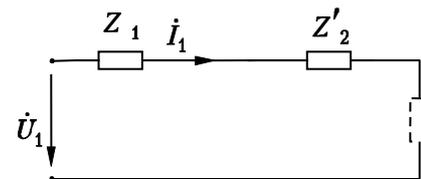


Рис. 2.9. Схема замещения при коротком замыкании

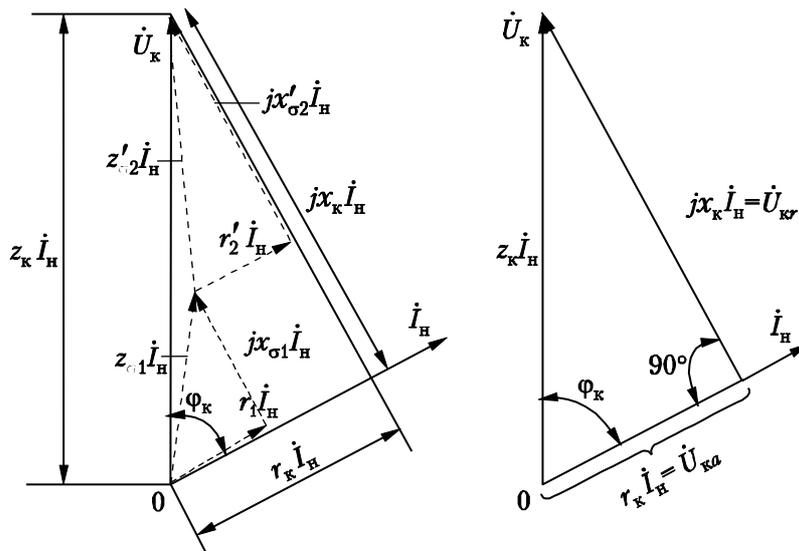


Рис. 2.10. Векторная диаграмма трансформатора при коротком замыкании

На рис. 2.11 представлены характеристики короткого замыкания трансформатора Y/Y_0 , 240 кВ · А, 3150/380 В, определенные со стороны ВН.

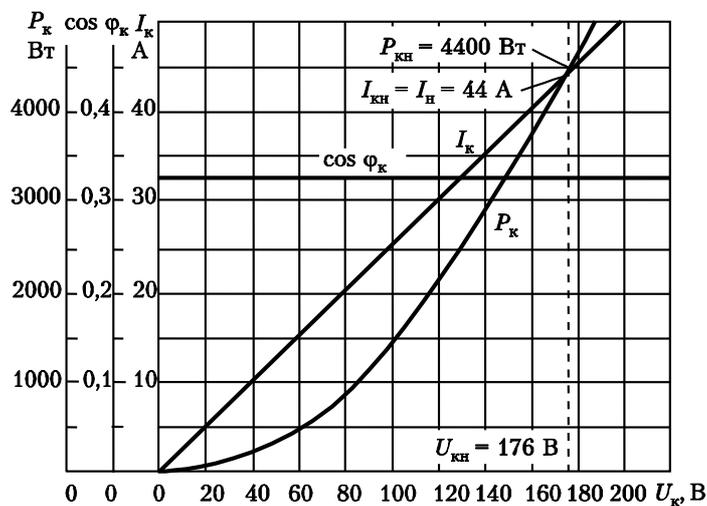


Рис. 2.11. Характеристики короткого замыкания трансформатора Y/Y_0 , 240 кВ · А, 3150/380 В, определенные со стороны ВН

Напряжение короткого замыкания в относительных единицах равно сопротивлению короткого замыкания в относительных единицах

$$u_k = \frac{U_{1k}}{U_H} = \frac{z_k I_H}{U_H} = \frac{z_k}{z_H} = z_{k*}.$$

Напряжение короткого замыкания – важная характеристика трансформатора. Значение $u_{k\%}$ указывают в паспортной табличке трансформатора. Для силовых трансформаторов $u_{k\%} = 4,5 - 15 \%$. Если короткое замыкание происходит при номинальном первичном напряжении, то

$$I_k = \frac{U_H}{z_k},$$

или в относительных единицах

$$I_{k*} = \frac{1}{z_{k*}} = \frac{100}{u_{k\%}}.$$

Например, при $u_{k\%} = 10 \%$ ток короткого замыкания $I_k = 10I_H$.

2.10. Работа трансформатора под нагрузкой

Векторная диаграмма режима нагрузки

При холостом ходе трансформатор потребляет из сети такой ток I_μ , который нужен для создания потока Φ , необходимого при данном значении U_1 .

Когда ко вторичной обмотке подключается нагрузка, в этой обмотке возникает ток I_2 . Вторичная МДС $w_2 I_2 = w_1 I_2'$ стремится создать в сердечнике свой поток и изменить поток, существовавший в режиме холостого хода. Однако при $U_1 = \text{const}$ этот поток существенным образом измениться не может. Поэтому первичная обмотка будет потреблять из сети наряду с намагничивающим током I_μ такой дополнительный ток, что создаваемая им МДС уравнивает МДС $w_2 I_2$. В результате полный первичный ток представляется двумя составляющими – намагничивающей (I_μ) и нагрузочной (I_2')

$$I_1 = I_\mu + (-I_2').$$

Упрощенная векторная диаграмма соответствует упрощенной схеме замещения трансформатора, в которой намагничивающий ток принят равным нулю. Если в ней изменить положительные направления \dot{U}_2' и \dot{I}_2' на обратные, повернув их векторы на 180° , то получится диаграмма, изображенная на рис. 2.12.

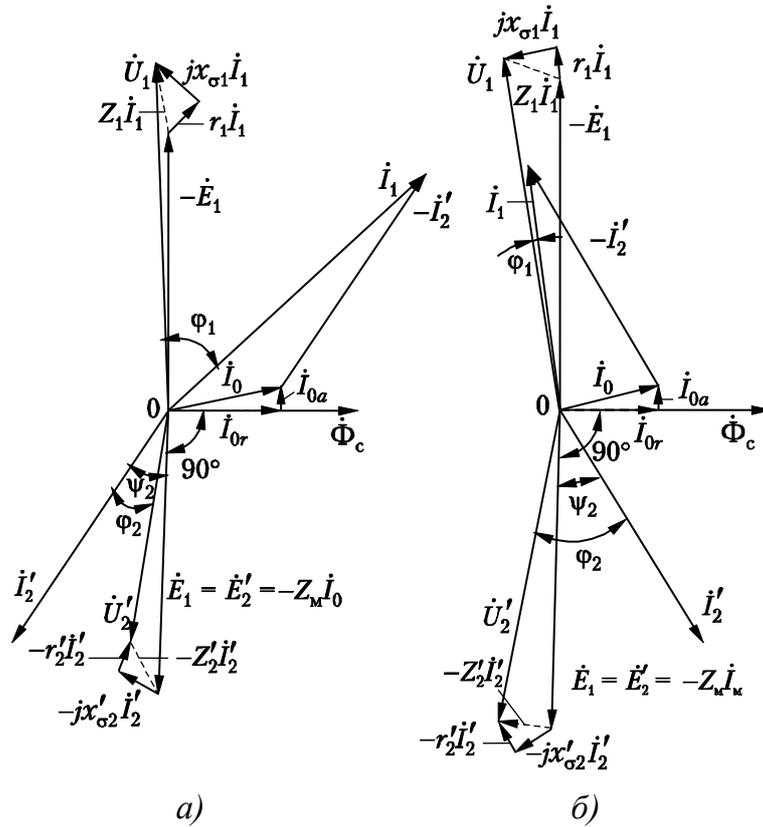


Рис. 2.12. Векторные диаграммы трансформатора:
 а – при смешанной активно-индуктивной нагрузке;
 б – активно-емкостной нагрузке

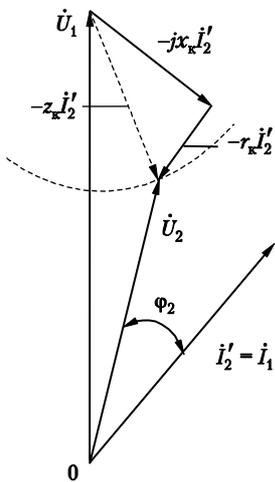


Рис. 2.13.
 Упрощенная
 векторная диаграмма
 трансформатора
 при смешанной
 активно-индуктивной
 нагрузке

Если $U_1 = \text{const}$ и $I_2' = \text{const}$, а угол сдвига фаз изменяется, то конец вектора \dot{U}_2' будет перемещаться по окружности радиусом $Z_k I_2'$ и с центром в конце вектора \dot{U}_1 , как изображено на рис. 2.12 пунктирной линией. Из такой диаграммы можно легко вывести заключение о влиянии характера нагрузки или величины φ_2 на напряжение \dot{U}_2' .

На рис. 2.13 представлена упрощенная векторная диаграмма трансформатора при смешанной активно-индуктивной нагрузке.

Из выражений следует, что изменение напряжения трансформатора зависит от нагрузки (коэффициента $\beta = I_2/I_{2н}$), ее характера (угла φ_k) и составляющих напряжения короткого замыкания.

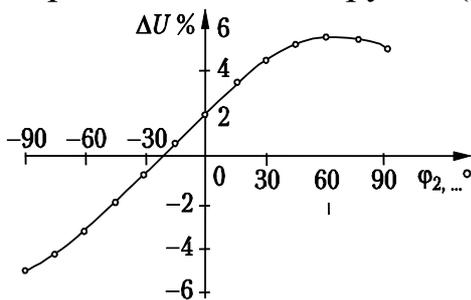


Рис. 2.15. Зависимость изменения напряжения от характера нагрузки

Для того чтобы проиллюстрировать зависимость ΔU от характера нагрузки трансформатора, на рис. 2.15 построен график зависимости $\Delta U\% = f(\varphi_2)$ при $I = I_n$ применительно к данным рассмотренного примера. Правый квадрант соответствует смешанной активно-индуктивной нагрузке, а левый квадрант – активно-

емкостной нагрузке. Видно, что при активно-индуктивной нагрузке вторичное напряжение трансформатора падает ($\Delta U > 0$), а при активно-емкостной нагрузке и больших углах φ_2 оно повышается ($\Delta U < 0$). Заметим, что чем выше номинальное напряжение трансформатора, тем больше рассеяние трансформатора и напряжение короткого замыкания, и поэтому тем больше изменение напряжения трансформатора.

2.12. Энергетические диаграммы

Преобразование активной мощности трансформатора происходит согласно диаграмме, изображенной на рис. 2.16, а, соответствующей схемам замещения и векторным диаграммам.

Первичная обмотка потребляет из питающей сети мощность

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

Часть этой мощности теряется на электрические потери в первичной обмотке

$$p_{эл1} = m_1 I_1^2 r_1.$$

Часть мощности расходуется на магнитные потери в сердечнике

$$p_{мг} = m_1 E_1 I_{0a} = m_1 I_{0a}^2 r_{\mu}.$$

Электромагнитная мощность

$$P_{эм} = P_1 - p_{эл1} - p_{мг} = m_1 E_1 I_2' \cos \psi_2$$

передается магнитным полем во вторичную обмотку. В этой обмотке теряется мощность

$$p_{эл2} = m_2 I_2'^2 r_2 = m I_2'^2 r_2'.$$

Остаток мощности P_2 представляет собой полезную мощность, передаваемую потребителям,

$$P_2 = P_{\text{эм}} - p_{\text{эл}2} = m_2 U_2 I_2 \cos \varphi_2 = m_2 U'_2 I'_2 \cos \varphi_2.$$

Преобразование реактивной мощности происходит согласно диаграмме, приведенной на рис. 2.16, б. Из первичной реактивной мощности

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1$$

часть расходуется на создание первичного магнитного поля рассеяния

$$q_1 = m_1 I_1^2 x_{\sigma 1}.$$

На создание магнитного поля сердечника расходуется

$$q_{\mu} = m_1 E_1 I_{\mu r} = m I_{\mu r}^2 x_{\mu}.$$

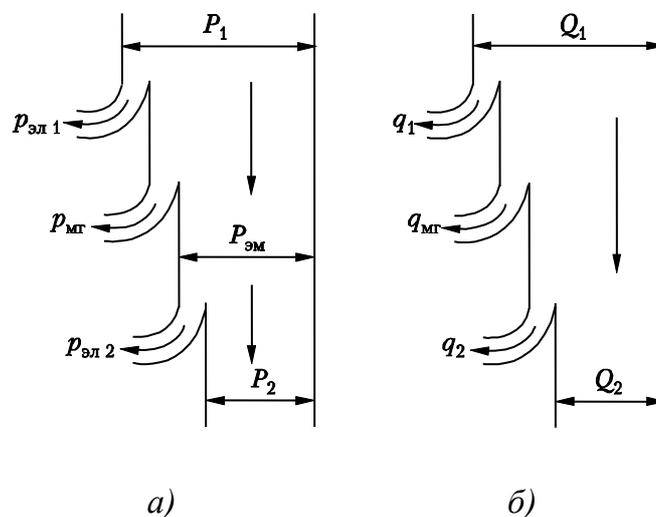


Рис. 2.16. Преобразование мощностей в трансформаторе: а – активной мощности; б – реактивной мощности

Во вторичной обмотке теряется реактивная мощность

$$q_2 = m_2 I_2^2 x_{\sigma 2} = m I_2'^2 x_{\sigma 2}'$$

и оставшаяся реактивная мощность

$Q_2 = Q_1 - q_1 - q_{\mu} - q_2 = m_2 U_2 I_2 \sin \varphi_2 = m_2 U'_2 I'_2 \sin \varphi_2$ передается потребителю.

2.13. Коэффициент полезного действия

Потери активной мощности в трансформаторе подразделяют на *электрические потери в обмотках* и *магнитные потери в сердечнике*. Добавочные потери на вихревые токи в обмотках включают в электрические потери.

Кроме того, возникают потери на вихревые токи от полей рассеяния также в стенках бака и крепежных деталях. Поскольку эти потери пропорциональны квадрату тока, то они тоже относятся к электрическим потерям. Опытное значение активного сопротивления короткого замыкания r_k учитывает и эти добавочные потери.

Величину потерь определяют расчетным путем при проектировании трансформатора или опытным путем в готовом трансформаторе. Магнитные потери $p_{\text{мг}}$ определяют из опыта холостого хода.

Поток трансформатора при $U_1 = \text{const}$ с изменением нагрузки несколько изменяется, в соответствии с чем изменяются также магнитные потери. Однако это изменение относительно невелико

$$p_{\text{мг}} = P_0$$

при $U_1 = U_{1\text{н}}$

Электрические потери, включая добавочные, при номинальном токе принимают равными мощности короткого замыкания при этом же токе, приведенной к температуре обмоток $\theta = 75^\circ\text{C}$,

$$p_{\text{эл}} = P_k;$$

при $I_1 = I_{1\text{н}}$

$$p_{\text{эл}} = \beta^2 P_k;$$

при $I_1 \neq I_{1\text{н}}$

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1\text{н}}}.$$

Таким образом, суммарные потери трансформатора при $U_1 = U_{\text{н}}$ принимают равными

$$p_{\Sigma} = p_{\text{мг}} + p_{\text{эл}} = P_0 + \beta^2 P_k.$$

Коэффициент полезного действия трансформатора вычисляют, предполагая, что полезная мощность трансформатора выражается соотношением

$$P_2 = m U_{2\text{н}} \beta I_{2\text{н}} \cos \varphi_2 = \beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2,$$

которое не учитывает того, что при изменениях нагрузки напряжение U_2 меняется и не равно $U_{2\text{н}}$.

В соответствии с изложенным формула для вычисления КПД принимает вид

$$\eta = 1 - \frac{p_{\Sigma}}{P_2 + p_{\Sigma}} = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_k}{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k}.$$

Отмеченные ранее допущения слабо сказываются на точности вычисления КПД.

Коэффициент полезного действия трансформатора имеет максимальное значение при такой нагрузке, при которой переменные потери $p_{эл}$ равны постоянным потерям $p_{мг}$, т. е. при $\beta^2 P_k = P_0$. Таким образом, $\eta = \eta_{\max}$ при

$$\beta = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}}$$

2.14. Регулирование напряжения трансформатора

Колебания нагрузок потребителей вследствие падения напряжений в трансформаторе и питающей сети вызывают колебания вторичного напряжения трансформатора.

Поэтому возникает необходимость регулирования напряжения трансформаторов, что можно осуществить изменением коэффициента трансформации

$$k = \frac{w_1}{w_2}$$

или числа включенных в работу витков первичной или вторичной обмоток трансформатора. Для этой цели обмотку выполняют с рядом ответвлений и для регулирования напряжения эти ответвления переключают с помощью переключающего устройства.

Переключать ответвления обмотки можно как при отключенном от сети трансформаторе, так и под нагрузкой. При первом способе переключающее устройство получается более простым и дешевым, однако переключение связано с перерывом энергоснабжения потребителей и не может выполняться часто.

Поэтому первый способ применяют главным образом для коррекции вторичного напряжения сетевых понижающих трансформаторов в зависимости от уровня первичного напряжения на данном участке сети, а также при сезонных изменениях напряжения сети в связи с сезонным изменением нагрузки.

Переключение под нагрузкой требует более сложного и дорогого переключающего устройства и используется в мощных трансформаторах при необходимости частого или непрерывного регулирования напряжения. Применение трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой становится все более распространенным.

2.15. Схемы и группы соединений обмоток трансформаторов

Общепринятые обозначения начал и концов обмоток трансформаторов приведены в таблице.

Обозначения начал и концов обмоток трансформатора

| Название обмоток | | Однофазные трансформаторы | Трехфазные трансформаторы |
|-----------------------------|--------|---------------------------|---------------------------|
| Обмотки высшего напряжения | начала | A | A, B, C |
| | концы | X | X, Y, Z |
| Обмотки низшего напряжения | начала | a | a, b, c |
| | концы | x | x, y, z |
| Обмотки среднего напряжения | начала | Am | Am, Bm, Cm |
| | концы | Xm | Xm, Ym, Zm |

Зажимы нулевой точки при соединении в «звезду» обозначают O , O_m , o .

В большинстве случаев обмотки трехфазных трансформаторов соединяют либо в «звезду» (обозначается Y или, по новому стандарту, Y), либо в «треугольник» (обозначается Δ (D)).

В некоторых случаях применяют также соединение обмоток по схеме «зигзаг». В этом случае фазу обмотки разделяют на две части, которые располагают на разных стержнях и соединяют последовательно. Выбор схемы соединения обмоток определяется конкретными условиями работы трансформатора.

2.16. Группы соединений обмоток

Для включения трансформатора на параллельную работу с другими трансформаторами имеет значение сдвиг фаз между ЭДС первичной и вторичной обмоток. Для определения этого сдвига вводят понятие *группы соединений обмоток*.

На рис. 2.17, *a* показаны обмотки однофазного трансформатора, намотанные по левой винтовой линии и называемые поэтому *левыми*, причем у обеих обмоток начала (A, a) находятся сверху, а концы (X, x) – снизу. Будем считать ЭДС положительной, если она действует от конца обмотки к ее началу.

Обмотки, изображенные на рис. 2.17, *a*, сцепляются с одним и тем же потоком. Вследствие чего ЭДС этих обмоток E_A и E_a в каждый

момент времени действуют в одинаковых направлениях, и, соответственно, совпадают по фазе, как показано на рис. 2.17, а.

Если перемаркировать обозначения концов одной из обмоток на противоположные, заменяя a на x и x на a , это будет означать изменение принимаемого положительного направления действия ЭДС на обратное. Значит, теперь ЭДС E_A и E_a (см. рис. 2.17), индуцируемые одним и тем же магнитным потоком, будут противоположно направленными и фазовый угол сдвига между ними будет равен 180° . Такой же результат получится, если на рис. 2.17, а одну из обмоток выполнить «правой». Фазовый угол сдвига между ЭДС первичной и вторичной обмотками трансформатора можно уподобить углу между минутной и часовой стрелками на циферблате часов.

Условимся вектор ЭДС обмотки ВН принять за минутную стрелку и всегда считать его направленным на цифру 12, а вектор ЭДС обмотки НН принять за часовую стрелку. Цифра, на которую будет показывать эта часовая стрелка, определяет так называемую группу соединения обмоток трансформатора. Так, в случае, изображенном на рис. 2.17, а, часовая стрелка указывает на 0 (или 12) часов. Такое соединение обмоток называют «группа 0 (или 12)». В случае, изображенном на рис. 2.17, б, часовая стрелка указывает на 6 часов. Следовательно, это группа соединений 6. Очевидно, что однофазные трансформаторы имеют только две группы соединения обмоток – I/I-0 и I/I-6.

Рассмотрим трехфазный трансформатор с соединением обмоток ВН и НН в «звезду», причем предположим следующее: обмотки ВН и НН имеют одинаковую намотку (например, «правую»); начала и концы обмоток расположены одинаково (например, концы снизу, а начала сверху); одноименные обмотки (например, A и a , а также B и b , C и c) находятся на общих стержнях (рис. 2.18, а).

В этом случае «звезды» фазных ЭДС и «треугольники» линейных ЭДС будут иметь вид, показанный на рис. 2.18, б. При этом одноимен-

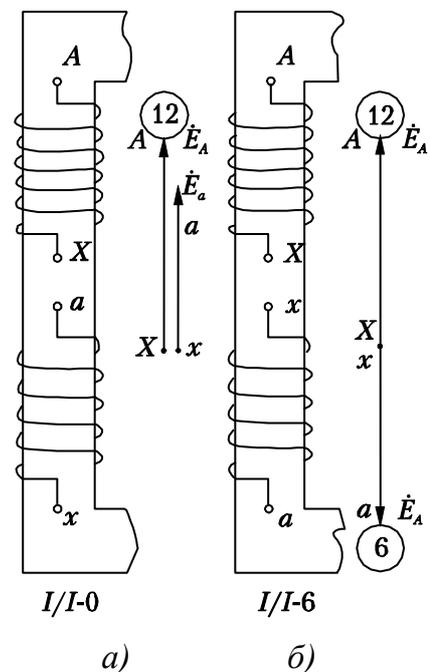


Рис. 2.17. Группы соединений однофазного трансформатора

ные векторы линейных ЭДС (например, E_{AB} и E_{ab}) направлены одинаково, т. е. совпадают по фазе, и при расположении их на циферблате часов, согласно изложенному ранее правилу, часы будут показывать 0 часов (рис. 2.18, в). Поэтому схема и группа соединений такого трансформатора обозначаются $Y/Y-0$ (или $Y/Y-0$).

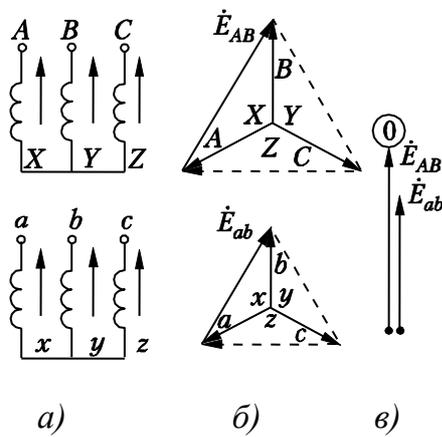


Рис. 2.18. Трехфазный трансформатор со схемой и группой соединений $Y/Y-0$

групп соединений, причем все четные. Такие же группы соединений можно получить при схеме соединений Д/Д.

Допустим теперь, что обмотки соединены по схеме Y/Δ , как показано на рис. 2.19, а, и соблюдены те же условия, которые были оговорены для случая, изображенного на рис. 2.18, а. Тогда векторные диаграммы ЭДС обмоток ВН и НН будут иметь вид, показанный на рис. 2.19, б.

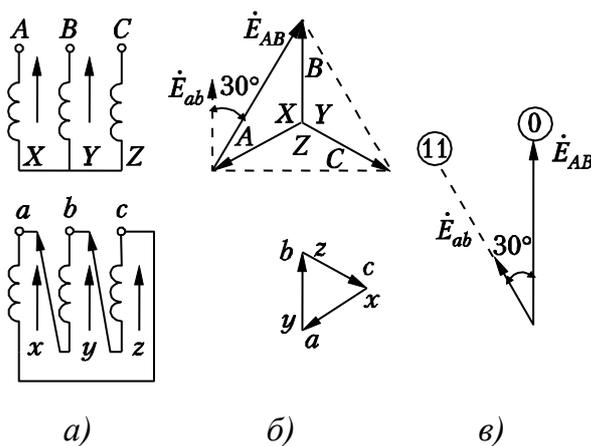


Рис. 2.19. Трехфазный трансформатор со схемой и группой соединений $Y/\Delta-11$

угольнике», изображенном на рис. 2.19, а, перемычек az , bz , cx в «треугольнике», изображенном на рис. 2.19, а, перемычек az , bz , cx) можно получить также другие нечетные группы: 1, 3, 5, 7 и 9.

Если на рис. 2.18, а произвести круговую перемаркировку (или перестановку) фаз обмотки НН и разместить фазу a на среднем стержне, фазу b – на правом и фазу c – на левом, то на векторной диаграмме НН (см. рис. 2.18, б) произойдет круговая перестановка букв a, b, c по часовой стрелке. При этом получится группа соединений 4, а при обратной круговой перестановке – группа соединений 8. Если поменять местами начала и концы обмоток, то дополнительно получатся группы соединений 6, 10 и 2. Значит, при соединении по схеме Y/Y возможны шесть

ЭДС обмоток ВН и НН будут иметь вид, показанный на рис. 2.19, б. При этом одноименные линейные ЭДС (например, E_{AB} и E_{ab}) будут сдвинуты на 30° и расположатся на циферблате часов, как показано на рис. 2.19, в. Соединение обмоток такого трансформатора обозначается $Y/\Delta-11$ (или $Y/\Delta-11$). При круговых перестановках фаз и перемаркировке начал и концов одной из обмоток (или при установке вместо перемычек ay , bz , cx в «тре-

Нежелательно допускать большой разницей в схемах и группах соединений изготавливаемых трансформаторов, поэтому ГОСТ 12 965-85 предусматривает изготовление трехфазных силовых трансформаторов со следующими соединениями обмоток: Y/Y_0-0 (Y/Y_0-12); $Y/\Delta-11$ ($Y/\Delta-11$); $Y_N/\Delta-11$ ($Y_0/\Delta-11$). При этом первым символом обозначено соединение обмотки ВН, вторым – соединение обмотки НН, а индекс «0» или «н» указывает на то, что наружу выводится нулевая точка обмотки.

2.17. Параллельная работа трансформаторов

2.17.1. Условия включения трансформаторов на параллельную работу

При параллельной работе трансформаторов первичные обмотки подключены к одной электрической сети, а вторичные обмотки – к общей нагрузке.

Параллельное включение трансформаторов используют в электрических системах:

- для обеспечения эффективности использования трансформаторного оборудования при значительных колебаниях общей нагрузки;
- резервирования энергоснабжения потребителей.

При параллельной работе трансформаторов следует стремиться к тому, чтобы нагрузка между ними распределялась пропорционально их номинальным мощностям. В этом случае максимальная передаваемая мощность равна сумме номинальных мощностей отдельных трансформаторов

$$S_{\max} = S_{\text{нI}} + S_{\text{нII}} + \dots + S_{\text{нN}}.$$

Для этого необходимо, чтобы параллельно работающие трансформаторы имели:

- равные коэффициенты трансформации;
- одинаковые группы соединения обмоток;
- одинаковые сопротивления короткого замыкания.

Убедимся, что при невыполнении этих условий нарушается желаемая загрузка параллельно включенных трансформаторов. При нарушении первых двух условий это происходит из-за появления уравнительных токов между трансформаторами, при нарушении третьего – из-за непропорционального распределения общей мощности нагрузки, подключенной к первичным обмоткам.

2.17.2. Параллельная работа трансформаторов при неодинаковых коэффициентах трансформации

Пусть коэффициенты трансформации двух параллельно включенных однофазных трансформаторов находятся в отношении

$$k_I < k_{II}.$$

Поскольку первичные обмотки присоединены к общей сети, то их напряжения равны

$$U_{1I} = U_{1II} = U_c.$$

Электродвижущие силы вторичных обмоток различны:

$$E_{2I} = \frac{U_{1I}}{k_I}$$

$$E_{2II} = \frac{U_{1II}}{k_{II}}$$

$$E_{2I} > E_{2II}$$

Разность ЭДС

$$\Delta \dot{E}$$

будет создавать ток, называемый *уравнительным* $I_{2ур}$. Этот ток проходит по вторичным обмоткам в противоположных направлениях.

Уравнительный ток протекает не только по вторичным обмоткам, он трансформируется и в первичную обмотку. По отношению к уравнительному току трансформаторы находятся в режиме короткого замыкания, и ток будет ограничиваться их сопротивлениями короткого замыкания. Уравнительный ток вторичных обмоток равен

$$\dot{I}_{2ур} = \frac{\Delta \dot{E}}{Z_{кI} + Z_{кII}},$$

где $Z_{кI}$, $Z_{кII}$ – сопротивления короткого замыкания трансформаторов при питании со стороны вторичных обмоток. Если же величины $Z_{кI}$, $Z_{кII}$ и ΔE определены в относительных единицах, тогда относительное значение уравнительного тока будет равно

$$\dot{i}_{y2} = \dot{i}_{y1} = \dot{i}_{y2} = \frac{\sqrt{\dot{E}}}{Z_{кI} + Z_{кII}} = \frac{\dot{E}}{u_{кI} + u_{кII}}.$$

Уравнительный ток по фазе отстает от ΔE на значительный угол, так как обычно индуктивное сопротивление короткого замыкания x_k больше активного сопротивления r_k . Этот угол близок к $\pi/2$ (рис. 2.20).

При $u_k = 0,05$; $\Delta E = 0,05$; $I_y = 0,5$ уравнительные токи изменяют напряжения на вторичных обмотках (за счет падений напряжения), понижая их на первом трансформаторе и повышая – на втором. В результате устанавливается некоторое единое вторичное напряжение обоих трансформаторов $E_1 > U_2 > E_2$.

При включении нагрузки в трансформаторах возникают токи нагрузки $I_{нГI}$ и $I_{нГII}$. Ток нагрузки между трансформаторами распределяется пропорционально их номинальным мощностям. Поскольку в нашем случае мощности обоих трансформаторов одинаковые, то ток нагрузки между ними распределяется поровну $I_{нГI} = I_{нГII}$. Результирующий ток каждого трансформатора будет равен геометрической сумме уравнительного и нагрузочного токов. Большую нагрузку всегда имеет трансформатор, у которого коэффициент трансформации меньше.

ГОСТ допускает включение на параллельную работу трансформаторов с различными коэффициентами трансформации, если разница не превышает 0,5 %, а для трансформаторов с $k < 3$ и трансформаторов, используемых для собственных нужд электростанции, – 1 %.

2.17.3. Параллельная работа трансформаторов при неодинаковых группах соединений

При включении на параллельную работу трансформаторов с разными группами соединений их вторичные ЭДС будут равны по амплитуде, но сдвинуты между собой по фазе. В контуре вторичных обмоток будет действовать ЭДС ΔE , равная геометрической разности ЭДС вторичных обмоток. Так, если включить на параллельную работу трансформатор с группами соединения обмоток У/Д-11 и У/У-0, то угол сдвига между вторичными ЭДС будет равен 30° (рис. 2.21) и

$$\Delta E = 2E_2 \sin\left(\frac{30^\circ}{2}\right) \approx 0,52E_2.$$

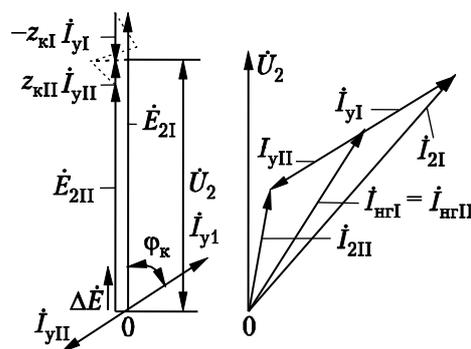


Рис. 2.20. Векторные диаграммы для трансформаторов, включенных на параллельную работу, с разными коэффициентами трансформации

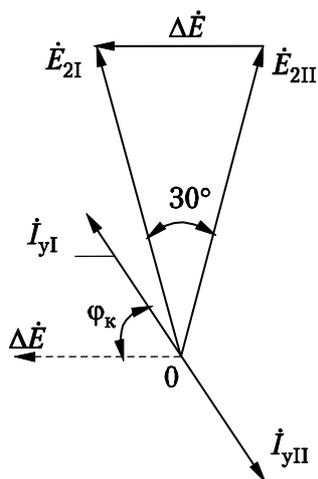


Рис. 2.21. Векторная диаграмма вторичных ЭДС и уравнительных токов при параллельной работе трансформаторов с группами соединения У/Д-11 и У/У-0

При включении трансформаторов с группами 0 и 6 угол сдвига между ЭДС равен 180° и $\Delta E = 2E_2$. При таких значениях ΔE в трансформаторах возникают уравнительные токи, которые будут в несколько раз превышать номинальный ток. Поэтому параллельное включение трансформаторов с разными группами соединений недопустимо.

2.17.4. Параллельная работа трансформаторов с неодинаковыми напряжениями короткого замыкания

При исследовании параллельной работы трансформаторов с неодинаковыми напряжениями короткого замыкания пренебрежем намагничивающими токами.

При равенстве коэффициентов трансформации и одинаковых группах уравнительные токи будут отсутствовать. Схему замещения параллельной работы двух трансформаторов можно представить в виде, изображенном на рис. 2.22.

Из схемы следует, что падения напряжения

$$\Delta \dot{U}$$

у всех трех трансформаторов одинаковы и равны

$$\Delta \dot{U},$$

где \dot{I} – общий ток нагрузки и

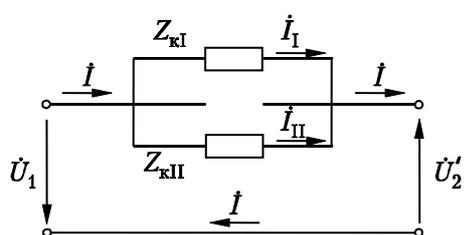


Рис. 2.22. Упрощенная схема параллельной работы трансформаторов

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_{кI}} + \frac{1}{Z_{кII}}}$$

Для n параллельно включенных трансформаторов

$$Z = \frac{1}{\sum_N \frac{1}{Z_{кn}}}$$

Токи отдельных трансформаторов

$$I_{кI} \quad I_{кI} \quad I_{кII}$$

В общем случае эти токи не совпадают по фазе, так как аргументы $\varphi_{кI}$, $\varphi_{кII}$ комплексных сопротивлений короткого замыкания

$$Z_{кI} = z_{кI} e^{j\varphi_{кI}}; \quad Z_{кII} = z_{кII} e^{j\varphi_{кII}}$$

могут быть неравными. Однако реально угол сдвига между токами небольшой, и с высокой точностью можно принять арифметические равенства токов и полных мощностей

$$I_I + I_{II} = I;$$

$$S_I + S_{II} = S.$$

Вследствие изложенного комплексные величины можно заменить их модулями.

Напомним, что, по определению,

$$z_{кI} = \frac{z_{кI} I_{HI}}{U_H} = u_{кI},$$

откуда получим

$$z_{кI} = z_{кI} \frac{U_H}{I_{HI}} = \frac{u_{кI\%}}{100} \frac{U_H}{I_{HI}}$$

и аналогичные выражения для $z_{кII}$.

Подставим эти выражения для $z_{кI}$ и $z_{кII}$ в выражения для токов I_I и I_{II} и заменим токи на пропорциональные им полные мощности, умножив выражения на величину mU_H . Тогда получим

$$mU_H I_I = \frac{mU_H I}{\frac{u_{кI\%}}{100} \frac{U_H}{I_{HI}} \left(\frac{100I_{HI}}{U_H u_{кI\%}} + \frac{100I_{II}}{U_H u_{кII\%}} \right)}$$

$$mU_H I_{II} = \frac{mU_H I}{\frac{u_{кII\%}}{100} \frac{U_H}{I_{II}} \left(\frac{100I_{HI}}{U_H u_{кI\%}} + \frac{100I_{II}}{U_H u_{кII\%}} \right)}$$

$$S_I = \frac{S}{\frac{u_{кI\%}}{S_{HI}} \left(\frac{S_I}{u_{кI\%}} + \frac{S_{II}}{u_{кII\%}} \right)}$$

$$S_{II} = \frac{S}{\frac{u_{кII\%}}{S_{II}} \left(\frac{S_I}{u_{кI\%}} + \frac{S_{II}}{u_{кII\%}} \right)}$$

или для n параллельно включенных трансформаторов

$$S_I = \frac{S}{\frac{u_{кI\%}}{S_{HI}} \sum_N \frac{S_{Hn}}{u_{кn\%}}}.$$

В относительных единицах

$$\underline{S}_I = \frac{S_I}{S_{HI}} = \frac{S}{u_{KI\%} \sum_n \frac{S_{Hn}}{u_{Kn\%}}}$$
$$\underline{S}_{II} = \frac{S_{II}}{S_{HII}} = \frac{S}{u_{KII\%} \sum_n \frac{S_{Hn}}{u_{Kn\%}}} .$$

На основании равенств имеем

$$\underline{S}_I : \underline{S}_{II} = \frac{1}{u_{KI\%}} : \frac{1}{u_{KII\%}} ,$$

т. е. относительные нагрузки трансформаторов обратно пропорциональны их напряжениям короткого замыкания. Если $u_{KI\%} = u_{KII\%}$, то $\underline{S}_I = \underline{S}_{II}$, т. е. трансформаторы нагружаются равномерно и при увеличении нагрузки достигают номинальной мощности одновременно.

Очевидно, что при этом условия параллельной работы являются наилучшими. Если же $u_{K\%}$ не равны, то при повышении нагрузки прежде всего номинальной мощности достигнет трансформатор с наименьшим $u_{K\%}$. Другие трансформаторы при этом будут недогружены, но в то же время дальнейшее увеличение общей нагрузки недопустимо, так как первый трансформатор будет перегружаться. Установленная мощность трансформаторов останется, таким образом, недоиспользованной.

Рекомендуется включать на параллельную работу такие трансформаторы, значение $u_{K\%}$ каждого из которых отличается от среднего арифметического значения u_K всех трансформаторов не более чем на $\pm 10\%$ и отношение номинальных мощностей которых находится в пределах 3 : 1. Допустимые перегрузки трансформаторов нормируются ГОСТом.

Глава 3. АВТОТРАНСФОРМАТОР

Автотрансформатор отличается от трансформатора тем, что у первого обмотка НН является частью обмотки ВН, причем обмотка НН выполняется из проводников, в общем случае отличающихся по сечению от проводников другой части, и обычно располагается относительно другой части, как показано на рис. 3. Следовательно, части Aa и aX можно рассматривать как обмотки двухобмоточного трансформатора, имеющие между собой не только магнитную связь, но и электрическую.

Автотрансформаторы могут служить как для понижения, так и для повышения напряжения. Они выполняются для небольших коэффициентов трансформации, не сильно отличающихся от единицы, и в этом случае, как показано в дальнейшем, экономичнее в работе и требуют меньше материалов на изготовление, чем обычные двухобмоточные трансформаторы на ту же номинальную мощность.

За номинальную мощность автотрансформатора принимают мощность $S_H = U_{1H}I_{1H} = U_{2H}I_{2H}$.

Приложенное к обмотке $A - X$ напряжение \dot{U}_1 уравновешивается в основном ЭДС \dot{E}_1 . Электродвижущая сила $E_2 = E_1 \frac{w_2}{w_1}$ создает ток во вторичной цепи, при этом $U_2 \approx E_2$, следовательно,

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2}.$$

Пренебрегая током холостого хода, согласно закону полного тока можем написать

$$I_2 w_2 + I_1 w_1 = 0,$$

отсюда

$$\dot{I}_2 = -\dot{I}_1 \frac{w_1}{w_2}. \tag{1}$$

Ток в общей части обмотки $a - X$ равен геометрической сумме первичного и вторичного токов

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2.$$

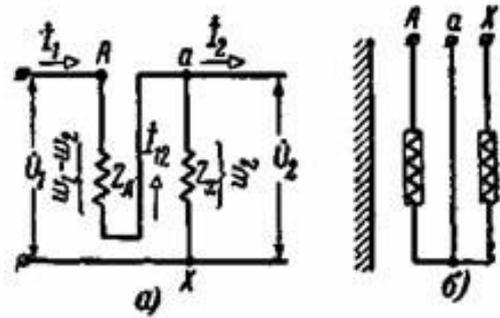


Рис. 3. Схема: а – понижающего автотрансформатора; б – расположения частей обмоток понижающего автотрансформатора относительно стержня сердечника

Для понижающего трансформатора $I_2 > I_1$, следовательно, ток обшей части обмотки равен

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_2 + \dot{I}_1,$$

что дает возможность соответственно уменьшить сечение ее проводников.

С учетом выражения (1) получим

$$\dot{I}_{12} = \dot{I} \left(1 - \frac{w_1}{w_2} \right).$$

Части обмотки $A - a$ и $a - X$ магнитно уравновешены, т. е. их намагничивающие силы (НС) равны и противоположно направлены, что следует из соотношений

$$\dot{I}_{12} w_2 = \dot{I}_1 \left(1 - \frac{w_1}{w_2} \right) w_2 = -\dot{I}_1 (w_1 - w_2).$$

Для того чтобы можно было сравнить автотрансформатор с двухобмоточным трансформатором, найдем расчетную мощность S_a автотрансформатора.

Расчетная мощность S_{a1} части обмотки $A - a$ равна

$$S_{a1} = (E_1 - E_2) I_1 = E_1 I_1 \left(1 - \frac{w_2}{w_1} \right),$$

расчетная мощность S_{a2} части обмотки $a - X$ равна

$$S_{a2} = E_2 (I_2 - I_1) I_1 = E_2 I_2 \left(1 - \frac{w_2}{w_1} \right).$$

Следовательно, $S_{a1} = S_{a2}$, так как $E_1 I_1 = E_2 I_2$.

Отсюда найдем расчетную мощность автотрансформатора при номинальных значениях токов и напряжений

$$S_a = U_{1н} I_{1н} \left(1 - \frac{w_2}{w_1} \right) = U_{2н} I_{2н} \left(1 - \frac{w_2}{w_1} \right) = S_н \left(1 - \frac{w_2}{w_1} \right).$$

Размеры автотрансформатора рассчитывают для мощности

$$S_a = S_н \left(1 - \frac{w_2}{w_1} \right),$$

тогда как размеры двухобмоточного трансформатора рассчитывают для мощности $S_н$.

Глава 4. НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В обычных условиях эксплуатации трехфазной сети нагрузку удастся распределить достаточно равномерно на все три фазы. Однако бывают случаи, когда нагрузки фаз сильно отличаются друг от друга, например при питании мощных однофазных печей. При этом системы токов и напряжений получаются несимметричными. Резко несимметричную систему токов получим, очевидно, при несимметричных коротких замыканиях: двухфазном и однофазном. При исследовании работы трансформаторов, имеющих несимметричную нагрузку, применяют *метод симметричных составляющих*. Его также широко применяют при исследовании несимметричных режимов работы трехфазных генераторов и двигателей, поскольку он позволяет наиболее просто и достаточно точно разрешить многие возникающие при этом вопросы.

4.1. Метод симметричных составляющих

Сущность метода симметричных составляющих состоит в том, что каждый фазный ток (или фазное напряжение) заменяется тремя его составляющими:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a3}; \quad (1)$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{b3}; \quad (2)$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{c3}. \quad (3)$$

Величины $\dot{I}_{a0}, \dot{I}_{b0}, \dot{I}_{c0}$ принимаются равными друг другу и равными одной трети суммы фазных токов

$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c). \quad (4)$$

Эти величины называют *составляющими нулевой последовательности*, так как они образуют три равных временных вектора с нулевым сдвигом между ними.

Если из каждого тока данной несимметричной системы вычесть его нулевую составляющую, то получим новую систему токов, сумма которых согласно выражению (4) равна нулю,

$$(\dot{I}_a - \dot{I}_{a0}) + (\dot{I}_b - \dot{I}_{b0}) + (\dot{I}_c - \dot{I}_{c0}) = 0.$$

С учетом выражений (1) – (3) можем написать

$$(\dot{I}_{a1} + \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{c1}) + (\dot{I}_{a2} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{c2}) = 0. \quad (5)$$

Здесь системы токов, стоящих в скобках, будем считать трехфазными симметричными системами. Однако если принять порядки чередования фаз той и другой систем одинаковыми, то их сумма даст симметричную систему, что в общем случае не будет соответствовать системе токов уравнения (5). Следовательно, мы должны считать, что одна из систем токов имеет порядок чередования фаз, обратный по отношению к порядку чередования фаз другой системы. В соответствии с этим систему токов $\dot{I}_{a1}, \dot{I}_{b1}, \dot{I}_{c1}$ называют *системой прямой последовательности* (порядок чередования этих токов обычно такой же, как и токов уравнения (5)), а систему токов $\dot{I}_{a2}, \dot{I}_{b2}, \dot{I}_{c2}$ – *системой обратной последовательности*.

Для удобства вычислений вводят комплексный коэффициент

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos\frac{2\pi}{3} + j \sin\frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Умножение вектора на этот коэффициент не изменяет его абсолютного значения, но изменяет его аргумент на $\frac{2\pi}{3}$, т. е. поворачивает вектор на угол $\frac{2\pi}{3}$ в сторону вращения векторов. Очевидно, что умножение на a^2 дает поворот вектора на угол $\frac{4\pi}{3}$ в ту же сторону. Также очевидно, что

$$a^3 = 1; 1 + a + a^2 = 0; a^4 = a^3; a = a. \quad (6)$$

Уравнения (1) – (3) после введения в них коэффициентов a и a^2 и с учетом (4) перепишем в следующем виде:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a3}; \quad (7)$$

$$\dot{I}_b = a^2\dot{I}_{a1} + a\dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}; \quad (8)$$

$$\dot{I}_c = a\dot{I}_{a1} + a^2\dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}. \quad (9)$$

Написанные уравнения позволяют при заданных токах найти их симметричные составляющие. Составляющие нулевой последовательности $\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0}$ определяются по формуле (4). Составляющие прямой и обратной последовательностей определяются следующим образом.

Умножим уравнение (8) на a и уравнение (9) на a^2 . Сложив полученные уравнения с уравнением (7) и учитывая выражение (6), будем иметь

$$\dot{I}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c). \quad (10)$$

Если умножить уравнение (8) на a^2 и уравнение (9) на a , то, сложив три уравнения, получим

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c). \quad (11)$$

Таким образом, по уравнениям (4), (10) и (11) при заданных токах I_a, I_b, I_c могут быть определены их симметричные составляющие (на рис. 4.1 показаны токи I_a, I_b, I_c и их симметричные составляющие).

Аналогичные уравнения получаются для симметричных составляющих заданной системы напряжений $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$. Фазные токи или напряжения в общем случае имеют составляющие всех трех последовательностей; линейные токи (при соединении «треугольником») и напряжения могут иметь только составляющие прямой и обратной последовательностей.

В обычных случаях системы симметричных составляющих токов или напряжений можно рассматривать независимо одну от другой и при исследовании несимметричной нагрузки исходить из принципа наложения. Если,

например, трехфазная система сопротивлений симметрична, то можно считать, что токи любой последовательности вызовут падения напряжения – активные и реактивные – только той же самой последовательности. В применении к трехфазным трансформаторам мы должны считать $Z_{12} = \text{const}$, т. е. пренебречь изменением насыщения, или считать $Z_{12} = \infty$, т. е. пренебречь током холостого хода.

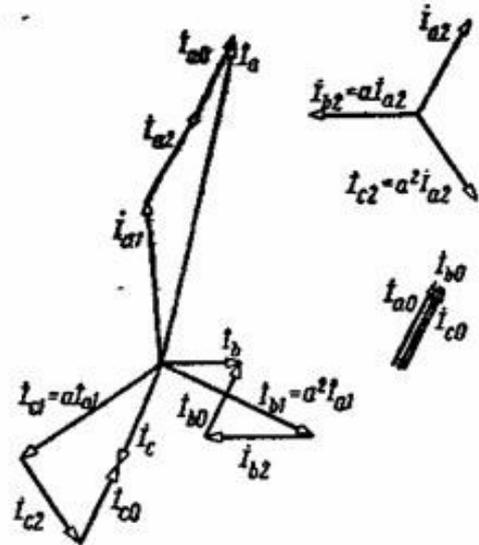


Рис. 4.1. Несимметричная система токов I_a, I_b, I_c и их симметричные составляющие

4.2. Несимметричная нагрузка трехфазного трансформатора при соединении его обмоток Y/Y_0

Будем пренебрегать током холостого хода при всех случаях несимметричной нагрузки трансформатора и при всех соединениях его обмоток и считать, что нам заданы линейные первичные напряжения и вторичные токи.

В трансформаторах сопротивления Z_1 , Z_2 и Z_k для токов прямой последовательности равны тем же сопротивлениям для токов обратной последовательности. Это следует из того факта, что сопротивления трансформатора не изменятся, если мы при его симметричной нагрузке поменяем местами два провода на его первичной стороне.

Рассматриваемому здесь случаю соответствует схема, показанная на рис. 4.2.

Согласно этой схеме напишем уравнения токов:

$$I_A + I_B + I_C = 0; \quad (12)$$

$$I_a + I_b + I_c + I_0 = 0. \quad (13)$$

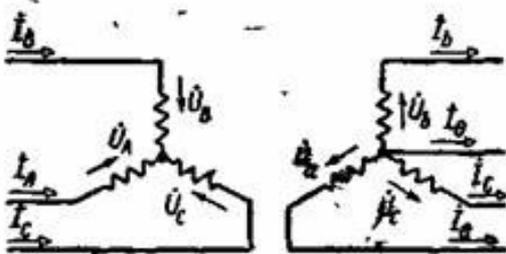


Рис. 4.2. Несимметричная нагрузка трансформатора при соединении его обмоток Y/Y_0

Система вторичных токов согласно выражению (4) имеет составляющие нулевой последовательности

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = \frac{1}{3} I_0. \quad (14)$$

Соотношения между первичными и вторичными токами определяются следующим образом.

Обратимся к рис. 4.3, где схематически изображен трансформатор с условными положительными направлениями токов в его обмотках.

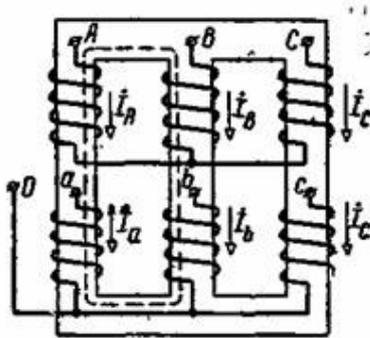


Рис. 4.3. К определению соотношений между первичными и вторичными токами

Поскольку мы пренебрегаем током холостого хода, то, согласно закону полного тока, полный ток сквозь любой магнитный контур по сердечнику (например, показанный пунктиром на рис. 4.3) равен нулю. Поэтому, считая $w_1 = w_2$, мы можем написать для контуров, образованных стержнями $A - B$ и $A - C$ и соответствующими ярами, следующие уравнения:

$$\begin{aligned} I_A + I_a - I_b - I_B &= 0; \\ I_A + I_a - I_c - I_C &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Из этих уравнений и уравнения (12) получим:

$$\begin{aligned} I_A &= -I_a - \frac{1}{3} I_0; \\ I_B &= -I_b - \frac{1}{3} I_0; \\ I_C &= -I_c - \frac{1}{3} I_0. \end{aligned}$$

Заменив токи их симметричными составляющими и учитывая формулу (14), будем иметь:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} = -\dot{I}_{a1} - \dot{I}_{a2}; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} = -\dot{I}_{b1} - \dot{I}_{b2}; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} = -\dot{I}_{c1} - \dot{I}_{c2}. \end{aligned} \quad (16)$$

Из выражений (16) следует, что в трансформаторе при данном соединении его обмоток трансформируются только токи прямой и обратной последовательностей, токи же нулевой последовательности будут иметь место только во вторичной обмотке. Поэтому в магнитном контуре, проходящем по любому из стержней сердечника и вне его, НС обмоток не будут уравновешены. Здесь возникает магнитное поле, созданное НС I_{a0} . На рис. 4.4 показана приближенная картина этого поля масляного трансформатора.

Можно считать, что в стержнях трансформатора имеют место потоки нулевой последовательности Φ_0 , созданные токами нулевой последовательности и накладывающиеся на потоки в стержнях Φ_A , Φ_B , Φ_C , которые соответствуют напряжениям прямой и обратной последовательностей, приложенным с первичной стороны. Очевидно, что $\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$, так же как и наведенные ими ЭДС $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$.

На рис. 4.5 представлена диаграмма ЭДС, наведенных в фазах обмоток указанными потоками.

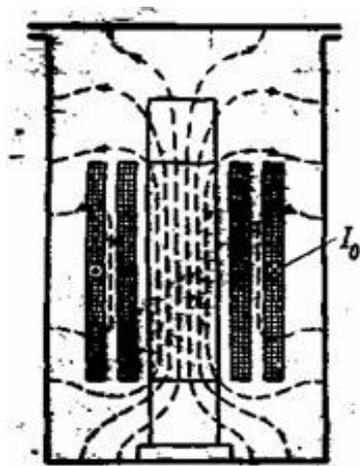


Рис. 4.4. Приближенная картина поля, созданного токами нулевой последовательности

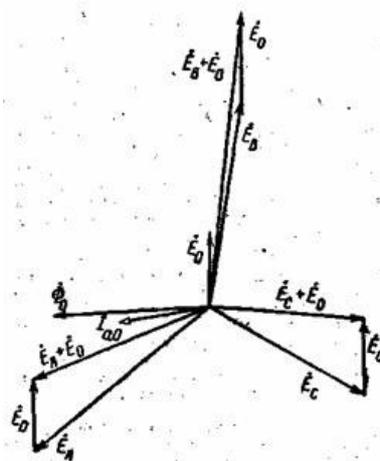


Рис. 4.5 Векторная диаграмма ЭДС в обмотках трансформатора при несимметричной нагрузке

4.3. Несимметричная нагрузка трехфазного трансформатора при соединении обмоток Δ/Y_0

Рассматриваемому случаю соответствует схема, представленная на рис. 4.6.

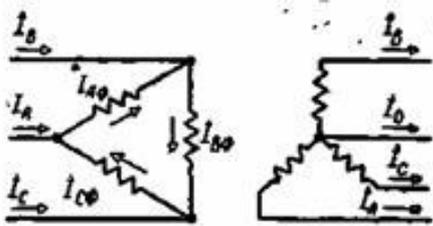


Рис. 4.6. Несимметричная нагрузка трансформатора при соединении его обмоток Δ/Y_0

На вторичной стороне мы имеем такие же токи, как в предыдущем случае (см. рис. 4.2). Для них действительно уравнение (13), т. е. в общем случае система вторичных токов имеет все три симметричные составляющие.

В первичной обмотке, соединенной «треугольником», фазные токи также будут иметь наряду с составляющими прямой и обратной последовательностей составляющие нулевой последовательности. Последние возникнут потому, что ЭДС \dot{E}_0 (ЭДС нулевой последовательности) в фазах, соединенных «треугольником», направлены все в одну сторону в любой момент времени. В магнитном отношении они должны уравновесить токи нулевой последовательности вторичной обмотки. Следовательно, НС обмоток на каждом стержне будут взаимно уравновешиваться, первичная и вторичная обмотки каждой фазы могут рассматриваться как обмотки отдельного однофазного трансформатора.

Первичные фазные токи равны

$$\dot{I}_{A\phi} = \dot{I}_{A\phi 1} + \dot{I}_{A\phi 2} + \dot{I}_{A\phi 0};$$

$$\dot{I}_{A\phi 1} = -\dot{I}_{a1}; \dot{I}_{A\phi 2} = -\dot{I}_{a2}; \dot{I}_{A\phi 0} = -\dot{I}_{a0};$$

$$\dot{I}_{B\phi} = \dot{I}_{B\phi 1} + \dot{I}_{B\phi 2} + \dot{I}_{B\phi 0};$$

$$\dot{I}_{B\phi 1} = -\dot{I}_{b1}; \dot{I}_{B\phi 2} = -\dot{I}_{b2}; \dot{I}_{B\phi 0} = -\dot{I}_{b0};$$

$$\dot{I}_{C\phi} = \dot{I}_{C\phi 1} + \dot{I}_{C\phi 2} + \dot{I}_{C\phi 0};$$

$$\dot{I}_{C\phi 1} = -\dot{I}_{c1}; \dot{I}_{C\phi 2} = -\dot{I}_{c2}; \dot{I}_{C\phi 0} = -\dot{I}_{c0}.$$

Линейные токи, конечно, не будут иметь составляющих нулевой последовательности

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A\phi} - \dot{I}_{C\phi}; \dot{I}_B = \dot{I}_{B\phi} + \dot{I}_{B\phi 2} - \dot{I}_{A\phi}; \dot{I}_C = \dot{I}_{C\phi} - \dot{I}_{B\phi}.$$

Связь между вторичными и первичными напряжениями устанавливается уравнениями напряжений. Здесь $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$ – напряжения,

приложенные к фазам первичной обмотки: сопротивление Z_H при соединении обмоток Y/Y_0 значительно меньше, чем при Y/Y , так как первое в основном определяется полем рассеяния, таким же, как и поле рассеяния созданное токами прямой или обратной последовательности. Значение z_H при соединении обмоток Δ/Y_0 может быть найдено опытным путем. Здесь также $z_H = \frac{U}{3I}$.

Схема замещения для Z_H трансформатора при соединении его обмоток Δ/Y_0 приведена на рис. 4.7.

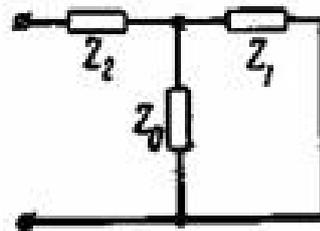


Рис. 4.7. Схема замещения для Z_H трансформатора при соединении его обмоток Δ/Y_0

4.4. Несимметричная нагрузка трансформаторов при соединении обмоток Y/Y , Y/Δ , Δ/Y

Здесь мы не будем иметь во вторичной и первичной обмотках токи нулевой последовательности, следовательно, не будем иметь для обмотки, соединенной «звездой», смещения потенциала нулевой точки относительно центра тяжести треугольника линейных напряжений.

При данных соединениях обмоток мы можем рассматривать первичную и вторичную обмотки каждой фазы как независимый однофазный трансформатор. Уравнения напряжений (если в них взять $I_{a0} = 0$) могут быть использованы при определении вторичных напряжений для заданных первичных напряжений, вторичных токов (при известных параметрах трансформатора $Z_k = r_k + jx_k$). При помощи тех же уравнений могут быть определены фазные и линейные токи при двухфазных коротких замыканиях.

Глава 5. ТРАНСФОРМАТОРЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

5.1. Трансформаторы напряжения

Трансформаторы напряжения (ТН) (рис. 5.1) служат для понижения напряжения (обычно до 100 – 150 В), так как вольтметры и катушки напряжения ваттметров и счетчиков (или реле) не могут быть включены непосредственно на высокое напряжение из-за недостаточной изоляции измерительных приборов и необходимости обеспечить безопасность обслуживающего персонала.

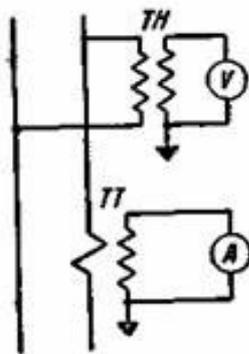


Рис. 5.1. Схема включения трансформаторов напряжения (ТН) и трансформаторов тока (ТТ)

Трансформаторы напряжения выполняются как двухобмоточные трансформаторы и электрически отделяют цепь приборов от цепи высокого напряжения; их вторичная цепь надежно заземляется.

По принципу действия ТН не отличаются от ранее рассмотренных двухобмоточных трансформаторов. Для их исследования можно применить уравнения напряжений и токов. Из этих уравнений следует

$$\frac{-\dot{U}'_2}{\dot{U}_1} = \frac{Z'}{Z_1 + C_1 Z'_2 + C_1 Z'} \quad (1)$$

где $C_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_{12}}$ – комплексный коэффициент;

$Z' = Z \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2$ – сопротивление прибора, приведенное к числу витков первичной обмотки.

При расчете ТН и его выполнении стремятся к тому, чтобы погрешности, вносимые им в измерения, были как можно меньше. Различают следующие погрешности измерения: *погрешность напряжения*

$$f_u = \frac{U_2 \frac{w_1}{w_2} - U_1}{U_1} \cdot 100\%$$

и *угловая погрешность* δ_u , равная углу между $-\dot{U}'_2$ и \dot{U}_1 (δ_u измеряется в минутах и принимается положительной, когда $-\dot{U}'_2$ опережает \dot{U}_1).

Из уравнения (1) следует, что обе погрешности $-f_u$ и δ_u – будут тем меньше, чем больше сопротивление прибора Z' , чем меньше Z_1 , и Z'_2 и чем ближе C_1 к единице.

Трансформаторы напряжения имеют максимальные погрешности в зависимости от класса точности, установленные ГОСТом: класс 0,5 – $f_u = \pm 0,5 \%$ и $\delta_u = \pm 20'$; класс 1 – $f_u = \pm 1 \%$, и $\delta_u = \pm 40'$; класс 3 – $f_u = \pm 3 \%$ (δ_u не нормируется). Прецизионные трансформаторы напряжения для точных лабораторных измерений имеют $f_u \approx \pm 0,2 \%$ и $\delta_u \approx \pm 10'$.

Номинальные мощности ТН лежат примерно в пределах 25 – 300 ВА. Они обычно могут быть длительно нагружены по условиям нагрева (без соблюдения точности в отношении f_u и δ_u) до мощности, в 5 – 8 раз превышающей номинальную.

5.2. Трансформаторы тока

Трансформаторы тока (ТТ) также выполняют в виде двухобмоточных трансформаторов. Их первичную обмотку включают в цепь последовательно с потребителями, ток которых надо измерить; во вторичную обмотку включают амперметр, реле, а при измерении мощности и энергии – токовые катушки ваттметра и счетчика. Все приборы во вторичной цепи соединяют последовательно.

При помощи ТТ цепь приборов электрически отделяется от первичной цепи и вторичная обмотка надежно заземляется, что необходимо, если первичная обмотка включена в цепь высокого напряжения.

Отношение токов ТТ практически равно обратному отношению чисел витков $\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_1}{w_2}$. Последнее обычно подбирают таким образом, чтобы при номинальном первичном токе $I_{1н}$ номинальный вторичный ток был равен 5 или 1 А. При больших значениях $I_{1н}$ часто выбирают $w_1 = 1$. В этом случае получается одновитковый трансформатор тока. Здесь первичной обмоткой служит шина (или круглый проводник), которая проходит внутри сердечника; на сердечнике помещают вторичную обмотку с числом витков w_2 .

Исследование ТТ может быть проведено с помощью схемы замещения или уравнений напряжений и токов. Из этих уравнений следует

$$\frac{-\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} = \frac{Z_{12}}{Z_{12} + Z'_2 + Z'}, \quad (2)$$

где $Z' = Z \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2$ – сопротивление нагрузки (всех последовательно соединенных приборов), приведенное к числу витков первичной обмотки.

Равенство (2) показывает, что отношение токов будет тем ближе к обратному отношению чисел витков, чем меньше Z' и Z'_2 по сравнению с Z_{12} . Поэтому стремятся к уменьшению суммы ($Z' + Z'_2$) и увеличению Z_{12} . Последнее, как известно, зависит от индуктивного сопротивления взаимной индукции x_{12} , для увеличения которого надо снизить магнитное сопротивление по току в сердечнике трансформатора, что достигается за счет уменьшения его насыщения.

При ТТ различают следующие погрешности измерения: *токовую погрешность*

$$f_i = \frac{I_2 \frac{w_2}{w_1} - I_1}{I_1} \times 100\%$$

и *угловую погрешность* δ_i , равную углу сдвига по фазе между $-\dot{I}'_2$ и \dot{I}_1 (δ_i измеряется в минутах и принимается положительным, когда $-\dot{I}'_2$ опережает \dot{I}_1). Токовая и угловая погрешности изменяются с изменением тока I_1 и Z' . Поэтому при точных измерениях желательно иметь калибровочные кривые $f_i, \delta_i = f\left(\frac{I_1}{I_{\text{нр}}}\right)$.

В зависимости от допускаемых погрешностей согласно ГОСТу различают пять классов точности ТТ: 0,2; 0,5; 1; 3 и 10.

Приведенные числа указывают допускаемую для данного класса токовую погрешность в процентах при номинальном первичном токе. Угловая погрешность при том же первичном токе не должна быть соответственно больше 10, 40 и 80 минут для первых трех классов; для классов 3 и 10 она не нормируется.

Первичные номинальные токи стандартизованы в пределах $5 + 15\ 000$ А. Вторичные номинальные токи имеют два стандартных значения: 5 и 1 А. При токе 5 А общее сопротивление нагрузки колеблется в пределах $0,2 \div 2,0$ Ом, а при токе 1 А – $5 \div 30$ Ом.

Трансформаторы тока должны быть механически достаточно прочными, чтобы выдержать электродинамические воздействия, возникающие при аварийном повышении первичного тока.

Особенность ТТ по сравнению с ТН в том, что магнитный поток первого при неизменном токе в первичной обмотке и переменном сопротивлении нагрузке будет изменяться. При большом сопротивлении нагрузке магнитный поток ТТ может возрасти до чрезмерного значения. Режим работы при разомкнутой вторичной обмотке следует счи-

тять аварийным, так как при этом магнитный поток и индукция в сердечнике будут иметь наибольшие значения, что приведет не только к большому увеличению магнитных потерь и, следовательно, нагреву трансформатора, но и к значительному возрастанию напряжения на разомкнутых зажимах вторичной обмотки. В этом случае магнитный поток будет создаваться только током I_1 (при отсутствии размагничивающего вторичного тока I_2) и напряжение вторичной обмотки может достигнуть опасных значений. Здесь следует учитывать, что максимальное значение напряжения опасно, а оно вследствие уплощения кривой потока ($\Phi = f(t)$) при синусоидальном намагничивающем токе может значительно возрасти: например, у многовитковых трансформаторов тока отношение максимального напряжения к действующему часто получается равным $2,0 \div 2,5$, а не $\sqrt{2}$, как при синусоидальной кривой напряжения.

Кроме того, намагничивание сердечника ТТ в режиме разомкнутой вторичной обмотки при последующем его использовании из-за остаточного магнетизма может давать большие погрешности в измерениях, не соответствующие его калибровочным кривым.

5.3. Сварочные трансформаторы

Для дуговой электросварки применяют трансформаторы с повышенным рассеянием, или трансформаторы при последовательном включении с дугой регулируемой реактивной катушки (рис. 5.2).

Повышение рассеяния в трансформаторе достигается размещением первичной и вторичной обмоток на разных стержнях и использованием магнитного шунта между стержнями.

Вторичное напряжение сварочного трансформатора выбирают равным $40 \div 70$ В, что соответствует напряжению зажигания дуги при переменном токе. Для устойчивого и непрерывного горения дуги требуется, чтобы внешняя характеристика (зависимость напряжения дуги от тока) была резко падающей (рис. 5.3) и чтобы цепь имела большое индуктивное сопротивление.

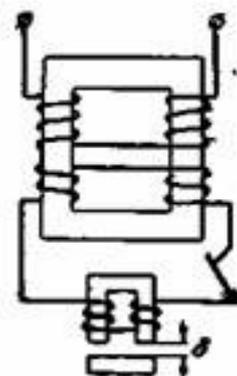


Рис. 5.2. Схема сварочного трансформатора с регулируемой реактивной катушкой

На практике наиболее часто применяют схему, показанную на рис. 5.3, при которой путем изменения зазора δ в сердечнике реактивной катушки можно изменять номинальный ток дуги. Такую схему применяют при многопостовой сварке; при этом она позволяет от одного трансформатора (обычно трехфазного) одновременно питать несколько постов, каждый из которых имеет свою реактивную катушку.

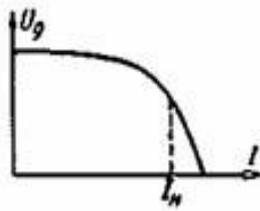


Рис. 5.3. Внешняя характеристика при дуговой сварке

5.4. Регулировочные трансформаторы

Силовые трансформаторы снабжаются ответвлениями обычно от обмотки ВН, позволяющими изменять число витков последней на $\pm 5\%$, или на $\pm 2 \cdot 2,5\%$. В мощных трансформаторах ответвления, как правило, делают в середине обмотки (по высоте), так как в этом случае при внезапном коротком замыкании в меньшей степени возрастают аксиальные электромагнитные силы, действующие на обмотки.

На рис. 5.4 показаны различные способы размещения ответвлений от средней части обмотки (по высоте), и здесь же указаны их обозначения согласно ГОСТу.

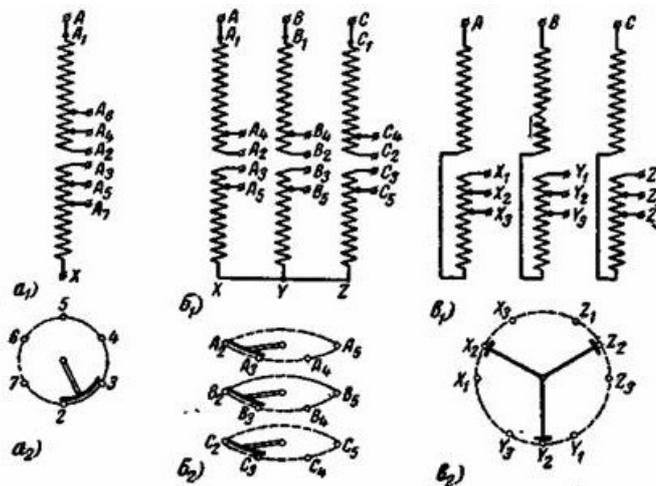


Рис. 5.4. Способы размещения ответвлений от средней части обмотки (a_1 , b_1 , v_1) и соответствующие им переключатели ответвлений (a_2 , b_2 , v_2).

В современных трансформаторах переключения производят при помощи контактного переключателя, имеющего в обычных случаях систему неподвижных контактов, соединенных с ответвлениями, и систему движущихся контактов, замыкающих разные пары неподвижных контактов.

Переключения ответвлений при помощи переключателя, рукоятку которого выводят наружу на крышку или на боковую сторону бака трансформатора, производят только после отключения трансформатора от первичной и вторичной сетей. В трансформаторах устаревших конструкций, еще встречающихся на практике, ответвления выводили наружу при помощи проходных изоляторов с тремя зажимами; здесь переключения делают вручную.

Регулируемыми трансформаторами обычно называют трансформаторы, позволяющие регулировать вторичное напряжение под нагрузкой. Для этого используют переключатель, при котором осуществляется изменение числа витков обмотки без разрыва цепи. Наиболее часто используют переключатель с токоограничивающим реактором, принципиальная схема которого показана на рис. 5.5.

При указанном на рисунке положении, когда переключатели a и b соединены с одной и той же пластиной 1 и когда выключатели B_1 и B_2 включены, токи в обеих половинах обмотки реактора P направлены противоположно друг другу и поэтому сопротивление реактора мало. При изменении числа витков в процессе переключений сначала выключается B_1 , затем переключатель a переводится на пластину 2 и B_1 снова включается. Теперь по реактору кроме рабочего проходит ток, вызванный напряжением между точками 1 и 2. Но этот ток будет проходить по обеим половинам обмотки реактора в одном и том же направлении, вследствие чего возрастет его индуктивное сопротивление и ток не будет превышать некоторого допустимого значения. После этого выключается B_2 , переключатель b переводится на пластину 2 и B_2 снова включается. Таким образом, переход переключателей a и b производится практически без разрыва цепи при очень небольших токах. Все переключающее устройство автоматизируется. Оно обычно помещается в специальном баке, пристраиваемом сбоку к главному баку трансформатора.

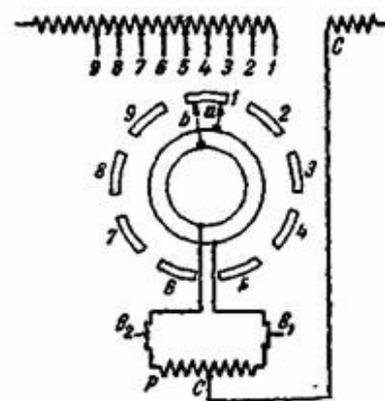


Рис. 5.5. Схема переключения обмотки трансформатора под нагрузкой с токоограничивающим реактором (ответвления от обмотки соединяются с соответственно пронумерованными пластинами переключателя)

Контрольные вопросы

1. Каковы устройство и принцип действия однофазного трансформатора?
2. Какие параметры можно определить с помощью опыта холостого хода?
3. Какие параметры можно определить с помощью опыта короткого замыкания?
4. Какова внешняя характеристика трансформатора?
5. Каковы потери и КПД трансформатора?
6. Постройте векторную диаграмму и покажите аналитические зависимости для ее построения.
7. Постройте схему замещения трансформатора.
8. Постройте связь электродвижущей силы и магнитного потока трансформатора.
9. Что такое приведенный трансформатор?
10. Каков закон полного тока для трансформатора?
11. Напишите уравнение электрического равновесия трансформатора.
12. Напишите уравнения магнитодвижущей силы и токов однофазного трансформатора.
13. Как определить начала и концы обмоток трансформатора?
14. Постройте схемы и группы соединений обмоток трансформатора.
15. Как определяют приведенные параметры вторичной обмотки?
16. Какие бывают способы охлаждения трансформаторов?
17. Каков результат включения трансформатора в сеть постоянного напряжения?
18. В чем конструктивное отличие обмоток высокого напряжения от обмоток низкого напряжения? Как обозначают их выводы?
19. Какими потерями пренебрегают при опытах короткого замыкания и холостого хода и почему?
20. Каково назначение измерительных трансформаторов?
21. Как определить опытным путем напряжение короткого замыкания?
22. Почему в технической характеристике трансформатора указывают полную номинальную мощность?
23. Какими параметрами определяется качество трансформаторного масла?

24. Как изменится магнитный поток трансформатора при уменьшении нагрузки, сечения магнитопровода, частоты питающей сети, индукции стали?
25. Как изменяется ток холостого хода трансформатора?
26. Каковы принципы регулирования напряжения трансформаторов (принципы РБВ и РПН)?
27. Каковы условия включения трансформаторов на параллельную работу?
28. Каковы преимущества трехобмоточного трансформатора?
29. Как регулируют ток сварочных трансформаторов?
30. Каковы требования к обмоткам трансформатора?
31. Какие требования предъявляют к защите трансформатора от аварийных режимов работы?
32. Определите номинальные токи в обмотках понижающего трансформатора по паспортным данным.
33. Каковы требования, предъявляемые к сердечнику трансформатора?
34. Какую математическую функцию выполняет трансформатор?
35. Как определяют оптимальный КПД трансформатора?
36. Как определить постоянные и переменные потери в трансформаторе?
37. Какими способами можно определить коэффициент трансформации?
38. Что обозначает 11-я группа соединения обмоток?
39. Как определяют годовой экономический КПД трансформатора?
40. Объясните процесс работы трансформатора при нагрузке и саморегулировании.
41. Почему в стержневом магнитопроводе используют пластины различной ширины?
42. Как определить опытным путем число витков недоступной обмотки трансформатора?
43. Как построить кривую намагничивания сердечника трансформатора при помощи ЛАТРа, амперметра и вольтметра?
44. Объясните процесс саморегулирования в трансформаторе.
45. Как защитить трансформаторы от аварийных режимов работы?
46. Как определить число витков дополнительной обмотки трансформатора на заданное напряжение?

Глава 6. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

6.1. Общие замечания

Асинхронные машины применяют на практике главным образом как двигатели. Наибольшее распространение имеют трехфазные асинхронные двигатели. Они находят самое широкое применение на заводах, фабриках, в сельском хозяйстве, на строительных работах, служат в качестве вспомогательных механизмов электрических станций. Особенно востребованы трехфазные двигатели мощностью от 0,4 до 100 кВт. Такие двигатели массового применения электромашиностроительные заводы выпускают ежегодно на миллионы киловатт. Большое количество двигателей выпускают также на мощности свыше 100 кВт.

Однофазные асинхронные двигатели в настоящее время выполняют, как правило, в виде малых машин и обычно на мощности не выше 0,5 кВт.

Обмотки статора и ротора асинхронных машин между собой электрически не связаны; между ними существует только магнитная (трансформаторная) связь, называемая также индуктивной, что дало повод назвать асинхронные машины *индукционными*.

Обмотка статора обычно является первичной обмоткой при работе машины двигателем, так как к ней в этом случае подводится электрическая энергия. Токи обмотки статора совместно с токами обмотки ротора создают в двигателе вращающееся магнитное поле. Обмотка ротора при этом служит в качестве вторичной. Токи, наведенные в ней вращающимся полем, взаимодействуя с последним, создают электромагнитные силы, заставляющие ротор вращаться.

Асинхронные двигатели выполняют или с короткозамкнутой обмоткой на роторе, или с обмоткой на роторе (обычно трехфазной), соединенной с контактными кольцами. В соответствии с этим различают *короткозамкнутые двигатели* и *двигатели с контактными кольцами*. Последние называют также двигателями с фазным ротором.

На щитке асинхронного двигателя указывают следующие его номинальные величины:

- 1) мощность на валу (кВт или Вт);

- 2) линейное напряжение обмотки статора (В);
- 3) линейный ток (А);
- 4) частота тока (Гц);
- 5) частота вращения ротора (число оборотов в минуту);
- 6) КПД;
- 7) коэффициент мощности (косинус угла сдвига фаз между напряжением и током фазы обмотки статора);
- 8) напряжение на контактных кольцах (при неподвижном роторе) и ток обмотки ротора (при номинальном режиме) для двигателя с контактными кольцами.

Кроме того, на щитке указывают схему соединений обмотки статора, режим работы (продолжительный, кратковременный или повторно-кратковременный), для которого предназначен двигатель, и полный его вес в килограммах.

6.2. Устройство и основные элементы конструкции

Основные части машины – статор и ротор. Их сердечники собирают из листов электротехнической стали (рис. 6.1), которые до сборки обычно покрывают с обеих сторон специальным лаком.

Тем самым предотвращается образование больших вихревых токов в стали сердечников. Иногда сердечники небольших двигателей собирают из листов без покрытия последних лаком, так как окалина на внешних поверхностях листов создает достаточную изоляцию между ними.

На рис. 6.1 показаны листы, из которых собирают статор и ротор машин небольшой и средней мощности. Их обычно штампуют при помощи прессы, позволяющего одним ударом получить необходимую форму листа со всеми отверстиями. Отверстия на внутренней окружности листов статора и на внешней окружности листов ротора после их сборки образуют пазы статора и ротора, в которые закладываются проводники обмоток.

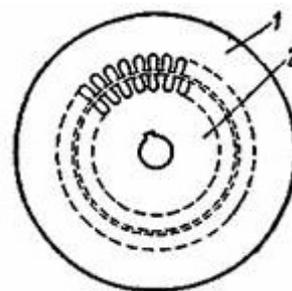
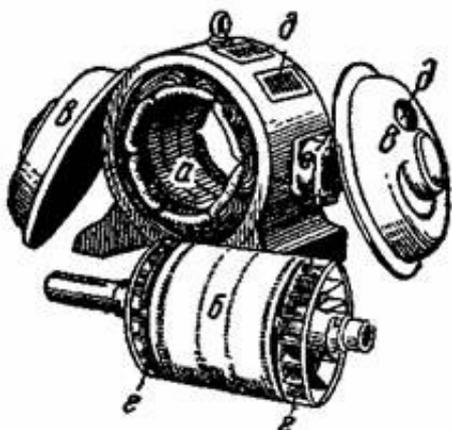
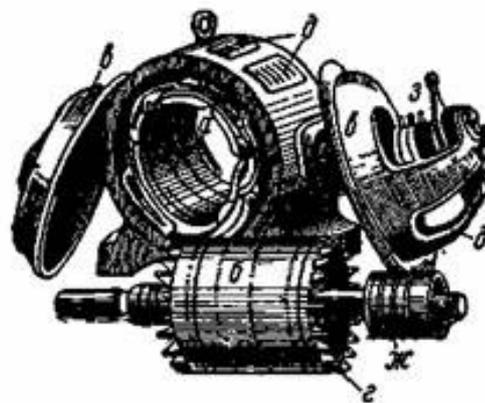


Рис. 6.1. Листы сердечников:
1 – статора;
2 – ротора

На рис. 6.2 и 6.3 показаны в разобранном виде двигатели – короткозамкнутый и с контактными кольцами.



*Рис. 6.2. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в разобранном виде:
а – статор; б – ротор;
в – подшипниковые щиты;
г – вентилятор;
д – отверстия для входа и выхода охлаждающего воздуха; е – коробка, прикрывающая зажимы*



*Рис. 6.3. Асинхронный двигатель с контактными кольцами в разобранном виде: а – статор;
б – ротор; в – подшипниковые щиты;
г – вентилятор; д – отверстия для входа и выхода охлаждающего воздуха;
е – коробка, прикрывающая зажимы;
ж – контактные кольца,
з – щеткодержатели и щетки*

6.3. Обмотки статора и ротора

Обмотки и сердечники статора и ротора – основные части электрической машины. Они и создают в машине условия для электромагнитных процессов, протекающих при преобразовании электрической энергии в механическую или при обратном преобразовании.

Рассмотрим обмотки статора. Они одинаковы как у асинхронных, так и у синхронных машин. Обмотки состоят из витков, заложенных в пазы статора и соединенных между собой по особым правилам.

6.3.1. Электродвижущая сила витка

На рис. 6.4 показаны статор и один виток его обмотки. Стороны витка, уложенные в пазы, представляют собой его активные части. Часть витка, находящуюся вне пазов статора, называют **лобовой частью** или **лобовым соединением**.

Внутри статора вращается электромагнит или постоянный магнит с двумя полюсами. При этом мы получаем вращающееся поле; его

индукционные линии показаны только в воздушном зазоре между статором и ротором. Примем это поле синусоидальным, т. е. будем считать, что кривая распределения индукции B (ее нормальной составляющей) в воздушном зазоре вдоль внутренней окружности статора представляет собой синусоиду (см. рис. 6.4, б).

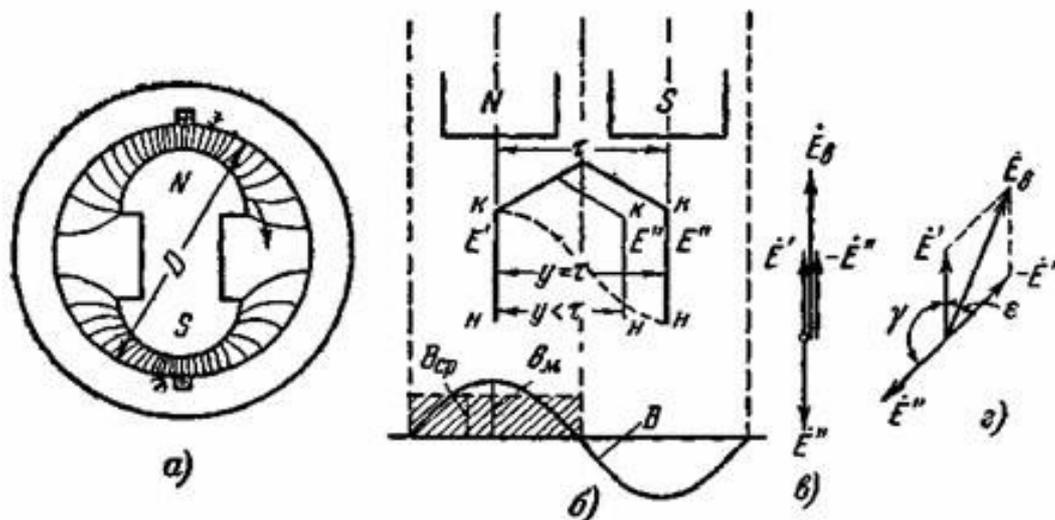


Рис. 6.4. Статор с одним витком и наведение ЭДС в витке

Поле, близкое к синусоидальному, удастся получить, выбрав надлежащим образом форму очертания полюсного наконечника.

При вращении поля в проводниках будут наводиться ЭДС, направления которых для выбранного момента времени найдем по правилу правой руки, учитывая направление перемещения проводника относительно поля. Очевидно, эти ЭДС при постоянной скорости вращения будут изменяться во времени синусоидально. Поэтому мы их можем изобразить временными векторами \dot{E}' и \dot{E}'' . Электродвижущие силы \dot{E}' и \dot{E}'' сдвинуты по фазе на 180° . Такому сдвигу соответствует расстояние между проводниками, равное полюсному делению τ . **Полюсным делением** называют расстояние между осями соседних полюсов, взятое по внутренней окружности статора.

Электродвижущая сила витка равна векторной разности ЭДС проводников

$$\dot{E}_e = \dot{E}' - \dot{E}'' ,$$

так как при образовании витка его стороны соединяются встречно: конец одного проводника соединяется с концом другого проводника. При прямом соединении проводников, показанном на рис. 6.4, б пунктиром,

ЭДС витка была бы равна векторной сумме ЭДС проводников, т. е. в данном случае была бы равна нулю.

Ширина витка взята равной τ . Она определяет шаг обмотки, который обозначают через y . Обмотки, состоящие из таких витков (при $y = \tau$), называют **диаметральными** или **обмотками с полным шагом**. Обмотки с витками, ширина которых меньше полюсного деления ($y < \tau$), называются **хордовыми** или **обмотками с укороченным шагом**.

6.3.2. Электродвижущие силы катушки, катушечной группы и фазы обмотки

Если вместо одного витка взять катушку, состоящую из w_k витков, то ЭДС в катушке будет в w_k раз больше, чем в одном витке,

$$E_k = w_k E_{\text{к}} = 4,44 f k_y w_k \Phi_m.$$

Обмотка статора обычно состоит из катушек, равномерно сдвинутых одна относительно другой по окружности статора. Стороны катушек закладывают в пазы. В паз закладывают или одну катушечную сторону, или две катушечные стороны одну над другой. В соответствии с этим различают *однослойные* и *двухслойные обмотки*.

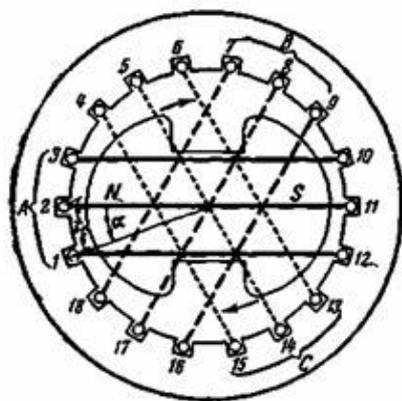


Рис. 6.5. Трехфазная обмотка статора при $2p = 2$ и $q = 3$

На рис. 6.5 представлен статор двухполюсной машины с трехфазной однослойной обмоткой. Каждая фаза здесь состоит из трех катушек, образующих катушечную группу. При вращении внутри статора электромагнита с двумя полюсами в катушечных группах будут наводиться ЭДС, сдвинутые по фазе на 120° , так как оси катушечных групп сдвинуты по окружности статора на $2/3\tau$.

Общее число пазов на окружности статора обозначают через Z . На полюсное деление приходится $Q = Z/(2p)$ пазов. Поскольку на одном полюсном делении расположены три фазные зоны, то на каждую фазную зону приходится

$$q = \frac{Q}{3} = \frac{2}{3 \cdot 2p}$$

пазов на полюс и фазу.

Катушечные стороны, заложенные в пазы, равномерно распределены по окружности статора (см. рис. 6.5). В соответствии с этим наведенные в них ЭДС будут сдвинуты по фазе. Соседние катушечные стороны смещены на пазовое деление t_c , под которым понимают расстояние между серединами соседних пазов.

Поскольку сдвигу на τ соответствует угол 180° , то сдвигу на t_c будет соответствовать угол

$$\alpha = \frac{t_c}{\tau} 180^\circ.$$

Если τ измерять числом пазовых делений, то получим

$$\tau = Q = \frac{Z}{2p}.$$

пазовых делений.

В этом случае имеем ($t_c = 1$), эл. град

$$\alpha = \frac{p \times 360}{Z}.$$

Угол α есть угол между векторами ЭДС соседних катушечных сторон. В двухполюсной машине он соответствует центральному углу, стороны которого опираются на дугу t_c (см. рис. 6.5); в многополюсной машине угол α в p раз больше, чем тот же центральный угол. Поэтому различают угол в геометрических градусах (или радианах) и угол в электрических градусах (или радианах). В общем случае один геометрический градус соответствует p эл. град. Вся окружность статора соответствует, следовательно, $360p$ эл. град (или $2p\pi$ эл. рад).

Построим векторы ЭДС в катушечных сторонах обмотки, представленной на рис. 6.5, обозначив их соответственно номерам пазов цифрами 1, 2, 3 и т. д. При этом получим векторную диаграмму, показанную на рис. 6.6, а, где сдвиг по фазе ЭДС катушечных сторон, лежащих в соседних пазах, равен

$$\alpha = \frac{p \cdot 360^\circ}{Z} = \frac{360^\circ}{18} = 20^\circ.$$

Эту диаграмму называют звездой пазовых ЭДС. С ее помощью мы можем найти ЭДС фаз обмотки, как показано на рис. 6.6, б,

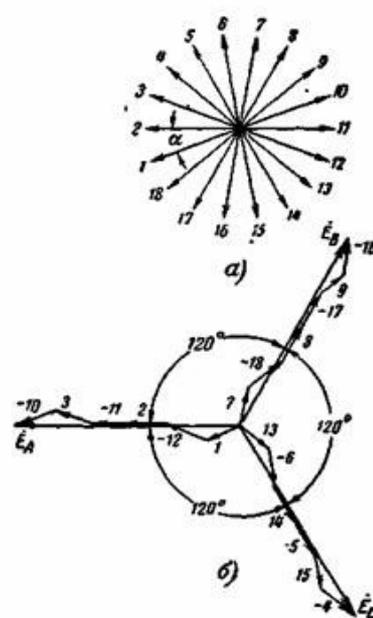


Рис. 6.6. Векторные диаграммы: а – звезда пазовых ЭДС; б – ЭДС фаз

где векторы ЭДС взяты в уменьшенном масштабе по сравнению с рис. 6.6, а. Сложение векторов произведено в соответствии с рис. 6.5, при этом учитывалось, что ЭДС катушек получаются в результате встречного соединения их сторон.

Звезда пазовых ЭДС и построенная с ее помощью диаграмма ЭДС фаз обмотки позволяют проверить, правильно ли выполнены соединения катушечных сторон и катушек обмотки. Электродвижущие силы фаз должны быть равны и сдвинуты по фазе для трехфазной обмотки на 120° (см. рис. 6.6, б). Если соблюдены эти условия, то обмотка будет симметричной.

6.4. Принцип действия асинхронного двигателя и его энергетическая диаграмма

Для лучшего понимания принципа действия асинхронного двигателя примем, что его вращающееся поле создается путем вращения двух полюсов (постоянных магнитов или электромагнитов), как показано на рис. 6.7.

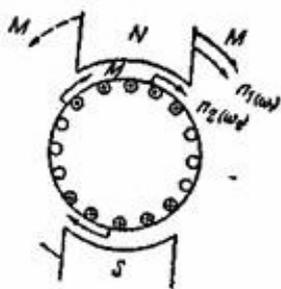


Рис. 6.7. К пояснению принципа действия асинхронного двигателя

В проводниках замкнутой обмотки ротора при этом будут наводиться токи. Их направления указаны на рис. 6.7. Они найдены по правилу правой руки, позволяющему определить направление наведенного тока в проводнике, перемещающемся относительно поля. Пользуясь правилом левой руки, найдем направления электромагнитных сил, действующих на ротор и заставляющих его вращаться. Ротор двигателя будет вращаться в направлении вращения поля. Частота вращения поля n_2 , об/мин, будет меньше частоты вращения поля n_1 , об/мин, так как только в этом слу-

чае возможны наведение токов в обмотке ротора и возникновение электромагнитных сил и вращающего момента.

Частоту вращения поля n_1 называют **синхронной частотой вращения**.

Скорость поля относительно ротора ($n_1 - n_2$) называют **частотой скольжения**, а отношение этой частоты к частоте поля, обозначаемое через s ,

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

называют скольжением.

Обозначим через M вращающий момент, который нужно приложить к полюсам (см. рис. 6.7), чтобы вращать их с частотой n_1 , об/мин или с угловой частотой, рад/с,

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}.$$

Тогда мощность, необходимая для вращения полюсов,

$$P_{эм} = M\omega_1.$$

На ротор и полюсы действуют одинаковые электромагнитные силы (действие равно противодействию). Они создают одинаковые вращающие моменты, а так как момент, действующий на полюсы (на рис. 6.7 показан пунктирной стрелкой), равен M , то и на ротор действует момент M . Следовательно, механическая мощность, развиваемая ротором,

$$P'_2 = M\omega_2,$$

где угловая частота ротора, рад/с

$$\omega_2 = \frac{2\pi n_2}{60}.$$

При работе машины двигателем $P'_2 < P_{эм}$, так как $\omega_2 < \omega_1$.

Можно считать, что разность мощностей $P_{эм}$ и P'_2 равна только электрическим потерям в обмотке ротора, имеющей m_2 фаз при токе в фазе I_2 и ее активном сопротивлении r_2 , так как потерями в стали ротора, как будет показано, можно пренебречь

$$P_{эм} - P'_2 = P_{э2} = m_2 I_2^2 r_2.$$

Мощность $P_{эм}$ передается вращающимся полем ротору. Ее называют **электромагнитной мощностью** или **мощностью вращающегося поля**.

В реальной асинхронной машине, работающей двигателем, электромагнитная мощность $P_{эм}$ равна первичной мощности P_1 , подведенной к статору, за вычетом $P_{э1}$ электрических потерь в обмотке статора

$$P_{э1} = m_1 I_1^2 r_1.$$

(где m_1 – число фаз; I_1 – ток в фазе обмотки статора; r_1 – активное сопротивление) и потерь в стали статора $P_{с1}$, т. е.

$$P_{эм} = P_1 - P_{э1} - P_{с1}.$$

Механическая мощность на валу двигателя P_2 (полезная мощность) меньше механической мощности P'_2 , развиваемой ротором. Чтобы получить P_2 , нужно вычесть из P'_2 механические потери $P_{мех}$ на трение в подшипниках и вращающихся частей о воздух; потери $P_{сд}$ в

зубцах статора и ротора, вызываемые пульсациями поля в них, и небольшие добавочные потери $P_{\text{доб}}$, возникающие при нагрузке и вызываемые полями рассеяния статора и ротора,

$$P_2 = P_2' - P_{\text{мех}} - P_{\text{сд}} - P_{\text{доб}}.$$

6.5. Режимы работы машин двигателем, тормозом и генератором

Асинхронная машина при изменении скольжения от 1 до 0 работает как двигатель. В этом случае электромагнитная мощность $P_{\text{эм}}$ передается магнитным полем со статора ротору и частично преобразуется в механическую мощность $P_2' = (1 - s)P_{\text{эм}}$, частично – в электрическую мощность $P_{\text{э2}} = sP_{\text{эм}}$. При работе машины двигателем сдвиг между ЭДС \dot{E}_1 , наведенной в фазе обмотки статора, и током в этой фазе \dot{I}_1 больше 90° , так же как и для первичной обмотки трансформатора.

Исходя из полученных ранее соотношений между мощностями асинхронной машины можно показать, что при изменении скольжения от $s = 1$ до $s = \infty$ машина работает как тормоз. Скольжение $s > 1$ получается при вращении ротора против поля. При этом электрические потери в цепи ротора $P_{\text{э2}} = sP_{\text{эм}}$ будут больше мощности $P_{\text{эм}}$ и, следовательно, они только частично покрываются за счет $P_{\text{эм}}$, передаваемой полем со статора ротору. Другая часть электрических потерь в цепи ротора $(s - 1)P_{\text{эм}}$ покрывается за счет механической мощности, приложенной к ротору. Механическая мощность ротора $P_2' = (1 - s)P_{\text{эм}}$ будет отрицательной. Это значит, что она не отдается ротором, а подводится к нему и преобразуется в электрические потери в цепи ротора, т. е. поглощается в самой машине. Поэтому режим работы при $s > 1$ называют **тормозным режимом**.

Электромагнитный момент при этом действует на ротор в направлении вращения поля, т. е. против вращения ротора; следовательно, он является тормозящим по отношению к внешнему моменту, приложенному к валу машины.

Можно также показать, что при отрицательных скольжениях асинхронная машина работает генератором. При $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} < 0$ ротор вращается в направлении вращения поля, но с частотой, превышающей частоту поля ($n_2 > n_1$). В этом случае электромагнитная мощность $P_{\text{эм}}$ будет отрицательной, что следует из равенства

$$P_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{э2}}}{s}.$$

Мощность $P_{эм}$ при отрицательном скольжении передается полем с ротора статору. Механическая мощность P_2 при этом будет также отрицательной, что следует из равенства

$$P_2' = \frac{1-s}{s} P_{32} = \frac{P_{32}}{s} - P_{32} = P_{эм} - P_{32}$$

Механическая мощность, следовательно, приложена к ротору. Одна ее часть идет на покрытие электрических потерь P_{32} в цепи ротора, другая часть преобразуется в электромагнитную мощность $P_{эм}$, передаваемую полем статору. При работе машины генератором сдвиг между \dot{E}_1 и \dot{I}_1 меньше 90° , так же как для вторичной обмотки трансформатора.

6.6. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

На основе уравнений напряжений и уравнения токов

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1;$$

$$0 = E_2' - j\dot{I}_2' x_2' - \dot{I}_2' \frac{r_2'}{s} = \dot{E}_2' - j\dot{I}_2' x_2' - \dot{I}_2' r_2' - \dot{I}_2' r_2' \frac{1-s}{s};$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_{0с}$$

могут быть построены векторные диаграммы асинхронной машины, приведенной к работе трансформатором.

На рис. 6.8 представлена диаграмма, соответствующая работе машины двигателем.

Она аналогична векторной диаграмме трансформатора, имеющего чисто активную нагрузку. К первичной (статорной) обмотке подведено напряжение \dot{U}_1 . На зажимах приведенной вторичной (роторной) обмотки получается напряжение

$$\dot{U}_2' = \dot{I}_2' r_2' \frac{1-s}{s} = \dot{E}_2' - j\dot{I}_2' x_2' - \dot{I}_2' r_2'$$

Мощность, отдаваемая вторичной обмоткой, равна

$$m_1 U_2' I_2' = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{1-s}{s} = m_2 I_2'^2 r_2 \frac{1-s}{s},$$

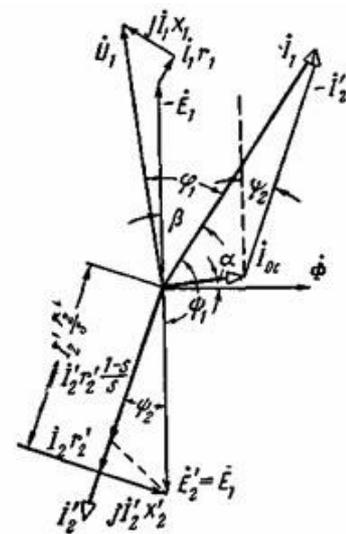


Рис. 6.8. Векторная диаграмма асинхронного двигателя (приведенного к работе трансформатором)

учетом перемещения проводников фаз относительно поля. При $\omega_1 < \omega_2$ проводники фаз ротора перемещаются относительно поля в направлении, обратном перемещению относительно поля проводников фазы статора (рис. 6.10). Поэтому ЭДС E_{1m} и E_{2sm} имеют взаимно противоположные направления.

Если бы ток I_2 совпадал по фазе с ЭДС \dot{E}_{2s} , то вектор $\bar{F}_{2(\psi_2=0)}$ совпадал бы с осью катушки 1 ротора, имеющей максимальную ЭДС \dot{E}_{2sm} . Но вследствие наличия в роторной цепи индуктивного сопротивления x_{2s} ток I_2 отстает по фазе относительно \dot{E}_2 на угол ψ_2 . Поэтому максимальный ток I_{2m} будет иметь место в катушке 2, где ЭДС была максимальной ранее на промежуток времени, соответствующий углу ψ_2 . Следовательно, в действительности (при $\psi_2 > 0$) вектор \bar{F}_2 будет совпадать с осью катушки 2. При $\psi_2 > 0$ (при отстающем от ЭДС токе) НС \bar{F}_2 смещается в сторону, противоположную вращению НС относительно ротора, но по отношению к статору она смещается в сторону вращения поля.

Намагничивающую силу статора \bar{F}_1 найдем исходя из равенства $\bar{F}_1 = \bar{F}'_2 - \bar{F}_2$. Отсюда найдем ту фазу статора, ток которой в данный момент времени имеет максимальное значение (см. рис. 6.9).

Если допустить, что $\bar{F}'_0 = 0$ и $x_{2s} = 0$, то мы получили бы совпадение по фазе \dot{I}_1 и \dot{E}_2 ; максимальный ток I_{1m} был бы в той же катушке, в которой наводится максимальная ЭДС E_{1m} . В действительности $F'_0 > 0$ и $x_{2s} > 0$, поэтому \dot{I}_1 и \dot{E}_2 сдвинуты по фазе, но на угол, меньший $\frac{\pi}{2}$ (\dot{I}_1 опережает \dot{E}_1 на угол $\psi_1 < \frac{\pi}{2}$); следовательно, мощность $E_1 I_1 \cos \psi_1$ положительна, так же как для вторичной обмотки трансформатора. Тем самым подтверждается, что при $s < 0$ машина работает генератором.

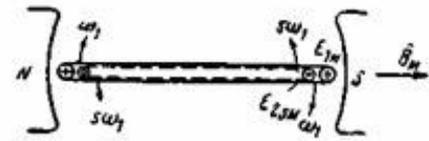


Рис. 6.10. К определению направлений ЭДС статорной и роторной обмоток при $s < 0$

6.8. Устойчивость работы машины

Рассмотрим вопрос об устойчивости работы трехфазного асинхронного двигателя. Напишем уравнение вращающих моментов, действующих на ротор двигателя при изменении его скорости вращения,

$$M - M_{cr} = J \frac{d\omega}{dt} = M_{изб},$$

где M – момент, развиваемый двигателем; $M_{ст}$ – статический момент, или момент сопротивления рабочего механизма, приводимого двигателем во вращение (с учетом потерь в самом двигателе); $M_{изб} = J \frac{d\omega}{dt}$ – избыточный момент (положительный или отрицательный), обусловленный изменением кинетической энергии всех вращающихся частей двигателя и приводимого им во вращение механизма и имеющий общий приведенный к валу двигателя момент инерции J .

Момент $J \frac{d\omega}{dt}$ называют также **динамическим моментом** или **моментом сил инерции**. Выражение для него может быть получено следующим образом: кинетическая энергия вращающихся частей равна $A = J \frac{\omega^2}{2}$; первая производная энергии по времени $\frac{dA}{dt}$ – мощность; мощность, деленная на угловую частоту, $\frac{1}{\omega} \frac{dA}{dt} = J \frac{d\omega}{dt}$ – динамический момент.

При $\frac{d\omega}{dt} = 0$ и $M_{изб} = 0$, следовательно, $M - M_{ст} = 0$. В этом случае двигатель работает с постоянной частотой вращения, момент двигателя M уравнивается статическим моментом $M_{ст}$, т. е. $M = M_{ст}$. Однако практически указанное равенство не может сохраняться длительно. Всегда возможны возмущения режима, которые вызовут изменение M или $M_{ст}$ и, следовательно, изменение частоты вращения. Если по прекращении возмущения система (состоящая в данном случае из двигателя и механизма) стремится вернуться в исходное состояние и к нему возвращается, то она представляет собой устойчивую систему.

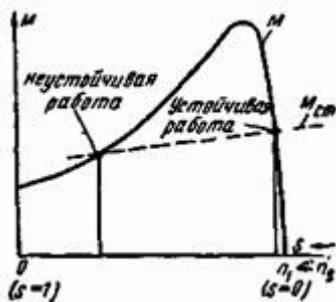


Рис. 6.11. Устойчивость работы асинхронного двигателя

На рис. 6.11 представлена кривая момента двигателя $M = f(n_2)$. Она легко может быть получена из ранее приведенной кривой $M = f(s)$, так как $n_2 = (1 - s)n_1$. На рисунке приведена пунктирная кривая $M_{ст} = f(n_2)$, соответствующая, например, изменению момента подъемного крана при изменении частоты вращения. Точки пересечения этой кривой с кривой момента двигателя получаются при равенстве $M = M_{ст}$.

Правая точка соответствует устойчивой работе; здесь при возмущении, вызвавшем положительное приращение частоты вращения, возникает отрицательный избыточный момент $M_{изб} = M - M_{ст}$, стремящийся замедлить вращение; при возмущении, вызвавшем отрицательное приращение

частоты вращения, избыточный момент $M_{изб} = M - M_{ст}$ будет положительным, ускоряющим вращение. В левой точке устойчивая работа невозможна, так как здесь при отклонении частоты вращения в любую сторону возникает избыточный момент, действующий в ту же сторону.

Следовательно, неравенство

$$\frac{dM_{ст}}{dn_2} > \frac{dM}{dn_2} \quad \text{или} \quad \frac{dM_{ст}}{ds} < \frac{dM}{ds}$$

может служить критерием устойчивости работы. При соблюдении этого неравенства работа будет устойчивой, при несоблюдении – неустойчивой.

Обратимся к рассмотрению работы машины тормозом. Этот режим работы (при $s > 1$) иногда применяют при необходимости быстро затормозить механизм, приводимый во вращение асинхронным двигателем. В этом случае применяют ту же схему, что и при реверсировании двигателя (рис. 6.12).

Для перевода машины в тормозной режим нужно изменить в ней направление вращения поля, что можно сделать при помощи показанного на рис. 6.12 переключателя.

Если тормозной режим используют только для быстрой остановки машины, то устойчивость этого режима не имеет значения; но иногда требуется длительная работа машины в режиме тормоза, например, в случае, когда рабочий механизм – подъемный кран. Такая работа также должна быть устойчивой. На рис. 6.13 приведены кривые $M = f(s)$: 1 – при обычном сопротивлении r'_2 обмотки ротора; 2 – при увеличенном сопротивлении цепи ротора $r'_2 + r'_n$, где r'_n – добавочное сопротивление (приведенное к обмотке статора), вводимое в цепь ротора; здесь же приведена кривая $M_{ст} = f(s)$ подъемного крана.

Очевидно, только при второй кривой $M = f(s)$ работа в тормозном режиме будет устойчивой, так как здесь $\frac{dM_{ст}}{ds} < \frac{dM}{ds}$. Следовательно, для устойчивой

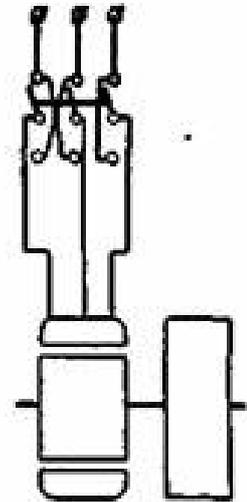


Рис. 6.12. Схема для реверсирования двигателя (изменения направления вращения) и для перевода его в режим работы тормозом (для сокращения времени выбега)

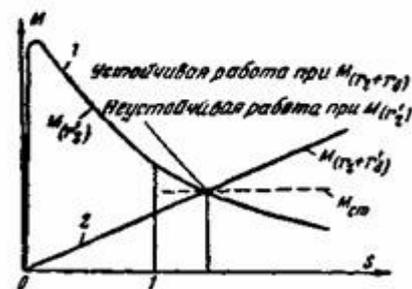


Рис. 6.13. Устойчивость работы машины в тормозном режиме

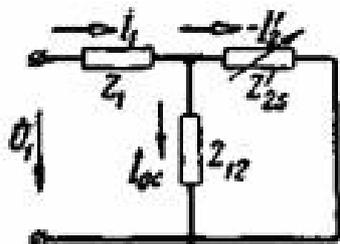
работы тормозом нужно в цепь ротора включить относительно большое сопротивление r_n' , что приведет также к уменьшению тока в обмотке ротора, а следовательно, и в обмотке статора.

6.9. Схемы замещения

Теория асинхронной машины основана на ее аналогии с трансформатором. Необходимые величины и зависимости, характеризующие работу вращающейся машины, можно получить, заменив ее неподвижной машиной, работающей как трансформатор. При этом активное сопротивление роторной цепи, как указывалось, должно быть равным $\frac{r^2}{s}$.

На основе полученных ранее уравнений мы можем получить, так же как для трансформатора, схему замещения асинхронной машины, позволяющую легко найти соотношения между величинами, характеризующими ее работу.

Напишем уравнения напряжения в следующем виде:



$$\dot{U}_1 = i_1 \left(Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_{12}} + \frac{1}{Z_{2s}}} \right)$$

Выражению в скобках соответствует сопротивление схемы, приведенной на рис. 6.14.

Рис. 6.14. Схема замещения синхронной машины (Т-образная)

Уравнения напряжений и токов для этой схемы, составленные согласно законам Кирхгофа, будут такие же, как для асинхронной машины. Поэтому эту схему называют схемой замещения асинхронной машины. Можем написать

$$Z'_{2s} = \frac{r'_2}{s} + jx'_2 = r'_2 + jx'_2 + r'_2 \frac{1-s}{s} = Z'_2 + r'_2 \frac{1-s}{s},$$

где $Z'_2 = r'_2 + jx'_2$ – сопротивление роторной обмотки при $s = 1$.

Активное сопротивление $r_2' \frac{1-s}{s}$ можно рассматривать как внешнее сопротивление, включенное в обмотку неподвижного ротора. Машина в этом случае работает как трансформатор, имеющий чисто активную нагрузку. Электрическая мощность $m_1 I_2'^2 r_2' \frac{1-s}{s}$, отдаваемая таким трансформатором, равна механической мощности P_2' , развиваемой ротором при работе машины, например двигателем со скольжением s .

Можно вместо схемы на рис. 6.14 получить схему, более удобную для исследования асинхронной машины, позволяющую составить простые расчетные формулы для токов, мощностей, $\cos \varphi_1$ и построить круговую диаграмму.

6.10. Круговая диаграмма

Круговая диаграмма асинхронной машины представляет собой геометрическое место концов вектора тока \dot{I}_1 , изменяющегося при изменении скольжения s в пределах от $+\infty$ до $-\infty$, если при этом напряжение на зажимах статора машины и все ее параметры сохраняют постоянные значения. Круговую диаграмму асинхронной машины называют также *диаграммой тока*. Она дает наглядное представление о важных зависимостях между величинами, характеризующими работу асинхронной машины.

Введем обозначение

$$\dot{i}_2'' = -\frac{\dot{I}_2'}{C_1}.$$

Тогда можем написать

$$\dot{U}_1 = \dot{i}_2''(C_1 r_1 + C_1^2 \frac{r_2'}{s}) + j \dot{i}_2''(C_1 x_1 + C_1^2 x_2'). \quad (1)$$

Комплексный коэффициент C_1 равен

$$C_1 = \frac{Z_1 + Z_{12}}{Z_{12}} = \frac{r_1 + r_{12} + j(x_1 + x_{12})}{r_{12} + jx_{12}} = c_1 e^{j\gamma_1} = c_1 (\cos \gamma_1 + j \sin \gamma_1), \quad (2)$$

где

$$c_1 = \sqrt{\frac{(r_1 + r_{12})^2 + (x_1 + x_{12})^2}{r_{12}^2 + x_{12}^2}}$$

и

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \frac{r_{12} x_1 - r_1 x_{12}}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})}.$$

Подставив значение C_1 из выражения (2) в выражение (1), получим

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= I_2'' e^{j2\gamma} (c_1 r_1 e^{-j\gamma_1} + c_1^2 \frac{r_2'}{s}) + j I_2'' e^{j2\gamma_1} (c_1 x_1 e^{-j\gamma_1} + c_1^2 x_2') = \\ &= I_2'' e^{j2\gamma_1} [c_1 r_1 (\cos \gamma_1 - j \sin \gamma_1) + c_1^2 \frac{r_2'}{s}] + j I_2'' e^{j2\gamma_1} [c_1 x_1 (\cos \gamma_1 - j \sin \gamma_1) + c_1^2 x_2'], \end{aligned}$$

что после преобразований дает

$$\dot{U}_1 = I_2'' r_{\text{ш}} e^{j2\gamma_1} + j I_2'' x_{\text{д}} e^{j2\gamma_1}, \quad (3)$$

где

$$r_{\text{ш}} = c_1 [r_1 (\cos \gamma_1 - x_1 \sin \gamma_1) + c_1^2 \frac{r_2'}{s}];$$

$$x_{\text{д}} = c_1 [x_1 (\cos \gamma_1 - r_1 \sin \gamma_1) + c_1^2 x_2'].$$

Разделив выражение (3) на $j x_{\text{д}} e^{j2\gamma_1}$, получим

$$-j \frac{\dot{U}_1}{x_{\text{д}}} e^{-j2\gamma_1} = I_2'' - j I_2'' \frac{r_{\text{ш}}}{x_{\text{д}}}.$$

Три вектора полученного уравнения токов образуют при токе I_2'' , соответствующем некоторому скольжению s , прямоугольный треугольник A_cAD , представленный на рис. 6.15, где вектор \dot{U}_1 направлен по вертикали. В этом треугольнике катеты $\overline{A_cA} = I_2''$ и $AD = -j I_2'' \frac{r_{\text{ш}}}{x_{\text{д}}}$ и гипотенуза $\overline{A_cD} = -j \frac{\dot{U}_1}{x_{\text{д}}} e^{j2\gamma_1}$ (в соответствии с обычными соотношениями между параметрами асинхронной машины принято, что угол γ_1 имеет отрицательное значение).

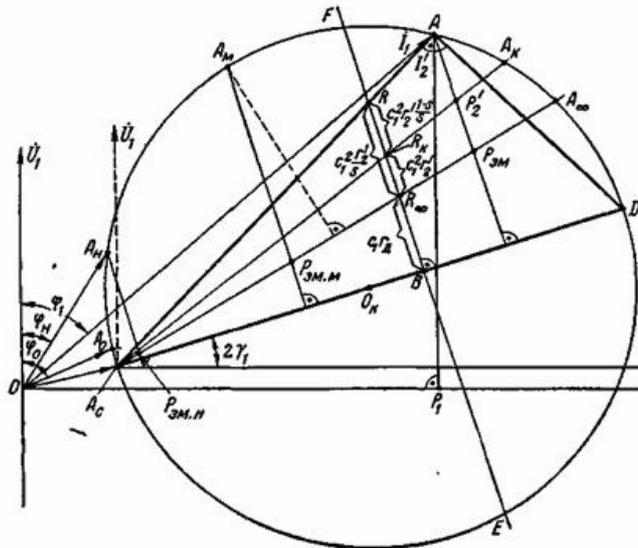


Рис. 6.15. Круговая диаграмма асинхронной машины

6.11. Рабочие характеристики двигателей

6.11.1. Определение рабочих характеристик опытным путем

Под рабочими характеристиками, или рабочими кривыми, асинхронного двигателя обычно понимают следующие зависимости:

$I_1, \cos\varphi_1, \eta, s = f(P_2)$ при $U_1 = \text{const}$ и $f = \text{const}$ (рис. 6.16).

Рабочие характеристики двигателя небольшой мощности могут быть найдены путем непосредственного измерения тока I_1 , мощности P_1 , частоты вращения n_2 и момента на валу M_B при различных нагрузках двигателя.

Нагрузка двигателя при этом осуществляется с помощью какого-либо тормоза, позволяющего измерить создаваемый им тормозящий момент M_B , кг · м.

При опыте непосредственной нагрузки напряжение U_1 и частоту тока f_1 устанавливают равными номинальным значениям $U_{1н}$ и $f_{1н}$. По данным измерений рассчитывают мощность, Вт

$$P_2 = 9,81\omega_2 M_B = 9,81 \frac{2\pi n_2}{60} M_B = 1,02nM_B$$

и коэффициенты

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{m_1 U_1 I_1}; \quad s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Определение рабочих характеристик путем непосредственного измерения указанных величин обычно не дает достаточно точных результатов, так как измерения M_B и n_2 трудно выполнить с надлежащей точностью. Погрешность при определении P_2 дает примерно ту же погрешность при определении η . Поэтому обычно не рекомендуется определять КПД η электрических машин по данным непосредственного измерения P_1 и P_2 , если значение $\eta > 0,50$. Однако в последнее время вследствие усовершенствования тормозов, позволяющих более точно измерить вращающий момент, метод непосредственного определения КПД используют и в том случае, когда примерное значение $\eta \leq 0,70$. Значение n_2 близко к значению n_1 , поэтому погрешность, до-

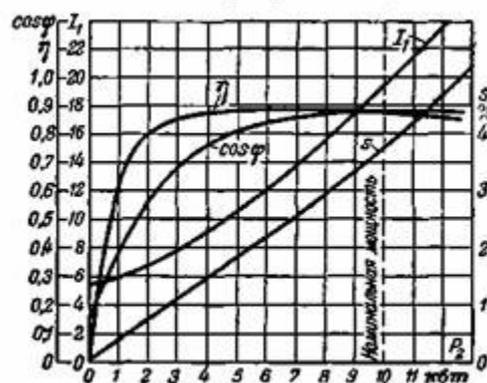


Рис. 6.16. Рабочие характеристики двигателя на 10 кВт, 220/380 В, 1500 об/мин

пущенная при измерении n_2 , сильно сказывается на значении s . Скольжение s значительно более точно можно определить по данным измерения частоты f_2 тока ротора – по формуле

$$s = \frac{f_2}{f_1}.$$

Если производится испытание малых машин ($P_n \leq 0,4$ кВт), то обычно используют метод непосредственного определения рабочих характеристик.

6.11.2. Определение рабочих характеристик по круговой диаграмме

Рабочие характеристики можно определить при помощи круговой диаграммы. Для построения диаграммы должны быть известны параметры машины, которые можно найти расчетным или опытным путем.

Рассмотрим построение диаграммы по данным, полученным из опытов холостого хода и короткого замыкания.

При опыте холостого хода машина должна работать двигателем вхолостую. Напряжение на ее зажимах устанавливают равным номинальному $U_1 = U_{1н}$. При этом нужно измерить ток холостого хода I_0 и мощность P_0 , потребляемую двигателем. По данным измерений находят

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{m_1 U_1 I_0}.$$

Активная составляющая тока холостого хода $I_{0a} = I_0 \cos \varphi_0$ зависит от потерь холостого хода $P_0 = m I_0^2 r_1 + P_{c1} + P_{мех} + P_{сд}$. Практически $I_0 \approx I_c$. Активная составляющая I_{ca} , как указывалось, определяется потерями

$$m_1 I_c^2 r_1 + P_{c1}.$$

На рис. 6.15 показан вектор $\overline{OA_0} = \dot{I}_0$. Точка A_0 лежит выше точки A_c на отрезок $\overline{A_c A_0}$, приблизительно равный в масштабе мощности потерям на трение $P_{мех}$ и добавочным потерям в зубцах статора и ротора $P_{сд}$,

$$C_p \overline{A_c A_0} = P_{мех} + P_{сд}.$$

С некоторым приближением можно принять, что точка A_c делит отрезок $\overline{A_c A_0}$ пополам.

Ток холостого хода I_0 асинхронных двигателей определяется главным образом его реактивной составляющей I_{0p} ($I_0 \approx I_{0p}$). Можно считать, что реактивная составляющая I_{0p} идет на создание только основного поля машины, так как поля рассеяния при холостом ходе незначительны. Реактивная составляющая может быть определена из

расчета магнитной цепи машины. Поскольку в магнитную цепь входит воздушный зазор между статором и ротором, на который обычно затрачивается наибольшая часть НС всей цепи, то I_{0p} имеет относительно большое значение, превышающее в несколько раз I_{0p} трансформаторов. Обычно для нормальных асинхронных двигателей при $U_1 = U_{1н}$ ток $I_0 = (0,25 \div 0,40)I_{1н}$. Он тем больше, чем больше полюсов имеет машина и чем меньше ее мощность.

У тихоходных двигателей (при $2p > 10$) и специальных двигателей, работающих с повышенным насыщением, ток холостого хода часто получается больше $0,4I_{1н}$; $\cos \varphi_0 = 0,15 \div 0,05$ (он тем больше, чем меньше мощность машины и ее число полюсов).

При опыте короткого замыкания машина должна быть неподвижной при замкнутой накоротко обмотке ротора. Напряжение $U_{1к}$ на зажимах статора устанавливаем таким образом, чтобы ток $I'_{1к} \approx I_{1н}$. При этом измеряем $U_{1к}$, $I'_{1к}$ и $P_{1к}$ и затем определяем

$$I_{1к} = I'_{1к} \frac{U_{1н}}{U_{1к}}; \quad \cos \varphi_{1к} = \frac{P_{1к}}{m_1 U_{1к} I'_{1к}}; \quad r_k \approx \frac{P_{1к}}{m_1 I_{1к}^2}$$

(здесь приближенно принято $c_1 = 1$).

Для короткозамкнутых двигателей с глубиной роторного паза свыше $2 \div 2,5$ см при двойной клетке на роторе и для двигателей с контактными кольцами, имеющих на роторе двухслойную стержневую обмотку при глубине роторных пазов свыше 3 см, опыт короткого замыкания следует проводить при пониженной частоте питающего тока ($f_1 = 5 \div 8$ Гц). При этом можно с некоторым приближением считать, что вытеснения тока в проводниках обмотки ротора не будет и что его параметры $\frac{f_{1н}}{f_1} x_2$ и r_2 соответствуют тем же параметрам при изменении s от $-s_k$ до $+s_k$ приблизительно в пределах $\pm(0,05 \div 0,16)$.

По данным измерений определяем

$$r_k = \frac{P_{1к}}{m_1 I_{1к}^2}; \quad z_k' = \frac{U_{1к}}{I_{1к}}; \quad x_k' = \sqrt{z_k'^2 - r_k^2}$$

и затем

$$x_k = \frac{f_{1н}}{f_1} x_k'; \quad z_k = \sqrt{x_k^2 + r_k^2}; \quad I_{1к} = \frac{U_{1н}}{z_k}; \quad \cos \varphi_{1к} = \frac{r_k}{z_k}$$

(здесь также принято $c_1 = 1$).

Для нормальных двигателей

$$\frac{I_{1к}}{I_{1н}} = 4 \div 6; \quad \cos \varphi_{1к} = 0,08 \div 0,25.$$

6.11.3. Определение рабочих характеристик расчетным путем

С достаточной для практики точностью рабочие характеристики двигателя могут быть определены расчетным путем (без круговой диаграммы), если известны параметры машины, найденные из ее расчета или по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

Необходимые расчетные формулы составляют при помощи схемы замещения и соответствующей ей векторной диаграммы, изображенной на рис. 6.17.

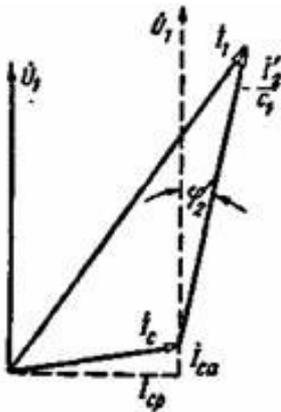


Рис. 6.17.

К расчетному определению рабочих характеристик двигателя

Напишем эти формулы в том порядке, в каком рекомендуется производить расчеты, причем в скобках укажем, как рассчитываются отдельные величины по опытным данным:

$$1) c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_{12}} \cdot (x_1 \approx 0,5x_k; x_{12} \approx \frac{U_1 - I_0 x_1}{I_0 \sin \varphi_0});$$

$$2) z_{k.s} = \sqrt{r_{k.s}'^2 + x_k^2},$$

где $r_{k.s}' = r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s}$; $x_k = x_1 + c_1 x_2'$ ($r_2' \approx r_k - r_1$; r_1 измеряется при постоянном токе; r_k и x_k определяются по данным опыта короткого замыкания);

$$3) I_2' = \frac{U_1}{z_{k.s}}; \frac{I_2'}{c_1} = \frac{U_1}{c_1 z_{k.s}};$$

$$4) I_\varphi \approx I_{0p} \quad (I_{0p} = I_0 \sin \varphi_0);$$

$$5) I_{ca} \approx \frac{P_{c1} + m_1 I_c'^2 r_1}{m_1 U_1}$$

можно принять $P_{c1} \approx \frac{P_0}{2}$; $I_c \approx I_0$;

$$6) \cos \varphi_2' = \frac{r_{k.s}'}{z_{k.s}}; \sin \varphi_2' = \frac{x_k}{z_{k.s}};$$

$$7) \text{активный ток статора } I_{1a} = I_{ca} + \frac{I_2'}{c_1} \cos \varphi_2';$$

$$8) \text{реактивный ток статора } I_{1p} = I_\varphi + \frac{I_2'}{c_1} \sin \varphi_2';$$

$$9) I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}; \cos \varphi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1};$$

$$10) \text{электрическая мощность статора } P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1;$$

$$11) \text{электрические потери в обмотках статора и ротора}$$

$$P_{s1} = m_1 I_1^2 r_1; \quad P_{s2} = m_1 I_2'^2 r_2';$$

12) потери холостого хода за вычетом электрических потерь

$$P_0' = P_0 - m_1 I_0^2 r_1 = P_{c1} + P_{\text{мех}} + P_{cд};$$

13) добавочные потери при нагрузке $P_{\text{доб}} = 0,005 P_1$;

14) сумма всех потерь $\Sigma P = P_{31} + P_{32} + P_0' + P_{\text{доб}}$;

15) мощность на валу $P_2 = P_1 - \Sigma P$;

16) КПД $\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}$.

6.12. Пуск электрических двигателей

6.12.1. Общие замечания

Вопросы, связанные с пуском в ход электрических двигателей, имеют большое практическое значение. При их разрешении приходится считаться с условиями работы сети, к которой подключают двигатель, и с требованиями, которые предъявляют к электроприводу. Под **электроприводом** понимают устройство, состоящее из электродвигателя вместе с относящейся к нему аппаратурой и предназначенное для приведения во вращение рабочей машины (какого-либо станка, насоса, вентилятора, экскаватора, прокатного стана, конвейера и др.).

Для оценки пусковых свойств электродвигателя установлены следующие основные показатели:

- 1) начальный пусковой ток $I_{\text{нач}}$ или его кратность $I_{\text{нач}}/I_{\text{н}}$;
- 2) начальный пусковой момент $M_{\text{нач}}$ или его кратность $M_{\text{нач}}/M_{\text{н}}$.

Кроме того, в ряде случаев имеет значение продолжительность разбега двигателя вместе с приводимым им во вращение механизмом и иногда и плавность разбега.

6.12.2. Двигатели с контактными кольцами

Двигатели с контактными кольцами пускают в ход при помощи реостата, включаемого в роторную цепь и называемого *пусковым*. Соответствующая схема приведена на рис. 6.18.

Зависимость начального вращающего момента от активного сопротивления роторной цепи можно найти следующим образом:

$$M_{\text{нач}} = f(r_2' + r_{\text{д}}'),$$

где r_2' – сопротивление обмотки ротора, а $r_{\text{д}}'$ – переменное сопротивление пускового реостата (оба сопротивления приведены к обмотке статора). Эта зависимость представлена на рис. 6.19.

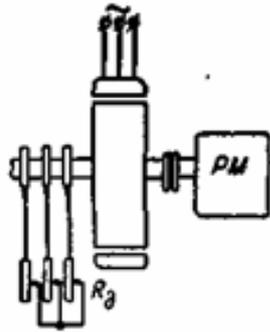


Рис. 6.18. Схема пуска в ход трехфазного асинхронного двигателя с контактными кольцами (РМ – рабочая машина)

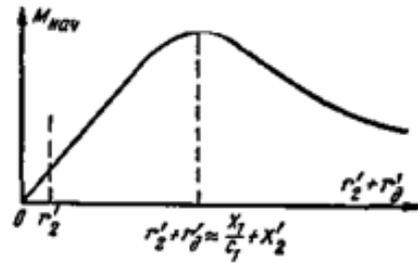


Рис. 6.19. Зависимость начального вращающего момента от активного сопротивления роторной цепи

Эта зависимость показывает, что при увеличении $r_д'$ начальный момент $M_{нач}$ сначала возрастает и достигает максимума при значении $r_д' \approx \frac{x_1}{s_k} + x_2' - r_д'$, где вместо $r_д'$ нужно взять $r_2' + r_д'$ и принять $s_k = 1$, а затем падает. Одновременно с возрастанием $M_{нач}$ при увеличении $r_д'$ будет уменьшаться $I_{нач}$ вместе с уменьшением $I_{2нач}'$, где $r_д'$ нужно заменить через $r_2' + r_д'$ и взять $s = 1$.

На рис. 6.20 показано изменение вращающего момента при выключении ступеней пускового реостата за время разбега двигателя.

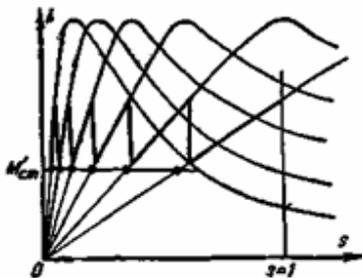


Рис. 6.20. Кривые $M = f(s)$ при различных сопротивлениях $r_2' + r_д'$ роторной цепи (зигзагообразная линия соответствует изменению пускового момента при выключении ступеней реостата во время разбега двигателя)

Двигатель с контактными кольцами, пускаемый в ход при помощи пускового реостата, обладает хорошими пусковыми характеристиками. Здесь за все время разбега мы можем иметь большой пусковой момент и тем самым сократить время разбега. При этом пусковой ток имеет относительно небольшое значение, следовательно, подключение двигателя к электрической сети, особенно маломощной, не будет вызывать резких изменений режима ее работы.

Пусковые реостаты изготовляют из проволоки или ленты, обычно намотанной в виде спирали на фарфоровые столбики. Для проволоки или ленты берут металл повышен-

ного удельного сопротивления (нихром, фехраль и др.), обладающий высокой износостойкостью, и иногда железо или чугун. Такие реостаты имеют воздушное охлаждение, если они предназначены для частых пусков в ход, или масляное охлаждение. В последнем случае спирали помещают в бак с маслом. Переключение ступеней реостата, присоединенных к контактам, помещенным на доске из изоляционного материала, производят при помощи ручки, скользящей по контактам.

Применяют также жидкостные пусковые реостаты, состоящие обычно из бака с содовым раствором и пластин, опускаемых в бак. Пластины соединяют со щетками, наложенными на контактные кольца.

Следует иметь в виду, что пусковые реостаты рассчитаны на кратковременную нагрузку, и поэтому их ступени нельзя оставлять на долгое время под током во избежание чрезмерного нагрева.

Иногда двигатели с контактными кольцами снабжают приспособлением, позволяющим замкнуть кольца накоротко, когда выведен весь реостат, и при этом поднять щетки. Таким образом устраняются потери на трение щеток о кольца и электрические потери в их переходных контактах. В последние годы от таких приспособлений отказываются, так как их применение удорожает двигатель и усложняет уход за ним.

При пуске в ход двигателя с контактными кольцами нужно до включения рубильника или масляного выключателя убедиться в том, что весь реостат введен в цепь ротора. После включения необходимо пусковое сопротивление выводить постепенно, чтобы стрелка амперметра, который должен быть включен в цепь статора, не отклонялась дальше допустимого значения.

6.12.3. Короткозамкнутые двигатели

Короткозамкнутые двигатели обычно пускают в ход путем непосредственного включения их в сеть. Такие двигатели выполняют, как отмечалось, с роторной обмоткой в виде беличьей клетки.

Круглые пазы на роторе и соответствующие им круглые медные стержни в настоящее время применяют только для малых машин, причем и для таких машин чаще применяют алюминиевую клетку, полученную путем заливки пазов расплавленным алюминием. В малых машинах сопротивление r_2 получается относительно большим, поэтому здесь и при круглых пазах создается достаточный момент $M_{нач}$. Что касается начального пускового тока, то в случае малых машин он обычно не имеет большого значения.

Для короткозамкнутых машин с алюминиевой обмоткой при больших мощностях ($> 20 \div 30$ кВт) применяют тем более глубокие пазы, чем больше мощность машины.

При мощности свыше 120 – 150 кВт на роторе применяют узкие глубокие пазы (при ширине паза 5 – 6 мм и глубине до 50 ÷ 55 мм). В них закладывают узкие высокие медные стержни. Такой паз вместе с заложенным в него стержнем показан на рис. 6.21. Там же приведена примерная картина поля пазового рассеяния.

Применение глубоких пазов на роторе улучшает пусковые характеристики короткозамкнутых двигателей, что вытекает из следующих рассуждений.

Представим себе, что стержень по высоте разделен на большое число слоев. Нижние слои сцепляются с большим числом индукционных линий, чем верхние слои. Поэтому их индуктивное сопротивление больше, чем индуктивное сопротивление верхних слоев. При большой частоте тока (например, при $s = 1$) индуктивное сопротивление отдельных слоев значительно больше их активного сопротивления, вследствие чего распределение тока по слоям будет определяться в основном индуктивными сопротивлениями слоев.

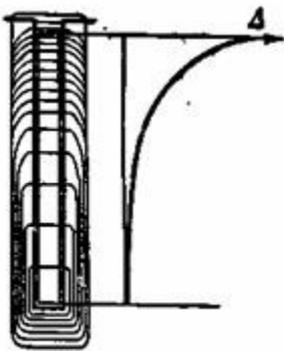


Рис. 6.21. Глубокий паз с узким высоким стержнем и распределение плотности тока по высоте стержня

На рис. 6.21 справа показано примерное распределение плотности тока Δ (имеется в виду действующее значение тока) по сечению стержня при $f_2 = f_1$. Мы видим, что ток в стержне вытесняется к открытию паза. Площадь его сечения используется не полностью. Вследствие этого увеличивается активное сопротивление обмотки r_2 , что приводит к повышению начального пускового момента. Начальный пусковой ток при этом уменьшается, но сравнительно мало, так как из-за вытеснения тока в стержне несколько уменьшается x_2 . Уменьшение $x_{2s} = 2\pi s f_1 L_{\sigma 2}$ при больших скольжениях вызвано тем, что площадь, через которую проходят трубки поля пазового рассеяния, становится меньше (трубки в основном проходят, как показано на рис. 6.21, в верхней части паза); при этом уменьшаются магнитная проводимость и, следовательно, индуктивность рассеяния $L_{\sigma 2}$.

По мере возрастания частоты вращения частота f_2 уменьшается и при номинальной частоте вращения имеет небольшое значение. Ток при этом практически распределяется равномерно по всему сечению стержня, так как его распределение теперь будет определяться в основном активными сопротивлениями отдельных слоев, на которые мы мысленно разделили стержень. Следовательно, f_2 автоматически уменьшится.

На рис. 6.22 представлены пусковые характеристики $\frac{M}{M_n}$ и $\frac{I}{I_n} = f(n_2)$ для короткозамкнутого двигателя с глубокими пазами на роторе (здесь вместо абсолютных значений тока статора I и вращающего момента M взяты их отношения к номинальным значениям I_n и M_n , что является более показательным).

Для таких двигателей обычно получают $\frac{M_{нач}}{M_n} = 1,2 \div 1,5$ при $\frac{I_{нач}}{I_n} = 4,5 \div 6$.

При менее глубоких пазах, которые применяют при алюминиевой клетке для двигателей небольшой и средней мощности (до 100 кВт), эти отношения составляют

$$\frac{M_{нач}}{M_n} = 1 \div 1,4 \text{ или } \frac{M_{нач}}{M_n} = 5,5 \div 6,5.$$

6.12.4. Регулирование частоты вращения

Асинхронные двигатели обычно применяют для электроприводов, которые работают с постоянной частотой вращения. Но иногда их применяют для регулируемых электроприводов. Рассмотрим возможные способы регулирования частоты вращения.

1. На практике иногда для регулирования частоты вращения асинхронного двигателя используется реостат в цепи ротора, имеющего обмотку, присоединенную к контактными кольцам.

Увеличение активного сопротивления цепи ротора приводит к увеличению скольжения и, следовательно, к уменьшению частоты вращения двигателя, что видно из кривых $M = f(s)$ при различных $(r_2' + r_n')$.

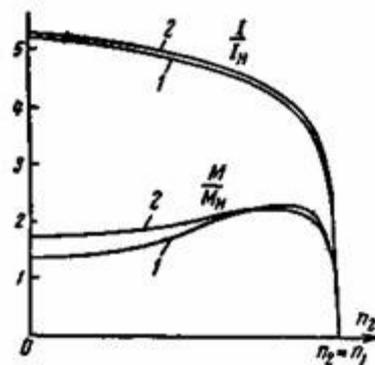


Рис. 6.22. Пусковые характеристики короткозамкнутых двигателей: 1 – с глубокими пазами, 2 – с двойной клеткой

Здесь при $M'_{ст} = \text{const}$ (соответствует работе электропривода с подъемным краном) точки пересечения кривой $M'_{ст} = f(s)$ с указанными кривыми определяют скольжения при различных значениях $(r'_2 + r'_n)$. Регулирование здесь возможно в широких пределах, причем плавность регулирования зависит от числа ступеней реостата.

Указанный способ регулирования неэкономичен, так как он связан с непроизводительной затратой энергии в реостате. Потери энергии в реостатной цепи

$$P_{\Sigma 1} = m_1 I_2'^2 (r'_2 + r'_n) = s P_{эм} = s \omega_1 M$$

Отсюда видно, что увеличение скольжения s при $M = \text{const}$ приводит к увеличению электрических потерь в роторной цепи. Если, например, s увеличивается при $M = \text{const}$ вследствие введения в роторную цепь сопротивления r'_d от 0,02 до 0,50, что соответствует уменьшению частоты вращения приблизительно вдвое, то почти половина мощности $P_{эм}$ непроизводительно теряется в реостате.

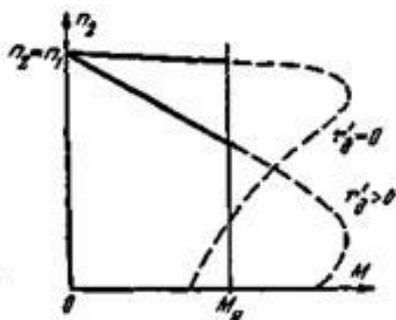


Рис. 6.23. Механические характеристики $n_2 = f(M)$ двигателя с контактными кольцами при сопротивлении $r'_d = 0$ и при $r'_d > 0$

При регулировании частоты вращения двигателя при помощи реостата в цепи ротора следует иметь в виду, что механическая характеристика двигателя (рис. 6.23) может получиться резко падающей, недопустимой, например, для электропривода к токарному станку.

Для регулирования частоты вращения двигателя не следует применять пусковые реостаты, так как они предназначены для кратковременной нагрузки. Регулирующие реостаты должны иметь большие размеры, чтобы получилась достаточная поверхность охлаждения для рассеяния тепла, образующегося в реостате.

2. Частоту вращения асинхронного двигателя можно регулировать также путем изменения напряжения U_1 на зажимах статора. Однако такой способ регулирования при малом сопротивлении роторной цепи позволяет изменять частоту вращения лишь в небольших пределах, что следует из рис. 6.24, где сплошные кривые представляют собой зависимости $M = f(s)$ при различных напряжениях U_1 и при $r_d = 0$.

Можно расширить пределы регулирования путем изменения U_1 , включив в роторную цепь добавочное сопротивление r'_d (пунктирные кривые на рис. 6.24).

Изменение напряжения U_1 производится при помощи регулировочных трансформаторов, реактивных катушек с подвижным сердечником, переменных активных сопротивлений, включенных в цепь статора, а также при помощи магнитных усилителей.

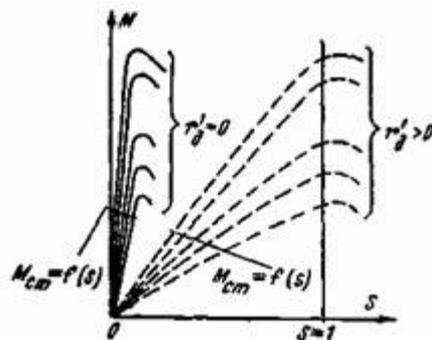


Рис. 6.24. Регулирование частоты вращения путем изменения напряжения U_1

Глава 7. ОДНОФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

7.1. Общие сведения

Однофазные асинхронные двигатели в настоящее время выполняют главным образом как малые машины на мощностях, редко превышающей 0,5 кВт.

Статор этих двигателей имеет однофазную обмотку, которую обычно получают из трехфазной, соединенной в «звезду», при использовании только двух ее фаз. Ротор снабжается короткозамкнутой обмоткой в виде беличьей клетки.

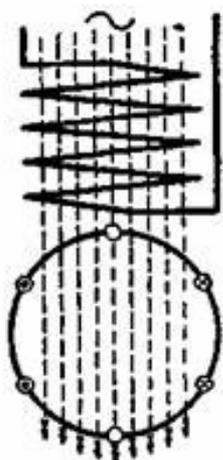


Рис. 7.1. Токи в проводниках роторной обмотки однофазного двигателя при неподвижном роторе

Если обмотку статора питать однофазным переменным током, то она создаст переменное (пульсирующее) напряжение. При неподвижном роторе в машине возникнет при этом переменное (пульсирующее) поле. Оно будет наводить в обмотке ротора токи, как во вторичной обмотке трансформатора. На рис. 7.1 показаны направления токов в проводниках короткозамкнутого ротора при наличии пульсирующего поля.

Очевидно, что результирующий момент, действующий на ротор, будет равен нулю, так как электромагнитные силы от взаимодействия поля и токов в обмотке ротора на ее правой и левой половинах будут равны и противоположны.

Отсутствие начального вращающего момента – характерная особенность однофазного двигателя при указанной схеме соединения. Следовательно, он сам не может тронуться с места. Однако если посредством посторонней силы раскрутить ротор, то двигатель в дальнейшем будет вращаться самостоятельно и может быть нагружен.

Подобные явления можно наблюдать у трехфазного двигателя при обрыве одного из питающих проводов. Если провод оборван у неподвижного двигателя, то он при пуске не будет создавать вращающий момент и не тронется с места. Если же провод оборван у вращающегося трехфазного двигателя, то последний будет продолжать работать как однофазный. Однако мощность его при этом должна быть снижена до 50 – 55 процентов от номинальной.

Режим работы трехфазного двигателя в качестве однофазного не может быть допущен при мощности на его валу, близкой к номинальной, так как его обмотки из-за увеличения в них токов при таком режиме за короткое время чрезмерно нагреются.

Для объяснения указанных явлений заменим переменную, пульсирующую по одной оси НС статора, двумя НС, вращающимися в разные стороны с синхронной частотой и имеющими амплитуды, равные половине амплитуды пульсирующей НС.

При неподвижном роторе обе НС с равными амплитудами вращаются относительно ротора с одной и той же синхронной частотой. Поля, вызванные ими, также будут иметь одинаковые амплитуды. Они будут наводить в обмотке ротора одинаковые токи. Поэтому вращающие моменты, получающиеся от взаимодействия полей и наведенных ими токов, будут равны между собой. Поскольку вращающие моменты действуют в противоположные стороны, то результирующий момент равен нулю. Следовательно, ротор самостоятельно не может прийти во вращение. Если же, как указывалось, каким-либо способом привести его во вращение в любом направлении, то в этом направлении он будет вращаться самостоятельно и дойдет до скорости, близкой к синхронной.

7.2. Однофазный двигатель, полученный из трехфазного

Рассмотрим более подробно работу однофазного двигателя, полученного из трехфазного, при использовании только двух фаз его обмотки статора, соединенной в «звезду». Как отмечалось, такой режим работы может получиться и у трехфазного двигателя в случае обрыва одного из проводов, подводящих к нему ток (рис. 7.2).

При исследовании однофазного двигателя обратимся к методу симметричных составляющих. На основе этого метода и в соответствии со схемой, представленной на рис. 7.2, можно написать следующие уравнения для токов и напряжений, указанных на том же рисунке:

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= 0, \quad \dot{I}_c = -\dot{I}_b, \\ \dot{I}_a &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 0, \quad \dot{I}_b = a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2, \quad \dot{I}_c = a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2, \end{aligned} \quad (1)$$

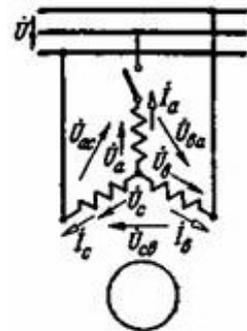


Рис. 7.2. Схема двигателя при однофазном питании

где $\dot{I}_1 = \dot{I}_{a1}$ и $\dot{I}_2 = \dot{I}_{a2}$ – симметричные составляющие прямой и обратной последовательностей фазного тока статора \dot{I}_a ;

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= \dot{U}_1 + \dot{U}_2; \\ \dot{U}_b &= a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2; \\ \dot{U}_c &= a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2,\end{aligned}\quad (2)$$

где $\dot{U}_1 = \dot{U}_{a1}$ и $\dot{U}_2 = \dot{U}_{a2}$ – симметричные составляющие фазного напряжения статора \dot{U}_a .

Из выражений (1) и (2) имеем

$$\begin{aligned}\dot{I}_1 &= -\dot{I}_2; \\ \dot{I} &= \dot{I}_c = (a - a^2)\dot{I}_1 = j\sqrt{3}\dot{I}_1; \\ \dot{I}_1 &= \frac{\dot{I}}{j\sqrt{3}};\end{aligned}\quad (3)$$

$$\dot{U} = \dot{U}_{cb} = \dot{U}_c - \dot{U}_b = (a - a^2)(\dot{U}_1 - \dot{U}_2) = j\sqrt{3}(\dot{U}_1 - \dot{U}_2). \quad (4)$$

Полагая, что напряжения \dot{U}_1 и \dot{U}_2 действуют независимо одно от другого, и обозначая через Z_{s1} и Z_{s2} полные сопротивления машины соответственно для токов прямой и обратной последовательностей, получаем

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_{s1}; \quad \dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_{s2}.$$

Теперь, учитывая выражения (3) и (4), можно написать

$$\begin{aligned}\dot{U} &= (a - a^2)(\dot{I}_1 Z_{s1} - \dot{I}_2 Z_{s2}); \\ \dot{U} &= j\sqrt{3}\dot{I}_1(Z_{s1} + Z_{s2}) = \dot{I}(Z_{s1} - Z_{s2}); \\ \dot{I}_1 &= \frac{\dot{I}}{j\sqrt{3}} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{Z_{s1} + Z_{s2}} = \frac{\dot{U}}{j\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{Z_{s1} + Z_{s2}}.\end{aligned}\quad (5)$$

Уравнению (5) соответствует схема замещения однофазного двигателя. Здесь сопротивления $Z_1, Z_{12}, Z'_{2s} = \frac{r'_2}{s} + jx'_2, Z'_{2(2-s)} = \frac{r''_2}{2-s} + jx''_2$ те же, что и для трехфазного двигателя (для малых двигателей $r''_2 \approx r'_2, x''_2 \approx x'_2$; для средних и больших двигателей $r''_2 > r'_2$ и $x''_2 < x'_2$ вследствие вытеснения тока в проводниках обмотки ротора).

7.3. Переходные процессы в асинхронных машинах

Изменение режима работы асинхронной машины связано с процессами, которыми сопровождается переход от одного установившегося режима ее работы к другому. Они характеризуются возникновением уравнивающих токов и магнитных полей, постепенно затухающих до нулевых значений.

Переходные процессы в асинхронной машине значительно сложнее, чем в трансформаторе, так как в первой одна из обмоток вращается относительно другой, при этом уравнительные токи и поля создают переменные вращающие моменты, которые воздействуют на ротор машины и вызывают изменение его частоты вращения. Переходные процессы обычно исследуют приближенно при ряде допущений.

Ограничимся только качественным рассмотрением некоторых переходных процессов в асинхронных машинах и приведем значения характеризующих их токов и моментов.

Рассмотрим процессы при включении.

Обратимся сначала к короткозамкнутому двигателю. При его включении на установившийся пусковой ток будет накладываться свободный ток, который приближенно можно считать аperiодическим, быстро затухающим до нуля. Свободный ток будет наибольшим в одной из фаз обмотки статора. В момент включения при наиболее неблагоприятном случае он равен амплитуде начального установившегося тока $\sqrt{2}I_{\text{нач}}$. Спустя приблизительно полпериода он складывается с установившимся пусковым током. Тогда максимальное мгновенное значение тока в фазе обмотки статора получается примерно равным $i_{\text{макс}} \approx (1,7 \div 2,5)I_{\text{нач}}$.

Поскольку у малых машин затухание свободного тока происходит значительно быстрее из-за относительно больших активных сопротивлений обмоток, то для них $i_{\text{макс}}$ имеет меньшее значение.

При включении двигателей с контактными кольцами их обмотка ротора замкнута, как правило, на большое пусковое сопротивление. Поэтому здесь не получается больших бросков тока. Если же двигатель включают при разомкнутой обмотке ротора, то возникают процессы, аналогичные процессам при включении трансформатора, имеющего разомкнутую вторичную обмотку. Магнитный поток, сцепляющийся с одной из фаз обмотки статора, в самом неблагоприятном случае может быть равен (спустя примерно полпериода после включения) 1,8 – 1,9 его номинального значения. При этом, учитывая насыщение стальных участков магнитной цепи, получим наибольший мгновенный ток в данной фазе, превышающий амплитуду номинального тока в 2 – 2,5 раза.

Следует также отметить, что после включения короткозамкнутого двигателя в нем наряду с установившимся пусковым моментом возникают переменные переходные моменты, которые, накладываясь на первый, могут значительно повысить результирующий момент в

начальный период пуска. Переменные переходные моменты возникают из-за наличия уравнивающих токов в обмотках и вызванных ими магнитных полей. Наибольший результирующий момент получается примерно спустя $(0,6 \div 0,8)$ периода после включения и может быть больше установившегося начального момента в 3 – 4 раза.

Процессы при выключении двигателей также заслуживают внимания. В этом случае магнитная энергия, запасенная главным образом в воздушном зазоре, после быстрого отключения двигателя становится свободной и может вызвать в обмотках повышенные напряжения. Если роторная обмотка при выключении двигателя разомкнута, то магнитное поле быстро исчезает. Магнитная энергия переходит в тепловую в искровых промежутках между расходящимися контактами выключателя. Вследствие быстрого изменения потокосцеплений обмоток в последних могут возникнуть опасные перенапряжения, особенно в случае мощных двигателей. Поэтому не следует выключать двигатель с контактными кольцами при разомкнутой обмотке ротора. Пусковой реостат, следовательно, необходимо выполнять так, чтобы роторная цепь не могла быть разомкнутой. При выключении короткозамкнутых двигателей магнитное поле исчезает относительно медленно, так как оно будет поддерживаться наведенными им токами в роторной обмотке. Перенапряжения здесь практически не возникают.

При коротком замыкании асинхронного двигателя также возникают переходные процессы, при которых получаются большие токи в обмотках и большие вращающие моменты. Здесь под коротким замыканием двигателя понимают случай, когда произошло внезапное короткое замыкание в сети, от которой двигатель получает питание. Наибольший мгновенный ток, получающийся в одной из фаз статора спустя приблизительно полпериода после короткого замыкания, достигает значения, в 1,20 – 1,35 раза превышающего значение амплитуды установившегося начального пускового тока. Возникающий при этом наибольший вращающий момент будет тормозящим, т. е. направленным против вращения ротора. Он примерно равен $2,3 - 2,7 M_{нач}$.

Приведенные значения вращающих моментов, действующих на ротор и статор в начальные периоды переходных процессов, необходимо учитывать при конструировании двигателей. Момент, действующий на вал двигателя, зависит от отношения внешнего махового момента (GD^2) рабочей машины к маховому моменту ротора двигателя. Он тем больше, чем больше это отношение.

7.4. Коэффициент полезного действия и $\cos\varphi$ асинхронных двигателей

Ранее рассматривались потери, возникающие в машине при ее работе. Приведем здесь относительные значения этих потерь для наиболее часто применяемых на практике нормальных асинхронных двигателей мощностью от 0,6 до 100 кВт при их номинальной нагрузке (с повышением номинальной мощности они уменьшаются).

Электрические потери в обмотке статора, отнесенные к номинальной мощности $\frac{P_{э1}}{P_H} \cdot 100\%$, приближенно равны

$$7 \div 2,5\% \text{ при } 2p = 4 \text{ и } 2p = 6;$$

$$7,5 \div 2,5\% \text{ при } 2p = 8.$$

Электрические потери в обмотках ротора примерно такие же, как в обмотках статора. В тех же пределах приблизительно колеблются значения скольжения $s\%$.

Потери в стали статора P_{c1} и потери от пульсаций поля в зубцах статора и ротора $P_{cд}$, вызванные наличием пазов на статоре и роторе, составляют

$$\frac{P_{c1} + P_{cд}}{P_H} \cdot 100\% \approx 5 \div 2,5\%.$$

Механические потери (потери на трение) $P_{мех}$ зависят от частоты вращения и диаметра ротора, примененной системы вентиляции, типа подшипников. Они составляют

$$\frac{P_{мех}}{P_H} \cdot 100\% \approx 1,5 \div 0,8\%.$$

Добавочные потери $P_{доб}$, возникающие при нагрузке, вызваны полями рассеяния и не могут быть достаточно точно рассчитаны или определены опытным путем. Их оценивают в 0,5 процента от подведенной к двигателю мощности $P_{1н}$ при номинальной нагрузке на валу.

Однако, как показывает опыт, в современных короткозамкнутых двигателях при алюминиевой обмотке на роторе добавочные потери достигают 1 \div 1,5 процента от $P_{1н}$.

Коэффициенты полезного действия современных двигателей достигают высоких значений. Электрические машины обычно рассчитывают таким образом, чтобы их КПД был наибольшим при номинальной мощности или мощности, близкой к ней. Важная величина, характеризующая работу двигателя, – его $\cos\varphi$.

Размеры и стоимость генераторов электрических станций, трансформаторов, электрических сетей и аппаратуры зависят от произведения mUI , а их использование – от произведения $mUI\cos\varphi$. Отсюда понятно, почему повышение $\cos\varphi$ представляет собой задачу, имеющую большое народно-хозяйственное значение. Прежде всего стремятся повысить $\cos\varphi$ асинхронных двигателей, так как в электрических установках последние являются основными потребителями реактивного тока. Реактивный ток, потребляемый двигателем, идет главным образом на создание основного магнитного поля. Он мало отличается от тока холостого хода. Поэтому для улучшения $\cos\varphi$ двигателя нужно уменьшить его ток холостого хода, что достигается путем уменьшения воздушного зазора δ между статором и ротором. При этом снижается магнитное сопротивление для главного потока Φ , и, следовательно, для его создания требуется меньший реактивный (намагничивающий) ток. Однако при выборе δ приходится считаться с необходимостью получить механически надежную машину, изготовление и установка которой не вызовут больших затруднений. Вследствие этого для δ существует некоторое минимальное значение, ниже которого не следует спускаться. Для машин различной мощности $\delta = 0,2 \div 1,5$ мм.

При проектировании асинхронных двигателей большое внимание уделяют вопросу получения высокого $\cos\varphi$. Выпускаемые в настоящее время нормальные асинхронные двигатели имеют высокие значения $\cos\varphi$. При меньших нагрузках $\cos\varphi$ снижается, так как при этом активная составляющая тока уменьшается, тогда как его реактивная составляющая остается почти без изменений. Поэтому для электропривода следует выбирать такой двигатель, который будет работать по возможности с номинальной нагрузкой.

7.5. Современные асинхронные машины

Конструкции и характеристики асинхронных двигателей, выпускаемых заводами, вполне определяют современное состояние электромашиностроения в данной области.

Ранее отмечалось, что асинхронные двигатели – наиболее распространенные электрические машины. Поэтому их проектированию и изготовлению всегда уделялось большое внимание. Массовое изготовление машин требует особенно тщательной разработки их конструкции и технологических методов производства. Большое значение при этом по-

лучают вопросы унификации и нормализации деталей и целых конструктивных узлов, их взаимозаменяемости. В связи с этим целесообразно создание серий машин, т. е. рядов машин возрастающей мощности, объединенных общностью конструкции и технологических методов производства и предназначенных для массового изготовления.

Единые серии асинхронных двигателей, изготавливаемых на заводах, охватывают мощности от долей ватта до нескольких тысяч киловатт и различные частоты вращения. Асинхронные двигатели строят на номинальные напряжения 127, 220, 380, 500, 660, 3000, 6000 и 10 000 В.

Основная серия трехфазных асинхронных двигателей массового применения – серия А. В нее входят двигатели мощностью от 0,6 до 125 кВт. На базе серии А разработаны различные модификации: двигатели с повышенным пусковым моментом, с повышенной способностью к перегрузке по моменту, с повышенным скольжением, с контактными кольцами и др. На рис. 7.3 представлен двигатель серии А.

Все двигатели этой серии выполняют с короткозамкнутой алюминиевой клеткой на роторе. Общепринятая конструкция для них – защищенная конструкция, при которой исключается попадание в машину капля воды, падающих сверху или под углом 45° к горизонтали. Двигатели серии А имеют корпус и подшипниковые щиты, выполненные из чугуна или из алюминиевого сплава (при малых мощностях). В последнем случае они обозначаются как серия АЛ.

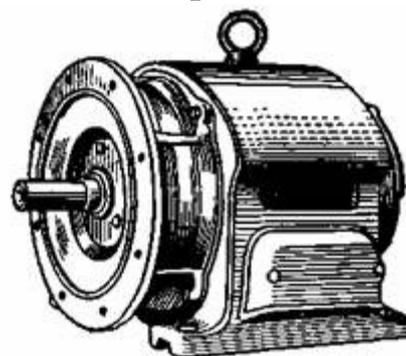


Рис. 7.3. Двигатель серии А с фланцем для крепления

На рис. 7.4 представлен двигатель серии АО. Двигатели этой серии имеют закрытую конструкцию с обдувом внешней ребристой поверхности корпуса статора, который осуществляется при помощи вентилятора. Последний помещен на валу двигателя между внутренним щитом, закрывающим ротор двигателя, и внешним щитом с отверстиями для прохода воздуха. Малые двигатели закрытой конструкции с обдувом внешней поверхности корпуса статора делают также с корпусом статора и щитами из алюминия. Они входят в серию АОЛ. Заводы выпускают в том числе двигатели серии АК – двигатели с контактными кольцами мощностью до 125 кВт (рис. 7.5).

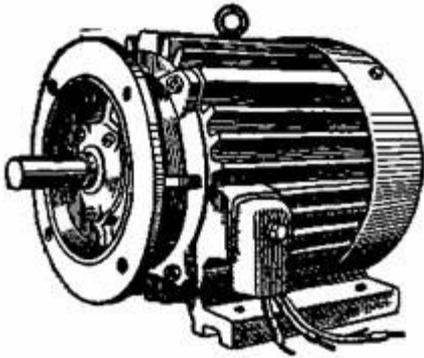


Рис. 7.4. Двигатель серии АО

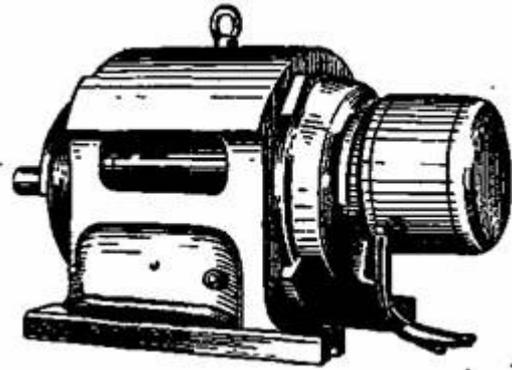


Рис. 7.5. Двигатель серии АК
(справа виден кожух, закрывающий
контактные кольца)

Контрольные вопросы

1. Каковы устройство статора и ротора асинхронного двигателя и принципы их работы?
2. Каковы частота вращения магнитного поля и способы ее регулирования? Как влияет на нее частота сети?
3. Что называют скольжением асинхронного двигателя? Поясните соответствующую формулу. Какова область изменения скольжения асинхронной машины:
 - а) в двигательном режиме;
 - б) режиме электромагнитного торможения;
 - в) генераторном режиме.
4. Почему в момент пуска ток в двигателе во много раз больше номинального? Какие нежелательные явления возникают в сети при протекании по ней больших пусковых токов?
5. Проанализируйте кривую $n(M)$ и поясните процесс пуска асинхронного двигателя. Укажите на графике критический, пусковой и номинальный моменты.
6. Для каких целей в асинхронном электродвигателе с двойной беличьей клеткой наружную клетку выполняют из стержней с малой площадью поперечного сечения?
7. Поясните способ уменьшения пускового тока двигателя при переключении обмоток статора с «треугольника» на «звезду». Каковы преимущества этого способа, учитывая изменения тока, мощности и момента?

8. Как используют активные и реактивные сопротивления для улучшения пускового режима двигателя?
9. Для каких целей у асинхронного двигателя применяют ротор с глубокими пазами?
10. Как влияет скольжение на электродвижущую силу и частоту тока, потери ротора?
11. Как определить потери в стали при известных $P_{2н}$, P_n , η_n ?
12. Каков физический смысл электрического эквивалента механической нагрузки?
13. Сравните ток холостого хода асинхронного двигателя и трансформатора одинаковой мощности.
14. Поясните процесс нагрузки асинхронного двигателя по его структурно-логической схеме.
15. Каковы преимущества тиристорного индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя?
16. Какие координаты у характерных точек механической характеристики асинхронного двигателя?
17. Определите синхронную и номинальную частоту вращения асинхронного двигателя типа 4А180L8У3 при $S_n = 2,5\%$.
18. Определите частоту тока ротора асинхронного двигателя по условиям вопроса 17.
19. Почему в суммарных потерях не учитывают магнитные потери ротора?
20. Как изменятся $M_{пуск}$ и ток I_1 при переключении обмоток статора с Δ на Y ?
21. Объясните принципиальную электрическую схему стенда исследования асинхронного двигателя.
22. Приведите рабочие характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
23. Приведите регулировочные механические характеристики асинхронного двигателя.
24. Каковы устройство и назначение сельсинов?
25. Как получить пусковой момент в однофазном двигателе?
26. Какова величина скольжения асинхронного двигателя при противовключении?
27. Как определить электромагнитную мощность асинхронного двигателя?

28. Используя структурно-логическую схему асинхронного двигателя, объясните процесс нагрузки и саморегулирования.
29. Почему при частотном регулировании частоты вращения асинхронного двигателя одновременно с частотой тока необходимо изменять напряжение?
30. Сформулируйте закон полного тока для магнитной цепи асинхронного двигателя.
31. Как обеспечить номинальные параметры режима работы асинхронного двигателя?
32. На каком участке магнитной цепи асинхронного двигателя наибольшая магнитная движущая сила?
33. Какие существуют типы обмоток статора асинхронного двигателя?
34. Какие параметры необходимы для построения развернутой схемы трехфазной двухслойной обмотки статора?
35. Каково влияние обмоточного коэффициента на ЭДС статора?
36. Как определяют шаг обмотки статора?
37. Как защитить асинхронный двигатель от аварийных режимов работы?
38. Что определяет магнитная характеристика асинхронного двигателя?
39. Как можно увеличить критическое скольжение асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?
40. Как переходить из двигательного режима в тормозные режимы работы асинхронного двигателя?
41. Каковы значения $\cos\phi$ и КПД при холостом ходе асинхронного двигателя?
42. Как определяют величину момента нагрузки асинхронного двигателя опытным путем?
43. Определите момент нагрузки для асинхронного двигателя с паспортными данными при частоте вращения 720 об/мин (считая механическую характеристику на данном участке линейной).
44. Какие условия необходимы для получения в расточке статора кругового вращающегося магнитного поля?
45. Почему регулирование частоты вращения изменением скольжения осуществляется при постоянном моменте нагрузки?
46. Как изменится частота тока ротора при увеличении нагрузки?

47. Каковы устройство и принцип действия асинхронного двигателя с фазным ротором?
48. Объясните возникновение вращающего момента в двигателе.
49. Каковы пусковые свойства асинхронного двигателя с короткозамкнутым и фазным роторами?
50. Каковы способы регулирования частоты вращения асинхронного двигателя?
51. Как изменяются скольжение, частота тока, электродвижущая сила ротора при переходе от режима пуска до холостого хода и от режима холостого хода до номинальной нагрузки?
52. Каковы условия для получения вращающегося магнитного поля?
53. Каково отличие асинхронного двигателя с фазным ротором от асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?
54. Как влияют частота напряжения сети и величина добавочного сопротивления в цепи ротора на величину пускового тока?
55. Как влияет величина нагрузки P_2 на основные параметры асинхронного двигателя с фазным ротором?
56. Какие существуют типы обмоток асинхронного двигателя и каковы их основные параметры?
57. Каковы основные свойства асинхронного двигателя?
58. Каков физический смысл электрического эквивалента механической нагрузки?
59. Сравните ток холостого хода асинхронного двигателя и трансформатора одинаковой мощности.
60. Поясните структурно-логическую схему асинхронного двигателя и процесс саморегулирования.
61. Как происходит индукционно-динамическое торможение асинхронного двигателя?
62. Каковы координаты характерных точек механической характеристики асинхронного двигателя?
63. Определите синхронную и номинальную частоту вращения ротора асинхронного двигателя типа 4АН80Л8У3 при $S_n = 2,5 \%$.
64. Почему при холостом ходе у асинхронного двигателя низкие $\cos\varphi$ и КПД?
65. Почему не учитывают магнитные потери ротора при номинальной нагрузке?

66. Как определяют добавочное сопротивление ротора для $M_{\text{пуск}} = M_{\text{кр}}$ наибольшего пускового момента?

67. Каков закон полного тока для магнитной цепи асинхронного двигателя?

68. Каков порядок расчета магнитной цепи асинхронного двигателя?

69. Каково уравнение напряжений статора и ротора асинхронного двигателя?

70. Какова электрическая схема замещения асинхронного двигателя с фазным ротором?

71. При каком добавочном сопротивлении в цепи ротора уменьшается пусковой момент?

Глава 8. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

8.1. Общие сведения

Генераторы переменного тока, работающие на электрических станциях, в большинстве случаев являются синхронными машинами. Эти машины применяют также в качестве двигателей. Наибольшее распространение получили трехфазные генераторы и двигатели.

Синхронная машина в обычном исполнении состоит из неподвижной части – статора, в пазах которого помещается трехфазная обмотка, и вращающейся части – ротора с электромагнитами, к обмотке которых подводится постоянный ток при помощи контактных колец и наложенных на них щеток (рис. 8.1).

Статор синхронной машины ничем не отличается от статора асинхронной машины. Ротор синхронной машины выполняют или явнополюсным (с выступающими полюсами, см. рис. 8.1), или неявнополюсным (цилиндрический ротор, рис. 8.2).

В зависимости от рода первичного двигателя, которым приводится во вращение синхронный генератор, выделяют паротурбинный генератор, или сокращенно турбогенератор (первичный двигатель – паровая турбина), гидротурбинный генератор, или сокращенно гидрогенератор (первичный двигатель – гидравлическая турбина; дизель-генератор (первичный двигатель – дизель).

Турбогенераторы – быстроходные неявнополюсные машины, выполняемые в настоящее время, как правило, с двумя полюсами. Турбогенератор вместе с паровой турбиной, с которой он механически соединяется, называют **турбоагрегатом** (рис. 8.3).

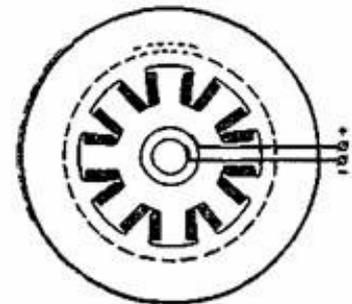


Рис. 8.1. Явнополюсная синхронная машина ($2p = 8$)

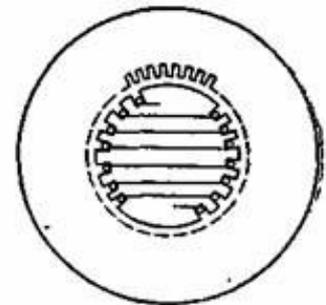
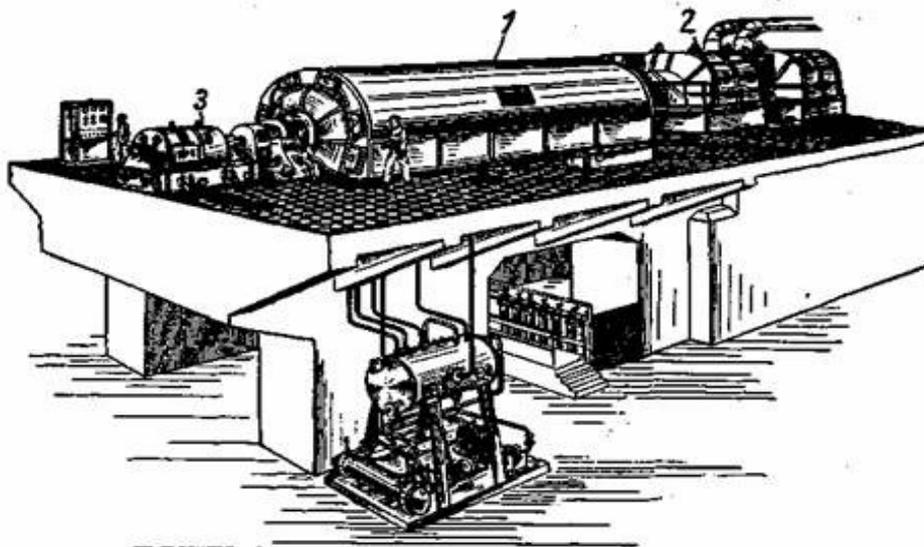


Рис. 8.2. Неявнополюсная синхронная машина ($2p = 2$)



*Рис. 8.3. Общий вид турбоагрегата:
1 – турбогенератор; 2 – паровая турбина; 3 – возбудитель*

Гидрогенераторы – в обычных случаях тихоходные явнополусные машины (см. рис. 8.1), выполняемые с большим числом полюсов и с вертикальным валом (рис. 8.4).

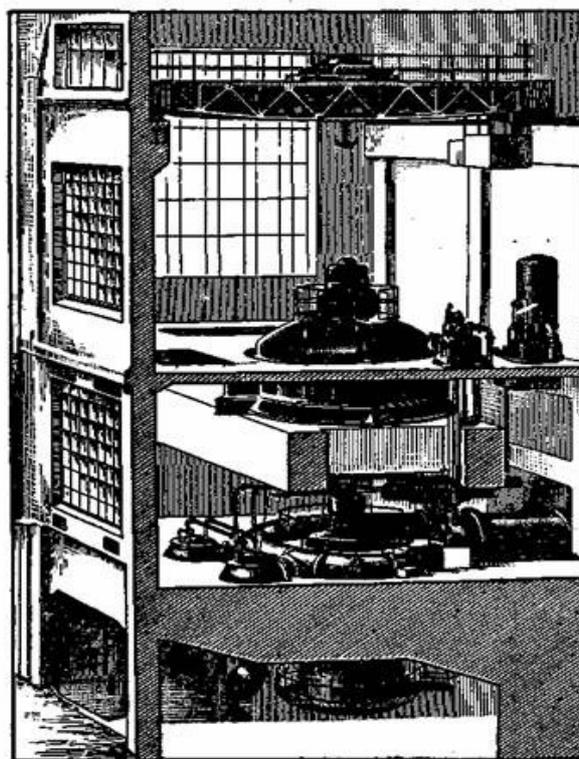


Рис. 8.4. Общий вид гидроагрегата

8.2. Холостой ход генератора

Под **холостым ходом генератора** понимают такой режим его работы, при котором ток в обмотке якоря (статора) равен нулю. Следовательно, магнитное поле в синхронном генераторе при холостом ходе создается только НС обмотки возбуждения. Мы можем принять, что это магнитное поле состоит из двух полей: основного поля, магнитные линии которого проходят через воздушный зазор и сцепляются с обмоткой статора; и поля рассеяния полюсов, магнитные линии которого сцепляются только с обмоткой возбуждения.

Основному полю соответствует поток в воздушном зазоре Φ , который при вращении полюсов будет наводить в обмотке якоря ЭДС. Важно, особенно для машин большой мощности, чтобы кривая этой ЭДС была как можно ближе к синусоиде.

По ГОСТ 183-55 проверку синусоидальности кривой делают для линейного напряжения при холостом ходе и при рабочем соединении обмотки якоря. Критерием для оценки кривой напряжения служит **коэффициент искажения синусоидальности кривой**, под которым понимают выраженное в процентах отношение квадратного корня из суммы квадратов амплитуд трех наибольших гармонических составляющих данной периодической кривой к амплитуде ее основной гармонической составляющей. При номинальном напряжении коэффициент искажения синусоидальности кривой не должен превышать 5 % для генераторов мощностью свыше 1000 кВ · А и 10 % для генераторов мощностью от 10 до 1000 кВ · А. В отдельных специальных случаях требования в отношении приближения кривой напряжения к синусоидальной кривой могут быть повышены согласно особым условиям, установленным между заказчиком и поставщиком машины.

Для получения кривой ЭДС, близкой к синусоиде, прежде всего необходимо, чтобы кривая поля машины была по возможности синусоидальной. В явнополюсной машине, как указывалось, этого добиваются, придавая надлежащую форму очертанию полюсного наконечника (той части полюса, которая обращена к якорю). В неявнополюсных машинах на роторе выбирают такое соотношение между частью его окружности, не имеющей пазов, и частью окружности с пазами, чтобы в кривой поля снизились амплитуды наиболее резко выраженных высших гармоник.

Кроме того, обмотку якоря выполняют с укороченным шагом, что в значительной степени способствует улучшению формы кривой наведенной ЭДС. В неявнополюсных машинах (турбогенераторах) тому же самому способствует выбор большого числа пазов на полюс и фазу ($q = 6 \div 12$).

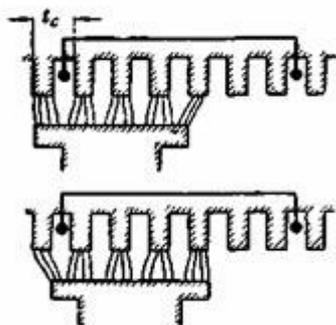


Рис. 8.5. Картина поперечных колебаний поля в воздушном зазоре

В тихоходных явнополюсных машинах (например, гидрогенераторах с вертикальным валом) при большом числе полюсов полюсное деление τ получается недостаточным для размещения на нем большого числа пазов, а потому для таких машин приходится часто брать $q < 3$. В этом случае при открытых пазах на якоре и при q , равном целому числу, в кривой ЭДС фазы могут иметь место так называемые зубцовые гармоники с относительно большими амплитудами. Они в основном возникают из-за поперечных колебаний поля в воздушном зазоре, обусловленных зубчатостью якоря. Такие колебания поля вправо и влево относительно оси полюсов (рис. 8.5) происходят с частотой $f_z = \frac{Z_n}{60}$, так как при перемещении ротора на одно пазовое деление якоря t_c получается полный период колебания.

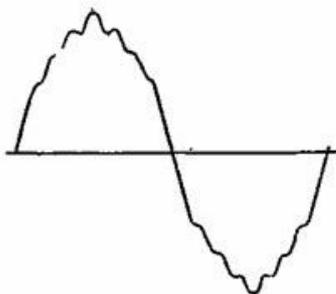


Рис. 8.6. Осциллограмма ЭДС синхронной машины при наличии зубцовых гармоник

Соответственно этим колебаниям поля будет изменяться потокосцепление фазы, и, следовательно, в ней будет наводиться ЭДС той же частоты f_z (кроме ЭДС от первой и высших гармоник основного поля). Поэтому кривая ЭДС получает вид, представленный на рис. 8.6.

8.3. Трехфазный синхронный генератор. Симметричная нагрузка

Рассмотрим работу трехфазного синхронного генератора при симметричной нагрузке, когда векторы фазных токов равны по величине и сдвинуты по фазе на 120° . При этом будем иметь в виду одиночную работу генератора, когда он работает на свою собственную сеть независимо от других синхронных машин.

8.3.1. Реакция якоря

Токи в обмотке якоря создают НС, которая будет вращаться относительно якоря в ту же сторону и с такой же частотой, что и НС обмотки возбуждения. Действительно, частота вращения НС якоря $n_{\text{я}} = \frac{60f}{p}$, а частота тока якоря $f = \frac{pn_{\text{п}}}{60}$, где $n_{\text{п}}$ – частота вращения полюсов; отсюда, подставив в первое равенство значение f из второго равенства, найдем, что $n_{\text{я}} = n_{\text{п}}$; направление вращения НС якоря зависит от порядка чередования фаз его обмотки (например $A - B - C$), а этот порядок чередования определяется направлением вращения полюсов.

Таким образом, НС якоря и НС обмотки возбуждения неподвижны одна относительно другой. Поле машины при нагрузке будет создаваться совместным действием обеих НС. Оно будет отличаться от поля при холостом ходе.

Воздействие НС якоря на поле машины называют **реакцией якоря**.

Рассмотрим реакцию якоря, имея в виду качественную сторону этого явления. Количественный учет реакции якоря, так же как и внутренних падений напряжения в обмотке якоря, производят при помощи векторных диаграмм, которые будут рассмотрены в дальнейшем.

Синхронный генератор может работать с отстающим или опережающим током по отношению к ЭДС \dot{E}_0 , наведенной потоком полюсов $\dot{\Phi}_0$, или с током, совпадающим по фазе с ЭДС \dot{E}_0 .

Рассмотрим реакцию якоря при токе, совпадающем по фазе с ЭДС. На рис. 8.7, a_1 изображены векторы тока \dot{I} , ЭДС \dot{E}_0 и потока полюсов $\dot{\Phi}_0$.

Угол между \dot{I} и \dot{E}_0 , который будем обозначать через ψ , равен нулю. Здесь под ЭДС \dot{E}_0 понимается та ЭДС, которая наводится в обмотке якоря потоком полюсов $\dot{\Phi}_0$ (потоком воздушного зазора) при холостом ходе. На рис. 8.7, a_2 показаны полюсы машины и ее статор с одной фазой, причем фаза здесь заменена одной катушкой. При данном положении фазы относительно полюсов наведенная в ней ЭДС будет максимальной, так как поток полюсов, пронизывающий катушку в рассматриваемый момент времени, проходит через нулевое значение. Ток в фазе при $\varphi = 0$ будет также максимальным. Ранее из рассмотрения созданной трехфазной обмоткой вращающейся НС было установлено,

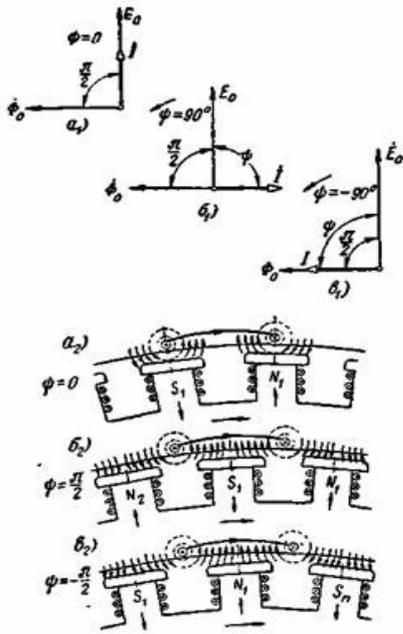


Рис. 8.7. Реакция якоря:
a – при $\psi = 0$; *б* – $\psi = \pi/2$;
в – $\psi = -\pi/2$

что ее ось (амплитуда) совпадает с осью той фазы, ток которой имеет максимальное значение. Следовательно, ось НС совпадает с осью катушки, показанной на рис. 8.7.

На рис. 8.7 показаны индукционные линии поля, созданного обмоткой якоря. Их направление найдено по правилу буравчика в соответствии с направлением наведенного тока, которое определено по правилу правой руки. На рис. 8.7, *a*₂ видно, что поле якоря по отношению к оси полюсов является поперечным. Намагничивающая сила якоря будет ослаблять поле на набегающей половине полюса и усиливать его на сбегающей половине полюса.

8.3.2. Активное и индуктивное сопротивления обмотки якоря

1. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря.

Понятие индуктивного сопротивления рассеяния как некоторого параметра обмотки якоря синхронной машины аналогично тому же самому понятию в применении к обмотке статора асинхронной машины.

Поле рассеяния якоря можно представить сцепленным только с обмоткой якоря и не зависящим от других полей машины. Магнитные линии этого поля проходят между стенками пазов, между коронками зубцов статора и вокруг лобовых частей его обмотки. Можно считать, что потокосцепление рассеяния определяется только магнитной проводимостью тех воздушных промежутков, по которым проходят магнитные линии поля рассеяния. Поэтому можно принять, что между током якоря I и потокосцеплением рассеяния, а следовательно, и наведенной им ЭДС E_σ существует пропорциональная зависимость

$$\dot{E}_\sigma = -j\dot{I}x_\sigma,$$

где E_σ – ЭДС рассеяния; x_σ – индуктивное сопротивление рассеяния якоря, значение которого можно считать постоянным.

2. Активное сопротивление обмотки якоря.

Активное сопротивление обмотки якоря r_a больше ее сопротивления r постоянному току, что обусловлено вихревыми токами, которые наводятся полем рассеяния обмотки якоря. Увеличение r_a по сравнению с r обычно небольшое для современных больших машин. Для таких машин, например турбогенераторов, принимают ряд мер в целях уменьшения потерь, вызванных полем рассеяния. Наиболее эффективная мера – выполнение обмотки статора из транспонированных стержней, т. е. из стержней, состоящих из некоторого числа элементарных проводников, особым образом скрученных друг с другом, вследствие чего ЭДС, наведенные в них пазовым полем рассеяния, практически равны между собой. Поскольку эти элементарные проводники изолированы друг относительно друга, то внутри стержней не возникает вихревых токов и ток распределяется практически равномерно по всем элементарным проводникам. Активное сопротивление обмотки якоря невелико, и обусловленное им активное падение напряжения составляет, например, для больших машин меньше 0,5 процента от номинального напряжения.

8.3.3. Характеристики и векторные диаграммы

При исследовании синхронных генераторов, так же как и при исследовании других электрических машин, обращаются к их характеристикам, т. е. к кривым, определяющим зависимости между величинами, характеризующими рабочие режимы машины.

Обычно синхронные генераторы работают с постоянной частотой вращения, что обусловлено необходимостью поддерживать постоянной частоту тока. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать характеристики, которые получаются при постоянной частоте вращения.

Одна из важнейших характеристик – рассмотренная ранее характеристика холостого хода. Она влияет на форму почти всех других кривых синхронной машины, характеризующих ее работу при нагрузке.

Характеристики генератора могут быть сняты опытным путем. Их также можно построить по характеристике холостого хода и параметрам машины, полученным расчетным или опытным путем. Такое построение позволяет выявить влияние различных параметров машины на ее характеристики. Оно будет показано в дальнейшем. Одновременно с этим будут рассмотрены способы опытного определения параметров машины.

8.3.3.1. Характеристика короткого замыкания

Характеристика короткого замыкания $I_k = f(I_B)$ при $U = 0 = \text{const}$ представлена на рис. 8.8.

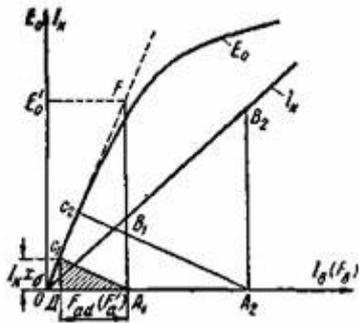


Рис. 8.8. Характеристика короткого замыкания и ее построение

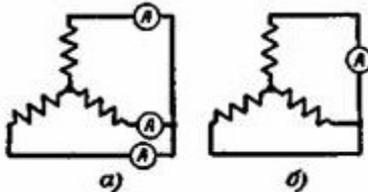


Рис. 8.9. Схемы для опытов короткого замыкания

Здесь имеется в виду установившийся ток короткого замыкания I_k , т. е. ток, значение которого длительно держится постоянным.

При снятии этой характеристики опытным путем используют схемы, приведенные на рис. 8.9, а и б. Для схемы на рис. 8.9, а необходимо иметь три одинаковых амперметра. Обычно опыт проводят при схеме на рис. 8.9, б. Некоторая несимметричность отдельных цепей в данном случае допустима, так как сопротивление амперметра значительно меньше сопротивления отдельных фаз обмотки.

Характеристика короткого замыкания, как увидим из построения ее расчетным путем, должна быть изображена в виде прямой линии.

Обратимся к векторным диаграммам короткозамкнутого генератора.

На рис. 8.10 представлены диаграммы короткозамкнутого генератора. На диаграмме явнополюсного генератора (см. рис. 8.10, а)

$$\begin{aligned} |\overline{OF}| &= E'_0; \quad |\overline{OC}| = I_k r_a; \quad |\overline{CA}| = I_k x_c; \quad |\overline{AD}| = I_k x_{ad}; \\ |\overline{AB}| &= I_q x_{ad}; \quad |\overline{CD}| = I_k x_q; \quad |\overline{BF}| = I_d x_{ad}. \end{aligned}$$

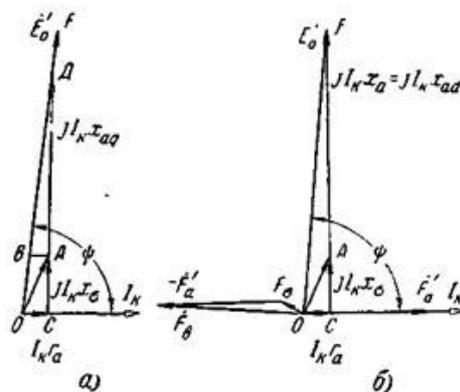


Рис. 8.10. Диаграммы короткозамкнутого генератора: а – явнополюсного; б – неявнополюсного

8.3.4. Индукционная нагрузочная характеристика

Из нагрузочных характеристик, представляющих собой зависимости $U = f(I_B)$ при $I = \text{const}$ и $\cos \varphi = \text{const}$, практическое значение имеет лишь нагрузочная характеристика при $\cos \varphi = 0$. Будем ее называть индукционной нагрузочной характеристикой. Она может быть снята при использовании в качестве нагрузки другой синхронной машины, включенной на параллельную работу с испытуемой.

Если характеристика снимается опытным путем при нагрузке генератора на реактивную катушку, то $\cos \varphi$ очевидно нельзя установить равным нулю. Однако опыт показывает, что при снятии рассматриваемой характеристики достаточно установить $\cos \varphi \leq 0,2$. Поэтому при испытании генераторов небольшой мощности в качестве нагрузки иногда используют реактивные катушки с переменной индуктивностью, имеющие относительно небольшие потери.

На рис. 8.11, *а* представлена индукционная нагрузочная характеристика. В треугольнике точка *A* в соответствии с тем током, для которого она снималась, может быть взята из характеристики короткого замыкания (см. рис. 8.8). На рис. 8.11, *а* кроме индукционной нагрузочной изображена также характеристика холостого хода E_0 . При помощи этих двух характеристик можно определить, как будет показано, сопротивление x_σ и НС реакции якоря F_{ad} (в случае явнополюсной машины) или F'_a (в случае неявнополюсной машины).

Покажем, как может быть построена индукционная нагрузочная характеристика, если известны характеристика холостого хода и катеты реактивного треугольника, т. е. $I x_\sigma$ и F_{ad} или F'_a . Для этого нужно построить реактивный треугольник DCA в нижней части характеристики холостого хода (см. рис. 8.11, *а*) и передвигать его параллельно самому себе так, чтобы вершина *C* скользила по характеристике холостого хода; тогда вершина *A* опишет искомую характеристику. Для того чтобы убедиться, что точки полученной таким образом характеристики действительно дают напряжения генератора при его работе с $\cos \varphi = 0$, рассмотрим построенные для этого случая диаграммы явнополюсной и неявнополюсной машин (рис. 8.11, *б* и *в*).

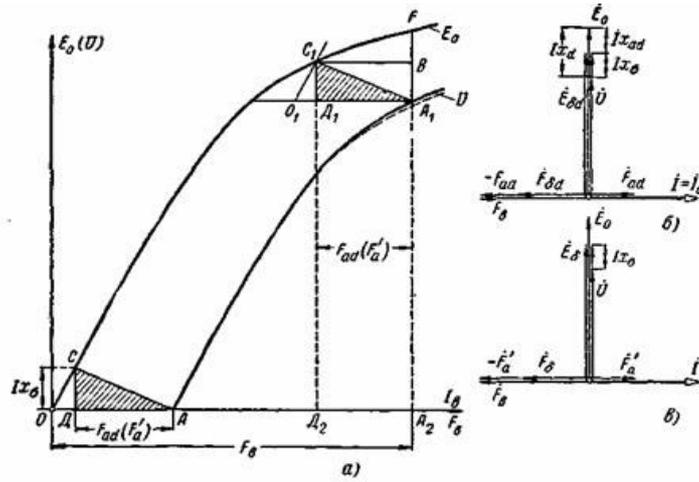


Рис. 8.11. Индукционная нагрузочная характеристика и определение сторон реактивного треугольника

Для диаграммы явнополюсной машины, если пренебречь активным сопротивлением обмотки статора, получим

$$\overline{D_2 D_1} = U; \quad \overline{D_1 C_1} = I x_{\sigma}; \quad \overline{D_2 C_1} = E_{\delta d}; \quad \overline{D_2 A_2} = F_{ad};$$

$$\overline{O D_2} = F_{\delta d}; \quad \overline{O A_2} = F_{\Sigma}; \quad \overline{B F} = I_d x_{ad}; \quad \overline{A_1 F} = I_d x_d$$

($I_d = I$, так как $\varphi = \psi = \frac{\pi}{2}$; здесь x_{ad} , а следовательно, и x_d — значения сопротивлений по продольной оси при условном учете насыщения), для диаграммы неявнополюсной машины

$$\overline{D_2 D_1} = U; \quad \overline{D_1 C_1} = I x_{\sigma}; \quad \overline{D_2 C_1} = E_{\delta}; \quad \overline{D_2 A_2} = F'_a;$$

$$\overline{O D_2} = F_{\delta}; \quad \overline{O A_2} = F_{\Sigma}.$$

8.3.5. Регулировочные характеристики

Регулировочные характеристики $I_b = f(I)$ при $U = \text{const}$ и $\cos \varphi = \text{const}$ представлены на рис. 8.12.

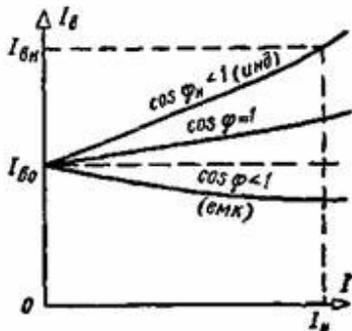


Рис. 8.12. Регулировочные характеристики

Они показывают, как нужно изменять возбуждение, чтобы при изменении тока нагрузки и сохранении $\cos \varphi = \text{const}$ напряжение на зажимах генератора оставалось постоянным.

Регулировочные характеристики могут быть сняты опытным путем или найдены при помощи векторных диаграмм, если известны характеристика холостого хода и параметры x_{σ} , x_d («ненасыщенное» значение), x_q . В последнем случае приходится строить ряд диаграмм для различных значений тока I при одних и тех же заданных напряжении U и $\cos \varphi$.

Покажем на конкретных примерах, как производится построение диаграмм неявнополюсного и явнополюсного генераторов для определения тока возбуждения при заданной нагрузке: $U, I, \cos\varphi$. Для примеров возьмем турбогенератор (т) и гидротурбинный генератор (г) и будем пользоваться при построении диаграмм «нормальными» характеристиками холостого хода в относительных единицах (рис. 8.13)

$$E_0^* = f(I_E^*);$$

здесь

$$E_0^* = \frac{E_0}{U_H}, \quad I_E^* = \frac{I_E}{I_{E0}}$$

где I_{E0} — ток возбуждения, соответствующий номинальному напряжению при холостом ходе. Эти характеристики показаны на рис. 8.13.

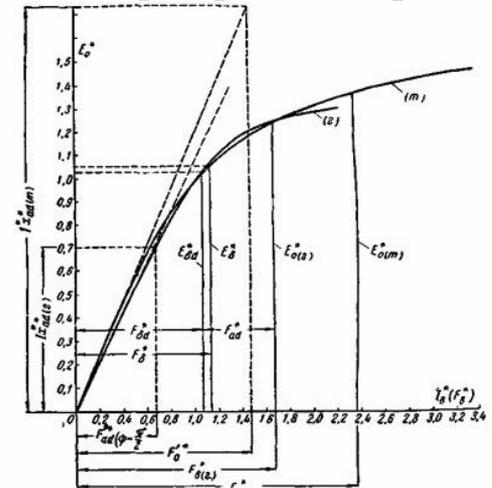


Рис. 8.13. Характеристики холостого хода турбогенератора (т) и гидротурбинного генератора (г)

8.3.6. Внешние характеристики

Внешние характеристики $U = f(I)$ при $I_E = \text{const}$ и $\cos\varphi = \text{const}$ представлены на рис. 8.14. Их обычно снимают, установив при $I = I_H$ такой ток возбуждения I_E , чтобы при заданном $\cos\varphi$ получить $U = U_H$. По характеристикам могут быть найдены процентные значения изменения напряжения при переходе генератора от нагрузки к холостому ходу.

Определение внешних характеристик может быть произведено по регулировочным характеристикам, построенным при помощи векторных диаграмм, и характеристикам холостого хода.

Пусть требуется определить внешнюю характеристику при номинальном токе возбуждения $I_{E.H}$, соответствующем U_H при I_H и $\cos\varphi_H$. В этом случае известны, следовательно, две точки внешней характеристики: U_H при I_H и $U_0 = E_0$ при $I = 0$. Для определения промежуточных точек нужно построить регулировочные характеристики для $\cos\varphi_H = \text{const}$ и напряжений U', U'' и так далее, значения которых лежат между U_0 и U_H .

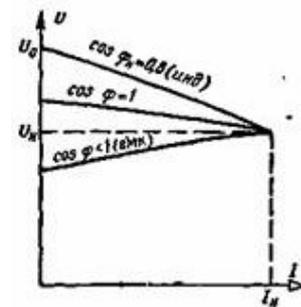


Рис. 8.14. Внешние характеристики

На рис. 8.15 показано, как определяются промежуточные точки внешней характеристики по регулировочным характеристикам.

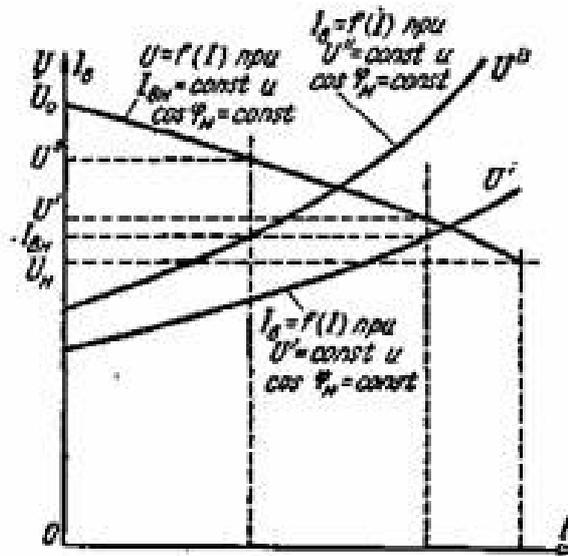


Рис. 8.15. Построение внешней характеристики по регулировочным характеристикам

8.4. Несимметричная нагрузка трехфазного генератора

Несимметричная нагрузка трехфазных генераторов получается при неравномерном распределении однофазных приемников энергии. Однако в большинстве случаев достижение практически симметричной нагрузки не вызывает затруднений.

Если нагрузку составляют однофазные электрические печи большой мощности, например на металлургических заводах, то распределению таких приемников энергии между фазами трехфазной сети следует уделять особое внимание. При наличии на указанных заводах собственных небольших электрических станций все же приходится считаться с возможностью заметной несимметрии нагрузки генераторов этих станций.

Несимметричная нагрузка может получиться при аварийных режимах, например в случае обрыва одного из проводов линии или при работе генераторов на линию через неполную трансформаторную группу. Возможны также несимметричные короткие замыкания: двухфазное, однофазное (при наличии нулевого провода).

Таким образом, исследование работы трехфазных генераторов при несимметричной нагрузке наряду с теоретическим имеет и практическое значение. При этом исследовании мы будем пользоваться методом симметричных составляющих. Примем, что нагрузка характеризуется несимметричной системой токов в фазах статора $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$, которая при разложении дает все три симметричные составляющие системы: $\dot{I}_{a1}, \dot{I}_{b1}, \dot{I}_{c1}$ (токи прямой последовательности); $\dot{I}_{a2}, \dot{I}_{b2}, \dot{I}_{c2}$ (токи обратной последовательности); $\dot{I}_{a0}, \dot{I}_{b0}, \dot{I}_{c0}$ (токи нулевой последовательности). Можно действие каждой из этих симметричных систем токов в синхронной машине с симметричной обмоткой на статоре учитывать отдельно.

Токи прямой последовательности создадут НС, вращающуюся в сторону вращения полюсов с синхронной частотой. Будем ее называть *прямо-синхронной* НС. Она будет неподвижна относительно полюсов и станет определенным образом воздействовать на основное поле машины, т. е. создавать реакцию якоря в том смысле, в каком понимают это явление.

Токи обратной последовательности создадут НС, вращающуюся в обратную сторону с синхронной частотой. Будем ее называть *обратно-синхронной* или *обратной* НС. Она будет вращаться относительно полюсов с двойной синхронной частотой и вызовет соответствующее обратно-синхронное (или обратное) поле.

Токи нулевой последовательности создадут НС, первые гармоники (так же как и гармоники с номерами 5, 7, 11, 13 и т. д.), которые в сумме дадут нуль. Останутся только гармоники с номерами, кратными трем. Они вызовут пульсирующие поля, оказывающие на работу машины относительно слабое влияние.

8.5. Параллельная работа генераторов

Обычно на электрических станциях устанавливают несколько синхронных генераторов, предназначенных для параллельной работы, что в большой степени повышает надежность работы станций в отношении бесперебойности энергоснабжения потребителей. В этом случае возможно в зависимости от потребной мощности включать на совместную работу такое количество генераторов, чтобы каждый из них отдавал номинальную мощность или мощность, близкую к ней. Тогда не только генераторы, но и их первичные двигатели будут работать с

высоким КПД, так как те и другие рассчитывают и выполняют таким образом, чтобы значения их КПД были наибольшими при номинальной нагрузке. Кроме того, и электрические станции часто объединяют для параллельной работы в одну мощную систему, позволяющую наилучшим образом как с технической, так и с экономической точки зрения разрешать задачу производства и распределения электрической энергии. Поэтому вопросы, относящиеся к параллельной работе синхронных машин, имеют большое практическое значение.

При изучении этих вопросов приходится иметь дело с теми свойствами синхронных машин, которые характерны только для них и выделяют их среди других машин переменного тока.

Сначала рассмотрим применительно к синхронным генераторам общие вопросы параллельной работы синхронных машин, одинаково относящиеся к генераторному и двигательному режимам последних.

8.5.1. Синхронизация и включение на параллельную работу

При включении на параллельную работу синхронных машин, как и в случае трансформаторов, необходимо выполнить определенные условия.

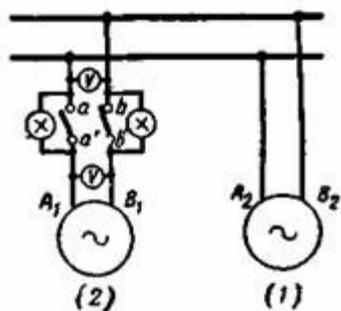


Рис. 8.16. Включение на параллельную работу однофазного генератора

Рассмотрим включение на параллельную работу однофазной машины. На рис. 8.16 изображены генератор, который присоединен к общим шинам, и генератор, который нужно включить на параллельную работу с первым.

Перед включением необходимо добиться равенства напряжений на зажимах генератора и сети, к которой подключают генератор. Поскольку при параллельной работе наведенная ЭДС должна в каждый момент времени уравнивать напряжение сети, то необходимо иметь одинаковые формы кривых ЭДС генераторов. Этому требованию удовлетворяют современные синхронные машины: они имеют стандартную, практически синусоидальную форму кривой ЭДС. Поэтому достаточно добиться при включении равенства действующих значений напряжений, а также равенства частот и фаз. Этого достигают посредством изменения тока в обмотке возбуждения подключаемого генератора и путем регулирования частоты его вращения.

Определение момента времени, когда можно замкнуть рубильник, т. е. когда напряжения между точками $a - a'$ и $b - b'$ (см. рис. 8.16) равны нулю, производится при помощи фазовых или фазоиндикаторных ламп.

Один из способов включения таких ламп показан на рис. 8.16. До включения рубильника они будут то гаснуть, то загораться. Промежутки времени между следующими одна за другой вспышками ламп будут тем больше, чем меньше отличается частота подключаемой машины от частоты сети.

Изобразим вектором \dot{U}_c напряжение сети и вектором \dot{U}_r напряжение подключаемого генератора (рис. 8.17).

В момент, когда лампы погаснут, оба вектора расположатся, как показано на рис. 8.17 (представленная диаграмма получается при обходе контура, состоящего из обмотки якоря первой машины, общих шин и обмотки якоря второй машины, $B_1A_1A_2B_2B_1$ (см. рис. 8.16)). Напряжение, приложенное в этот момент к лампам, равно нулю. Если бы частоты напряжений были одинаковы или (что одно и то же) были одинаковы угловые скорости вращения векторов, то лампы не горели бы: в любой момент времени напряжение сети уравновешивалось бы напряжением генератора. Но практически не удастся до включения рубильника установить на длительное время равенство частот напряжений. Поэтому векторы напряжений \dot{U}_c и \dot{U}_r будут перемещаться один относительно другого со скоростью $\omega_c - \omega_r$, и соответственно этой относительной скорости будет изменяться напряжение на лампах.

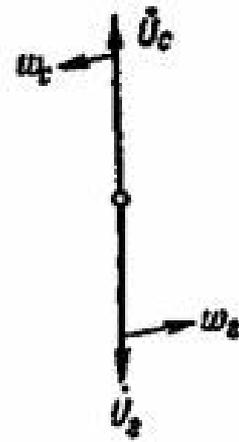


Рис. 8.17.
Векторы напряжений:
сети \dot{U}_c
и генератора \dot{U}_r

8.6. Внезапное короткое замыкание синхронной машины

В синхронной машине, так же как и в любой другой электрической машине, при переходе от одного установившегося режима работы к другому возникает ряд явлений, изучение которых имеет важное значение, так как на практике с ними часто приходится иметь дело. Эти явления переходного процесса возникают вследствие изменения энергии магнитных полей машины, а также вследствие изменения кинетической энергии ее вращающихся частей.

Изменение кинетической энергии вызывается нарушением равновесия вращающих моментов, действующих на ротор машины. Возникающие при этом переходные процессы (если машина работает параллельно с другими синхронными машинами) характеризуются колебаниями частоты вращения около синхронной.

Рассмотрим переходные процессы, обусловленные изменением энергии магнитных полей. Они возникают при любом нарушении режима работы синхронной машины и особенно резко проявляются при внезапном коротком замыкании обмотки статора. В этом случае в обмотках статора и ротора возникают очень большие токи, во много раз превышающие их номинальные значения. Такие токи опасны не только для самой машины, но и для аппаратуры и других элементов распределительных устройств электрических станций и подстанций, с которыми эта машина связана. В машине они создают значительные механические силы, особенно опасные для лобовых частей обмоток статора. Кроме того, создаются большие вращающие моменты, действующие на ротор и статор, которые также необходимо иметь в виду при конструировании машины.

Точное исследование процессов, возникающих в синхронной машине при ее внезапном коротком замыкании, осуществить весьма сложно. Поэтому приходится ограничиваться приближенным исследованием, основанным на ряде допущений.

Рассмотрим эти процессы только с физической стороны.

Рассмотрим сначала трехфазное короткое замыкание и примем, что частота вращения при этом остается неизменной. Будем считать, что активные сопротивления всех контуров машины равны нулю. Тогда согласно закону Ленца, который в этом случае называют «законом постоянства потокосцеплений», потокосцепления контуров должны остаться неизменными.

Пусть короткое замыкание произошло при холостом ходе машины, когда ось рассматриваемой фазы статора совпадала с осью полюсов и, следовательно, ее потокосцепление было наибольшим. При повороте ротора поток полюсов, сцепляющийся с этой фазой, будет уменьшаться и станет равным нулю, когда ротор повернется на 90 эл. град. В фазе возникнет ток, стремящийся поддержать прежнее значение потокосцепления. При дальнейшем повороте ротора на 90 эл. град ток в фазе статора еще больше увеличивается, так как он должен не только создать прежнее потокосцепление, но и противодействовать НС

обмотки возбуждения. Когда ротор снова повернется на 180 эл. град, т. е. займет исходное положение, ток фазы будет равен нулю.

Мы можем считать, что ток в фазе будет иметь две составляющие: периодическую и аperiodическую. Периодические токи фаз статора создадут вращающуюся НС, неподвижную относительно полюсов. Ее ось совпадает с осью полюсов, так как эти токи можно рассматривать как чисто реактивные. Аperiodические токи фаз статора создают поле, неподвижное относительно статора (неподвижное в пространстве).

Можно провести аналогию с трансформатором и принять при этом, что короткое замыкание обмотки статора аналогично включению короткозамкнутого трансформатора на синусоидальное напряжение (ЭДС обмотки статора соответствует напряжению, приложенному к трансформатору).

8.7. Качания синхронной машины

Как было установлено, при любом изменении нагрузки изменяется угол и между векторами напряжения \dot{U} и ЭДС \dot{E}_0 , так как каждой нагрузке соответствует свой угол θ . Если машины работают параллельно, то при переходе любой из машин от одной нагрузки к другой угол обычно устанавливается не сразу, а после нескольких колебаний около своего конечного значения.

Допустим, что генератор работает с сетью очень большой мощности и что момент, приложенный к его валу со стороны первичного двигателя, резко возрос от значения M_1 до значения M_2 и в дальнейшем остался неизменным. Угловая частота вращения ротора ω , а следовательно, и угол θ начнут при этом возрастать. При изменении ω и θ возникнут момент сил инерции и синхронизирующий момент, которые, как будет показано, действуют в противоположные стороны. Вследствие этого процесс изменения угла θ от установившегося значения θ_1 , соответствующего моменту M_1 , до установившегося значения θ_2 , соответствующего моменту M_2 , носит колебательный характер, причем обычно колебания быстро затухают (рис. 8.18).

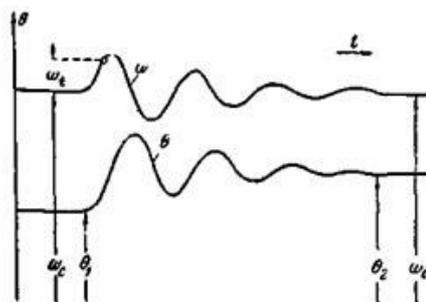


Рис. 8.18. Колебания угла θ и частоты ω при резком изменении нагрузки синхронной машины

Частоту вращения машины ω мы можем представить как сумму двух частот вращения – постоянной синхронной ω_c и переменной ω_f :
$$\omega = \omega_c + \omega_f.$$

Рассмотренные колебания называют *собственными* или *свободными*. Следовательно, синхронная машина вместе с другими машинами, работающими с ней параллельно, представляет собой систему, способную к собственным колебаниям, что является наряду с указанными ранее характерным свойством синхронной машины.

Помимо собственных колебаний синхронная машина может испытывать также *вынужденные колебания*, если внешний момент, приложенный к ее валу, периодически изменяется. Такие условия для синхронного генератора получаются, если первичным двигателем служит поршневая машина (паровая машина или двигатель внутреннего сгорания). Для синхронного двигателя те же условия возникают при нагрузке его, например, на поршневой насос или компрессор.

Периодически изменяющийся момент на валу синхронной машины нарушает нормальные условия ее работы, а в некоторых случаях может сделать эту работу невозможной.

В последующем мы будем рассматривать качания синхронной машины применительно к синхронному генератору, однако полученные при этом выводы могут быть отнесены в равной мере и к качаниям синхронного двигателя.

8.8. Потери и коэффициент полезного действия

Потери в синхронной машине состоят:

- 1) из электрических потерь в обмотке статора;
- 2) магнитных потерь в стали статора;
- 3) добавочных потерь в полюсных наконечниках или в поверхностном слое бочки ротора, вызванных пульсациями поля вследствие зубчатости внутренней поверхности статора и высшими гармоническими полями статора;
- 4) механических потерь на трение в подшипниках и вращающихся частях о воздух или другой газ, охлаждающий машину;
- 5) потерь на возбуждение, причем к последним относятся не только потери в обмотке возбуждения, но и потери в возбудителе, если он посажен на один вал с синхронной машиной, и в регулировочных реостатах;

б) добавочных потерь при нагрузке, вызванных полями рассеяния статора.

Перечисленные потери в сумме (ΣP) составляют небольшую долю от номинальной мощности машины. Эта доля уменьшается с ростом мощности.

Коэффициент полезного действия синхронной машины определяют:

для генератора по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{mUI \cos \varphi}{mUI \cos \varphi + \Sigma P} = 1 - \frac{\Sigma P}{mUI \cos \varphi + \Sigma P};$$

для двигателя по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{mUI \cos \varphi - \Sigma P}{mUI \cos \varphi} = 1 - \frac{\Sigma P}{mUI \cos \varphi}.$$

Значения КПД синхронных генераторов и двигателей отечественных заводов приведены на рис. 8.19.

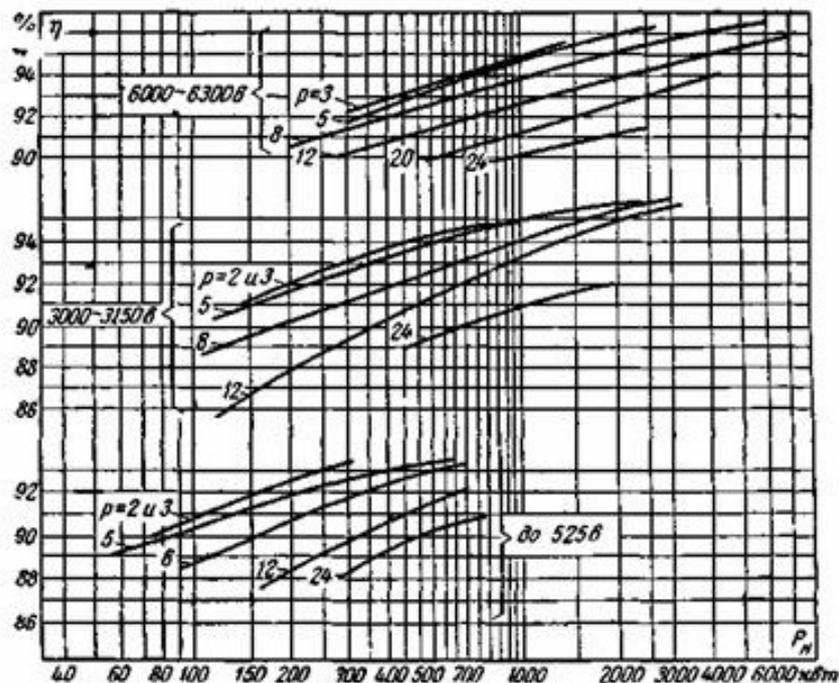


Рис. 8.19. Значения КПД (η) синхронных генераторов и двигателей при номинальном режиме их работы в зависимости от номинальной мощности P_n

Значения КПД крупных гидрогенераторов колеблются в пределах $96 \div 98 \%$, турбогенераторов $97,0 \div 98,8 \%$.

Контрольные вопросы

1. Каковы конструктивные различия между синхронными машинами: явнополусными и неявнополусными?
2. Какие конструктивные особенности синхронной машины улучшают синусоидальную форму электродвижущей силы генератора?
3. Какие существуют способы возбуждения синхронного генератора, в чем их преимущества и недостатки?
4. В чем состоит явление реакции якоря?
5. Как влияет реакция якоря на электродвижущую силу синхронного генератора при изменении характера нагрузки?
6. В чем заключается различие векторных диаграмм неявнополусного и явнополусного синхронных генераторов?
7. Каковы условия снятия характеристик холостого хода и короткого замыкания?
8. Каковы условия снятия внешней и регулировочной характеристик синхронного генератора?
9. Каковы условия и методы синхронизации синхронного генератора с сетью?
10. Чем объясняются малые значения тока якоря при снятии характеристики короткого замыкания?
11. Каково назначение U -образных характеристик синхронного генератора?
12. Каково различие между угловыми характеристиками явнополусного и неявнополусного генераторов?
13. Какие существуют способы регулирования электродвижущей силы и $\cos\varphi$ при работе синхронного генератора параллельно с сетью?
14. Определите мощность и электромагнитный момент явнополусного и неявнополусного генераторов.
15. Определите потери и КПД синхронного генератора.
16. Почему внешние и регулировочные характеристики синхронного генератора, снятые при различных характерах нагрузки, не совпадают?
17. Что обозначает угол θ ?
18. Какой синхронный генератор обладает большей устойчивостью?
19. Каково назначение короткого замыкания обмотки полюсных наконечников?
20. В чем различие магнитной цепи явнополусного и неявнополусного синхронных генераторов?
21. Как перевести синхронный генератор, работающий параллельно с сетью, в режим двигателя?

22. Объясните принцип действия саморегулирования синхронного генератора по его структурно-логической схеме.
23. Что такое конструктивные элементы синхронного генератора и каковы их функции?
24. Каковы конструктивные особенности синхронного двигателя?
25. Каков принцип действия синхронного двигателя?
26. Каковы особенности пуска и регулирования синхронного двигателя?
27. Как влияет ток возбуждения синхронного двигателя на $\cos\varphi$?
28. Как зависит электромагнитный момент синхронного двигателя от угла θ ?
29. Какие существуют схемы возбуждения синхронного двигателя?
30. В чем отличие синхронного двигателя от синхронного компенсатора?
31. Каковы потери энергии в синхронном двигателе?
32. Какие существуют способы повышения $\cos\varphi$ в электрических сетях?
33. Каковы конструктивные отличия синхронного двигателя с неявнополюсным индуктором от асинхронного двигателя с фазным ротором?
34. Начертите векторные диаграммы синхронного двигателя.
35. Каков физический смысл коэффициента мощности и каковы способы его повышения?
36. Почему синхронный двигатель нуждается в специальных способах пуска?
37. Каковы преимущества и недостатки синхронного двигателя по сравнению с асинхронным двигателем?
38. Какие существуют способы регулирования синхронного двигателя?
39. В чем отличие угловых характеристик явно- и неявнополюсных синхронных двигателей?
40. Поясните процесс нагрузки и саморегулирования синхронного двигателя с помощью его структурно-логической схемы.
41. Чем определяется мощность синхронного двигателя?
42. Чем определяется угол $\theta_{кр}$? Каков его физический смысл?
43. Каков принцип действия реактивного двигателя?
44. Каков принцип действия гистерезисного двигателя?
45. Объясните устройство индукторной синхронной машины.
46. Что представляет собой шаговый двигатель?

Глава 9. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

9.1. Устройство и основные элементы конструкции

Машины постоянного тока – генераторы и двигатели – находят широкое применение в современных электроустановках. Их выполняют с неподвижными полюсами и вращающимся якорем. На рис. 9.1 схематически представлен разрез четырехполюсной машины. Здесь же приведены названия ее основных частей.

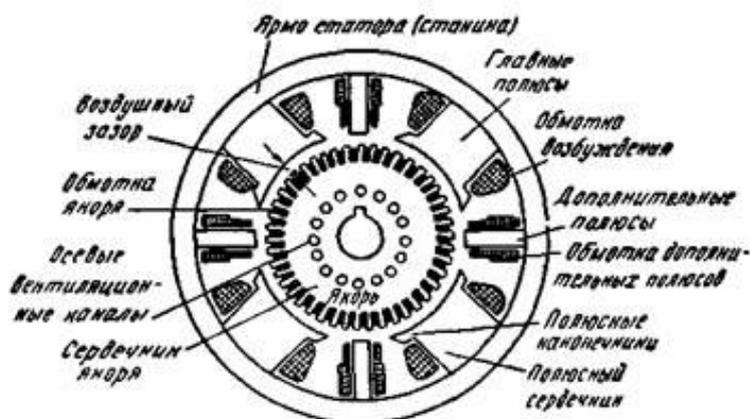


Рис. 9.1. Основные части машины постоянного тока

Характерная часть машин постоянного тока – коллектор. Он состоит из медных пластин, разделенных изоляционными прослойками и собранных в виде цилиндра (рис. 9.2, а).

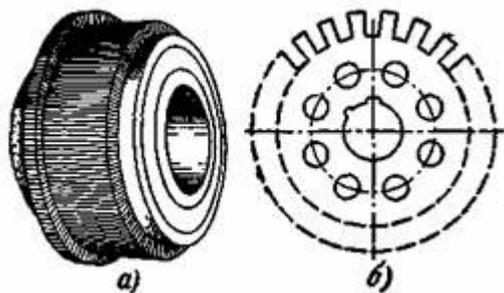


Рис. 9.2. Изображение:
а – коллектора; б – листа якоря

Якорь машины постоянного тока при его вращении перемагничивается, поэтому его собирают из листов электротехнической стали обычно толщиной 0,5 мм (рис. 9.2, б). Листы перед сборкой покрывают с обеих сторон лаком; таким образом предотвращают образование в стали якоря больших вихревых токов. На внешней поверхности якоря после сборки листов получают пазы и зубцы.

В пазы закладывают проводники обмотки якоря, которые по особым правилам соединяют между собой и с коллекторными пластинами.

На рис. 9.3 показаны пазы якоря. Их обычно делают открытыми, что в большой степени облегчает укладку обмотки и позволяет хорошо ее изолировать. Для небольших машин делают полузакрытые пазы, так же как для статоров асинхронных машин. У машин небольшой и средней мощности якорь помещают непосредственно на валу, у машин большей мощности – на втулке, выполняемой в виде крестовины. Главные полюсы служат для создания основного поля в машине. Они имеют сердечники, на которых помещается обмотка возбуждения, и полюсные наконечники. Последние удерживают катушки возбуждения и способствуют наиболее благоприятному распределению индукции в воздушном зазоре машины вдоль окружности якоря. Полюсы в современных машинах собирают из стальных листов толщиной $0,5 \div 1,0$ мм для уменьшения потерь от вихревых токов в поверхностном слое полюсных наконечников, обращенном к якорю. Вихревые токи возникают вследствие пульсации индукции, вызванной зубчатостью якоря: под отдельными частями полюсного наконечника проходит то зубец, то паз якоря, что вызывает в этих частях то сгущение, то разрежение магнитных линий. Пульсации индукции проникают в сравнительно неглубокий слой, поэтому можно было бы делать слоистыми только полюсные наконечники. Однако технологически обычно выгоднее весь полюс собирать из листов.



Рис. 9.3. Пазы якоря

9.2. Получение постоянного тока при помощи коллектора

Обратимся к кольцевому якорю. Он представляет собой полый цилиндр, собранный из листов электротехнической стали; этот цилиндр укреплен на валу машины, например при помощи крестовины, имеющей спицы из немагнитного материала. Обмотка якоря обвивает полый цилиндр в виде спирали, поэтому ее называют *спиральной* или *кольцевой обмоткой*. Она образует замкнутый контур. Можно считать, что магнитный поток, создаваемый электромагнитами машины, будет проходить только по якорю (рис. 9.4). Если принять, что ЭДС в проводниках наводятся в результате пересечения проводниками индукционных линий потока в воздушном зазоре, то при вращении якоря ЭДС возникнут только в проводниках, лежащих на наружной поверхности якоря.

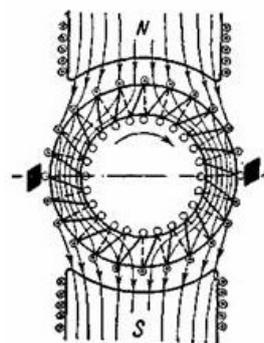


Рис. 9.4. Направление ЭДС, наведенных в обмотке кольцевого якоря

Направления ЭДС найдем, пользуясь правилом правой руки. В контуре обмотки вследствие симметрии обеих половин машины уравнивающий ток возникать не будет, так как в любой момент времени ЭДС в проводниках, лежащих под разноименными полюсами, противоположны по направлению и их сумма равна нулю.

Чтобы использовать ЭДС обмотки, соединим ее с внешней цепью посредством неподвижных щеток. Последние могут скользить непосредственно по освобожденной от изоляции части проводников якоря. Для того чтобы полностью использовать ЭДС обмотки, щетки нужно поставить на геометрической нейтральной линии, т. е. на линии, перпендикулярной оси полюсов. Щетки делят обмотку на две параллельные ветви, причем при указанном на рис. 9.4 положении щеток ЭДС параллельной ветви будет наибольшей. Если щетки сместить, то ЭДС в параллельной ветви будет уменьшаться; и в предельном случае, когда щетки будут совпадать с осью полюсов, ЭДС будет равна нулю, так как в этом случае в каждую параллельную ветвь будут входить проводники с ЭДС, сумма которых равна нулю.

Напряжение на щетках, равное ЭДС параллельной ветви обмотки, будет при большом числе витков обмотки практически постоянным по величине. Рассматривая вращающийся якорь (см. рис. 9.4),

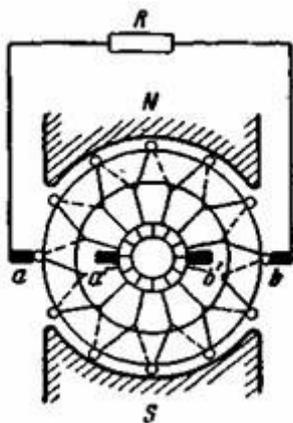


Рис. 9.5. Коллекторные пластины как замена непосредственного контакта щеток с проводниками якоря

мы видим, что витки параллельной ветви, ЭДС которых определяют напряжение на щетках, все время находятся в поле одной и той же полярности и, следовательно, в сумме дадут ЭДС одного направления, несмотря на то что ЭДС каждого витка при его вращении будет переменной.

Приспосабливать обмотку якоря для непосредственного контакта со щетками нецелесообразно; гораздо лучше и надежнее этот контакт обмотки со щетками осуществить при помощи пластин коллектора; последние при этом соединяются проводниками с отдельными витками замкнутой обмотки якоря (рис. 9.5), и, таким образом, щетки посредством коллектора так же делят обмотку якоря

на параллельные ветви, как это было при их непосредственном контакте с проводниками якоря.

Идея применения коллектора в машинах постоянного тока впервые была осуществлена русским академиком Б. С. Якоби в изобретенном им двигателе постоянного тока (1834 г.).

Чем больше коллекторных пластин приходится на один полюс, тем меньше будут так называемые коллекторные пульсации напряжения на щетках, которые определяются как отношение разности максимального и среднего напряжений к среднему напряжению.

9.3. Якорные обмотки машин постоянного тока

Кольцевой якорь со спиральной обмоткой в настоящее время не применяют, так как более выгодно и надежно использовать барабанный якорь с обмоткой, все проводники которой укладываются на его внешней поверхности.

При барабанном якоре обмотка состоит из витков, имеющих ширину, равную (или почти равную) полюсному делению. Здесь виток охватывает весь поток Φ , вступающий в якорь, и ЭДС в нем получается в два раза больше, чем в витке спиральной обмотки, где максимальный поток, охватываемый витком, равен половине потока, вступающего в якорь. Поэтому для получения одной и той же ЭДС при барабанной обмотке требуется в два раза меньше витков, чем при кольцевой обмотке. К тому же изготовление кольцевой обмотки гораздо сложнее и условия ее охлаждения хуже, чем барабанной обмотки.

Проводники барабанной обмотки, которые называют *активными проводниками*, укладывают в пазы. Два активных проводника, соединенных друг с другом, образуют *виток*. Витки, соединенные друг с другом и с коллекторными пластинами, образуют замкнутый контур.

Часть обмотки, находящаяся при ее обходе между следующими друг за другом коллекторными пластинами, называют *секцией*. Секция может состоять из одного или нескольких витков (рис. 9.6). Ширину секции следует выбирать или равной полюсному делению (расстояние по окружности якоря между осями соседних полюсов), или близкой к нему. Секционные стороны в пазах

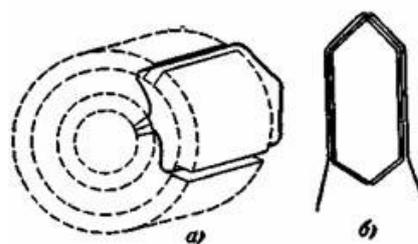


Рис. 9.6. Изображение:
а – одновитковой секции,
заложенной в пазы;
б – трехвитковой секции

обычно размещают в два слоя. На рис. 9.7 показаны пазы якоря с размещенными в них секционными сторонами. Здесь прямоугольниками изображены секционные стороны, которые могут состоять из одного или нескольких активных проводников.

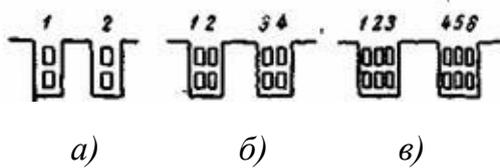


Рис. 9.7. Пазы якоря

Для того чтобы правильно соединить секции обмотки между собой и с коллекторными пластинами, нужно найти шаги обмотки. Их целесообразно измерять числом элементарных пазов, причем под последними понимают условные пазы с двумя секционными сторонами, расположенными одна над другой. На рис. 9.7, а показаны реальные пазы, которые в то же время являются и элементарными. На рис. 9.7, б и в показаны пазы, каждый из которых состоит соответственно из двух и трех элементарных пазов. Нумерация элементарных пазов производится так, как показано на рис. 9.7.

Секцию обмотки укладывают в пазы таким образом, чтобы одна ее сторона находилась в верхнем слое паза, а другая сторона – в нижнем слое. На рис. 9.8 изображены секции обмоток. Здесь часть секции, находящаяся в верхнем слое, изображена сплошной линией, а часть секции, находящаяся в нижнем слое, – пунктирной линией.

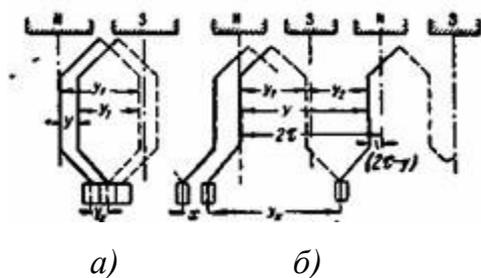


Рис. 9.8. Секции якорных обмоток

Барабанные обмотки делят на *петлевые* и *волновые*. Секции петлевой обмотки показаны на рис. 9.8, а и волновой обмотки – на рис. 9.8, б.

Различают следующие шаги обмоток (см. рис. 9.8): y_1 – первый шаг, равный ширине секции, или расстоянию между начальной и конечной сторонами секции; y_2 – второй шаг, равный расстоянию между конечной стороной одной секции и начальной стороной следующей секции; y – результирующий шаг, равный расстоянию между начальными сторонами следующих друг за другом секций; y_k – шаг по коллектору, равный расстоянию между началом и концом секции по окружности коллектора (измеряется числом коллекторных делений, т. е. расстоянием между серединами соседних коллекторных пластин).

Если y измеряется числом делений элементарных пазов, то y и y_k выражаются одним и тем же числом, т. е. $y = y_k$. Если обозначить S – число секций, K – число коллекторных пластин, Z_3 – число элементарных пазов, то

$$S = K = Z_3.$$

Минимальное число параллельных ветвей $2a$ замкнутой обмотки равно двум, т. е.

$$2a \geq 2.$$

Для обеспечения симметрии обмотки общее число секций выбирают таким образом, чтобы на каждую пару параллельных ветвей приходилось целое число секций. В этом случае имеем

$$\frac{S}{a} = \frac{K}{a} = \text{целому числу.}$$

9.4. Магнитная цепь и ее расчет

На рис. 9.9 изображена магнитная цепь машины постоянного тока. Ее расчет заключается в определении НС, необходимой для создания в воздушном зазоре машины магнитного потока, способного навести в обмотке якоря заданную ЭДС.

Картина распределения магнитного поля в машине в пределах ее сектора AOB (см. рис. 9.9) для всех подобных секторов одинакова. Поэтому для определения НС, создающей магнитный поток, достаточно ограничиться

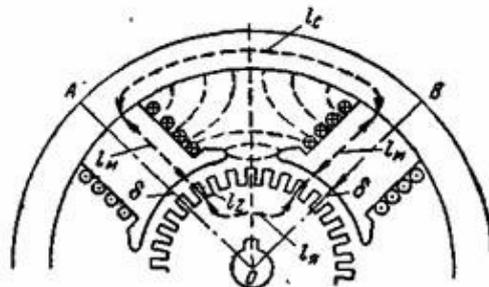


Рис. 9.9. Магнитная цепь машины постоянного тока

расчетом магнитного поля в пределах одного сектора, т. е. в пределах одной пары полюсов. Обозначим искомую НС через $F_{\text{цепи}}$. Для замкнутого контура магнитной линии (показана жирным пунктиром на рис. 9.9) $F_{\text{цепи}}$ определяется равенством

$$\oint H dl = F_{\text{цепи}},$$

где H – напряженность поля в направлении dl ; $F_{\text{цепи}}$ – полный ток внутри рассматриваемого контура, равный НС.

Интеграл $\oint H dl$ заменяют суммой $\sum H_x l_x$ и выбирают отдельные участки магнитной цепи таким образом, чтобы H_1 , H_2 и так далее вдоль

этих участков можно было считать приблизительно постоянными. При этом

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n = F_{\text{цепи}}.$$

Левая часть этого равенства представляет собой сумму магнитных напряжений. Перепишем ее в следующем виде:

$$F_1 + F_2 + \dots + F_n = F_{\text{цепи}},$$

где $F_x = H_x l_x$, т. е. F_x равно магнитному напряжению какого-либо участка магнитной цепи ($x = 1, 2 \dots n$).

Магнитную цепь машины разобьем на следующие участки:

- 1) 2δ – воздушные зазоры;
- 2) $2l_z$ – зубцы якоря;
- 3) l_a – сердечник якоря;
- 4) $2l_m$ – полюсы;
- 5) l_c – ярмо статора.

Расчет НС $F_{\text{цепи}}$ произведем в следующем порядке: по ЭДС E_a , которая должна наводиться в обмотке якоря, найдем магнитный поток Φ ; по размерам машины найдем сечение S_x для каждого участка магнитной цепи; затем определим индукцию

$$B_x = \frac{\Phi}{S_x};$$

по значению B_x , пользуясь кривыми намагничивания для соответствующего материала, найдем H_x и $H_x l_x$; наконец, просуммировав магнитные напряжения всех участков, определим НС цепи $F_{\text{цепи}}$.

Магнитные напряжения для полюсов (и ярма статора) находят по потоку Φ_m (и $\Phi_m / 2$), который больше потока Φ в воздушном зазоре из-за наличия поля рассеяния. Магнитные линии этого поля в промежутке между полюсами показаны на рис. 9.9 тонким пунктиром.

Отношение $\Phi_m / \Phi = \sigma$ называют *коэффициентом рассеяния полюсов*.

Таким образом, имеем

$$\Phi_m = \sigma \Phi;$$

для нормальных машин постоянного тока

$$\sigma = 1,12 \div 1,17.$$

Если задать различные значения ЭДС в пределах $E_a = (0,50 \div \div 1,25) U_n$, определить соответствующие значения потока Φ и затем, как указано, $F_{\text{цепи}}$, то мы можем построить кривую $E_a = f(F_{\text{цепи}})$.

На рис. 9.10 представлена кривая $E_0 = f(F_{\text{цепи}})$, здесь ЭДС E_a обозначена через E_0 , чтобы показать, что мы имеем ЭДС при холостом ходе машины. Приведенную кривую называют *характеристикой холостого хода*. Она имеет важное значение при исследовании электрической машины.

На оси абсцисс можно было бы вместо $F_{\text{цепи}}$ взять ток в обмотке возбуждения I_B , называемый *током возбуждения*. Он равен $I_B = F_{\text{цепи}} / 2w_B$, где w_B – число витков обмотки возбуждения на одном полюсе.

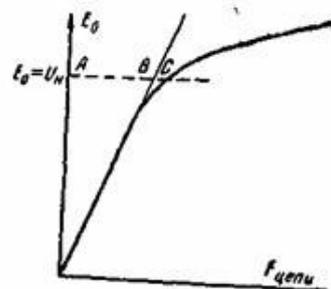


Рис. 9.10. Характеристика холостого хода

Начальная часть характеристики изображена в виде прямой линии, так как она соответствует ненасыщенному состоянию стальных участков магнитной цепи. Здесь можно считать НС $F_{\text{цепи}}$ равной магнитному напряжению воздушных зазоров F_δ , (F_δ пропорциональна Φ или E_0). При увеличении ЭДС E_0 , а следовательно, и потока Φ начинает происходить насыщение стальных участков магнитной цепи; характеристика холостого хода при этом искривляется.

При $E_0 = U_n$ и номинальной скорости вращения n_n большая часть $F_{\text{цепи}}$ приходится на воздушные зазоры 2δ . Для нормальных машин постоянного тока имеем приблизительно следующее соотношение:

$$F_\delta / F_{\text{цепи}} = 0,80 \div 0,90.$$

На рис. 9.10 это соотношение

$$\frac{F_\delta}{F_{\text{цепи}}} = \frac{AB}{AC}.$$

9.5. Реакция якоря

При холостом ходе машины магнитное поле в ней создается только обмоткой возбуждения, так как только по этой обмотке будет проходить ток. При нагрузке ток проходит и по обмотке якоря, НС которой изменяет поле машины, что впервые было отмечено Э. Х. Ленцем.

Воздействие НС якоря на поле машины называют **реакцией якоря**. При помощи рис. 9.11 мы можем выяснить, как изменяется поле машины в результате этого воздействия. На рис. 9.11, а изображено поле машины при ее холостом ходе, когда это поле создается только НС обмотки возбуждения. На рис. 9.11, б показано поле якоря. Такое поле

получается в машине при наличии тока только в обмотке якоря. При этом сам якорь превращается в электромагнит. Его НС имеет ось, всегда совпадающую с линией щеток.

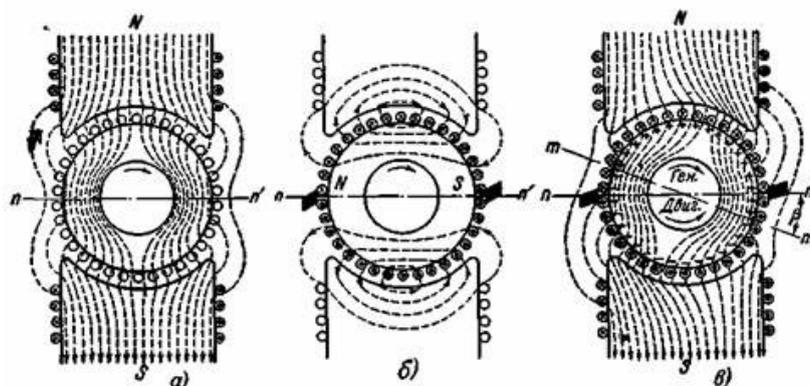


Рис. 9.11. Реакция якоря при положении щеток на геометрической нейтрали:
 а – поле при холостом ходе; б – поле якоря; в – поле при нагрузке (nn' – геометрическая нейтраль, mm' – физическая нейтраль)

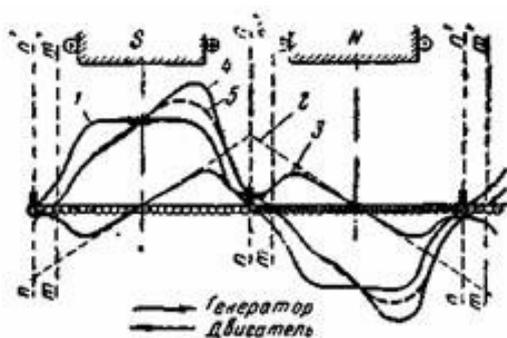


Рис. 9.12. Реакция якоря при положении щеток на геометрической нейтрали:
 1 – кривая поля при холостом ходе; 2 – кривая НС якоря;
 3 – кривая поля якоря; 4 – кривая результирующего поля без учета изменения насыщения; 5 – кривая действительного поля машины при нагрузке (nn' – геометрическая нейтраль, mm' – физическая нейтраль)

Мы расположили щетки на геометрической нейтрали, т. е. на линии, перпендикулярной оси полюсов. В этом случае токи в проводниках якоря верхней и нижней его частей имеют противоположные направления. Намагничивающая сила якоря, действующая по линии щеток, будет наибольшей, так как соответствующая магнитная линия охватывает наибольший полный ток. Далее НС убывает и под серединой полюса становится равной нулю. Можно считать, что она убывает по закону прямой линии, как это показано на рис. 9.12, где кривая 2 представляет собой кривую НС якоря, ординаты которой равны соответствующей НС якоря на половину обхода (на один полюс).

На рис. 9.11, в показано поле машины при ее нагрузке. Мы видим, что в результате реакции якоря поле машины, работающей генератором, изменилось: произошло усиление поля под сбегающей половиной полюса и ослабление его под набегающей половиной полюса. Другое следствие реакции якоря – смещение физической нейтрали, т. е. линии, проходящей через точки окружности якоря, где индукция равна нулю.

При холостом ходе физическая нейтраль совпадает с геометрической. При нагрузке она смещается относительно геометрической нейтрали: при работе генератором – в сторону вращения, при работе двигателем – против вращения (при принятых на рис. 9.11, в направлениях поля и токов в обмотке якоря машина при работе двигателем будет вращаться в обратную сторону).

На рис. 9.12 показаны кривые поля машины при холостом ходе и при нагрузке: здесь также приведена кривая поля якоря. Если кривую поля машины при ее нагрузке будем определять исходя из принципа наложения, т. е. складывая ординаты кривой поля при холостом ходе 1 и кривой поля якоря 3, то получим кривую результирующего поля 4. Однако принцип наложения здесь не может дать точных результатов, так как поле в ферромагнитных телах не является линейной функцией тока. Кривая действительного поля машины при нагрузке 5 отличается от кривой результирующего поля 4. Кривая 5 показывает, что ослабление поля под набегающей половиной полюса будет больше, чем усиление поля под сбегающей половиной полюса (вследствие насыщения главным образом зубцов якоря). В результате получается ослабление общего поля и, следовательно, уменьшение полезного потока Φ , определяющего значение ЭДС якоря.

Уменьшение ЭДС якоря при положении щеток на геометрической нейтрали также вызвано смещением физической нейтрали, так как при этом в параллельные ветви будут входить проводники с обратными ЭДС (см. рис. 9.11, в, где крестами и черточками внутри якоря показаны направления ЭДС, наведенных в проводниках).

9.6. Электромагнитный вращающий момент

Электромагнитный вращающий момент может быть найден исходя из закона электромагнитных сил.

Согласно этому закону сила, действующая на проводник (рис. 9.13),

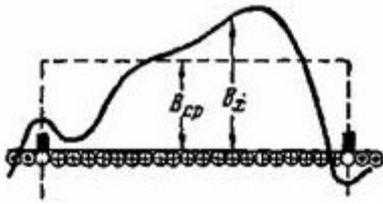


Рис. 9.13. К определению электромагнитного вращающего момента

$$F_x = B_x i l.$$

Общая сила, действующая на якорь при числе проводников обмотки якоря n и токе в проводнике $I_a / 2a$,

$$F = B_{\Phi} \frac{I_a}{2a} n N.$$

Искомый вращающий момент

$$M = F \frac{D}{2} = B_{\Phi} \frac{I_a}{2a} n N \frac{D}{2}.$$

Подставив вместо диаметра якоря $D = \frac{2p\tau}{\pi}$ и учитывая, что $B_{cp}\tau l = \Phi$, получим

$$M = \frac{pN}{2a\pi} I_a \Phi \text{ (Дж)} = 0,102 \frac{pN}{2a\pi} I_a \Phi \text{ (кг} \cdot \text{м)}$$

или

$$M = c_M I_a \Phi,$$

где $c_M = 0,102 \frac{pN}{2a\pi}$ – постоянная для данной машины величина.

Поток Φ в предыдущих равенствах представляет собой поток, определяемый действительной кривой поля машины при нагрузке и положением щеток (см. рис. 9.13).

То же самое выражение для вращающего момента можно получить исходя из электромагнитной мощности машины $P_{эм} = E_a I_a$

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega} = \frac{E_a I_a}{\omega} = \frac{P}{a} \cdot \frac{n}{60} \frac{N\Phi I_a}{2\pi n} = \frac{pN}{2a\pi} I_a \Phi \text{ (Дж)}.$$

В генераторе электромагнитный момент действует против вращения и является, следовательно, тормозящим по отношению к первичному двигателю. Момент, создаваемый первичным двигателем, уравновешивает электромагнитный момент генератора и момент, соответствующий механическим и магнитным потерям в генераторе.

В двигателе электромагнитный момент действует по вращению и уравновешивает тормозящий момент нагрузки на валу и момент, соответствующий механическим и магнитным потерям в двигателе.

9.7. Двигатели

9.7.1. Общие вопросы

Для того чтобы двигатель вращался с постоянной скоростью, развиваемый им момент M должен равняться тормозящему моменту нагрузки $M_{ст}$

$$M_c = M_{ст}.$$

Если это равенство нарушается, то скорость вращения двигателя уменьшается или увеличивается до тех пор, пока момент двигателя снова не будет уравновешен моментом нагрузки.

Устойчивая работа двигателя постоянного тока, так же как и асинхронного двигателя, может быть только при выполнении условия

$$\frac{dM_{ст}}{dn} > \frac{dM}{dn}.$$

Это условие выполняется при кривых изменения моментов M и $M_{ст}$, показанных на рис. 9.14, а, и не выполняется при кривых, показанных на рис. 9.14, б. Действительно, в случае кривых рис. 9.14, а при возмущении режима работы, вызвавшем увеличение скорости вращения (положительное приращение Δn), после прекращения возмущения двигатель вернется в исходную точку, так как тормозящий момент $M_{ст}$ больше момента двигателя M ($\Delta M_{ст} > \Delta M$); при отрицательном приращении Δn момент двигателя M больше тормозящего момента $M_{ст}$ ($\Delta M > \Delta M_{ст}$), следовательно, двигатель после прекращения возмущения также вернется в исходную точку. Обратные соотношения получаются в случае кривых моментов рис. 9.14, б; при таких кривых двигатель не может работать устойчиво.

Обычно для устойчивой работы двигателя необходимо, чтобы при увеличении его скорости вращения развиваемый им вращающий момент уменьшался.

Для изменения направления вращения (для реверсирования) двигателя нужно изменить или направление магнитного потока, или направление тока в обмотке якоря; одновременное же изменение направлений потока и тока якоря не приведет к изменению направления вращения, в чем мы можем убедиться, используя правило левой руки.

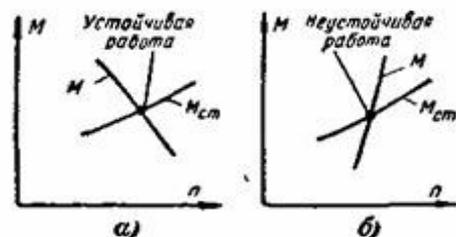


Рис. 9.14. Кривые вращающих моментов: M – двигателя; $M_{ст}$ – нагрузочного

При пуске двигателей в ход, т. е. при их включении в сеть, необходимо последовательно с обмоткой якоря соединить добавочное сопротивление, которое называют *пусковым реостатом*.

Если бы в цепи якоря не было пускового реостата, то при пуске в первый момент мы получили бы ток в якоре (здесь мы пренебрегаем влиянием индуктивности цепи якоря, которая несколько уменьшает пусковой ток в начальный период)

$$I_a = \frac{U}{\Sigma r},$$

где Σr – сумма всех сопротивлений внутренней цепи якоря (включая и сопротивление переходных контактов щеток).

Поскольку сопротивление Σr мало, то ток в якоре получился бы во много раз больше номинального.

Для примера возьмем нормальный двигатель мощностью 10 кВт при напряжении $U_n = 110$ В, номинальном токе $I_n = 108$ А и сопротивлении $\Sigma r = 0,08$ Ом. Начальный пусковой ток этого двигателя, если бы мы его включили в сеть без пускового реостата, был бы равен

$$I_a = \frac{U_n}{\Sigma r} = \frac{110}{0,08} = 1375 \text{ А},$$

т. е. превосходил бы почти в 13 раз номинальный ток.

От такого тока могли бы пострадать обмотка якоря и прежде всего коллектор и щетки. Поэтому необходимо последовательно с якорем включать добавочное сопротивление r_d , чтобы пусковой ток, равный теперь

$$I_a = \frac{U_n}{\Sigma r + r_d},$$

не превышал допустимого тока для двигателя. Поскольку время пуска сравнительно невелико, то пусковой ток берут несколько больше номинального, доводя его для небольших двигателей до двукратного значения номинального тока.

При пуске двигатель развивает начальный пусковой момент. Двигатель начинает вращаться; в его обмотке якоря начинает наводиться ЭДС E_a . Применяв правило левой руки, найдем направление вращения двигателя; применив при этом правило правой руки, найдем, что наведенная в якоре ЭДС направлена против тока и, следовательно, против приложенного к двигателю напряжения. Поэтому ее называют противо-ЭДС или обратной ЭДС. Ее роль при работе машины двигателем была впервые выяснена в работах Э. Х. Ленца и Б. С. Якоби.

При вращении двигателя ток в якоре определяется равенством

$$I_a = \frac{U - E_a}{\Sigma r + r_{\pi}}.$$

По мере нарастания скорости вращения и пропорциональной ей обратной ЭДС E_a добавочное сопротивление нужно уменьшать, т. е. выводить пусковой реостат. Делать это нужно постепенно, чтобы успевали расти скорость вращения и обратная ЭДС.

Ток в якоре при нормальной работе двигателя, когда выведен весь реостат,

$$I_a = \frac{U - E_a}{\Sigma r}.$$

Согласно вышеизложенному можем написать уравнение напряжений двигателя

$$U = E_a + I_a \Sigma r.$$

Найдем скорость вращения двигателя

$$E_a = c_3 n \Phi.$$

Отсюда, учитывая $U = E_a + I_a \Sigma r$, получим

$$n = c_{\pi} \frac{E_a}{\Phi} = c_{\pi} \frac{U - I_a \Sigma r}{\Phi},$$

где $c_{\pi} = \frac{1}{c_3} = \frac{1}{\frac{p}{a} \cdot \frac{1}{60} N}$ – постоянная величина.

Из полученного следует, что скорость вращения прямо пропорциональна ЭДС якоря E_a и обратно пропорциональна магнитному потоку Φ .

В зависимости от способа возбуждения различают двигатели с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.

9.7.2. Двигатель с параллельным возбуждением

Схема двигателя с параллельным возбуждением представлена на рис. 9.15. Пусковой реостат здесь имеет три зажима. Один из них (ручку реостата) присоединяют к сети; другой (конец пускового сопротивления) – к якору; третий (полоску, по которой скользит ручка реостата) – к обмотке возбуждения (непосредственно к обмотке либо через регулировочный реостат R_p).

Пусковой реостат имеет холостой контакт, не соединенный с пусковым сопротивлением, выполняемый иногда из какого-нибудь изоляционного материала.

Первый контакт пускового реостата соединяют с полоской, к которой присоединена обмотка возбуждения (см. рис. 9.15). Это делают для того, чтобы цепь возбуждения при остановке двигателя, когда ручку реостата ставят на холостой контакт, была замкнута. Ручка реостата при этом будет замкнута на обмотку якоря, пусковое сопротивление и регулировочный реостат, если последний имеется.

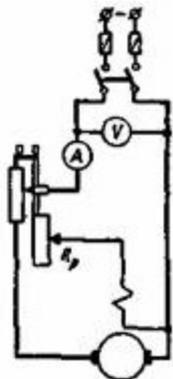


Рис. 9.15.
Двигатель
с параллельным
возбуждением

Энергия магнитного поля, запасенная в магнитной системе машины, будет постепенно переходить в электрическую энергию; уменьшение магнитного потока, сцепляющегося с обмоткой возбуждения, вызовет в ней сравнительно небольшую ЭДС. Резкий же разрыв цепи возбуждения при наличии в ней тока приведет к быстрому изменению потока и, следовательно, появлению большой ЭДС в обмотке возбуждения, опасной для ее изоляции.

Выключать рубильник следует после того, как ручка реостата поставлена на холостой контакт. Отключая двигатель указанным способом, мы предохраняем контакты рубильника от подгорания, а сеть – от резкого изменения нагрузки; кроме того, при следующем включении двигателя в сеть мы обеспечиваем его пуск при включенном пусковом реостате.

Магнитный поток Φ двигателя с параллельным возбуждением при $I_B = \text{const}$ изменяется из-за реакции якоря незначительно. Поэтому с большим приближением можно считать, что его вращающий момент пропорционален току якоря

$$M \equiv I_a.$$

Зависимость $n = f(I)$ при $I_B = \text{const}$ и $U = \text{const}$ называют *скоростной характеристикой* (рис. 9.16). Ток $I = I_a + I_B$ мало отличается от тока I_a , так как I_B составляет небольшую долю от I_n .

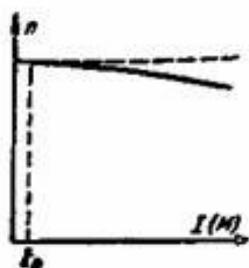


Рис. 9.16.
Скоростная $n = f(I)$
или механиче-
ская $n = f(M)$
характеристика
двигателя
с параллельным
возбуждением

Зависимость $n = f(M)$ при $I_B = \text{const}$ и $U = \text{const}$ называют *механической характеристикой* (см. рис. 9.16). Она отличается от скоростной практически только масштабом по оси абсцисс. Сплошная кривая на рис. 9.16 представляет собой обычную характеристику. Она показывает, что скорость вращения с увеличением нагрузки на валу падает.

Из формулы $n = c_{\text{п}} \frac{E_a}{\Phi} = c_{\text{п}} \frac{U - I_a \Sigma r}{\Phi}$ для скорости n , видно, что при увеличении тока уменьшается числитель $U - I_a \Sigma r$, при этом будет также уменьшаться знаменатель, Φ вследствие реакции якоря. Обычно числитель уменьшается больше, чем знаменатель, поэтому скорость вращения при увеличении I (или M) будет падать. Если же в двигателе создается сильная реакция якоря, что приводит к большому уменьшению потока Φ , то скорость вращения с увеличением нагрузки будет не падать, а возрастать, например, согласно пунктирной кривой на рис. 9.16. Двигатель с такой характеристикой для работы в обычных условиях практики непригоден, так как он будет работать неустойчиво.

Показанный на рис. 9.16 ток I_0 есть ток двигателя при холостом ходе (при отсутствии нагрузки на валу).

Двигатели с параллельным возбуждением лучшие из регулируемых электродвигателей. Они позволяют плавно и экономично регулировать скорость вращения.

На рис. 9.17 приведены рабочие характеристики двигателя с параллельным возбуждением: $M, n, I, \eta = f(P_2)$ при $U = \text{const}$ и $I_{\text{в}} = \text{const}$ (η – КПД, P_2 – мощность на валу).

Формула $n = c_{\text{п}} \frac{E_a}{\Phi} = c_{\text{п}} \frac{U - I_a \Sigma r}{\Phi}$ показывает, что для изменения n достаточно изменять поток Φ . Изменение потока достигается путем изменения тока возбуждения при помощи регулировочного реостата R_p (см. рис. 9.15). Поскольку ток возбуждения составляет небольшую долю номинального тока якоря, то при указанном способе регулирования скорости вращения потери в регулировочном реостате незначительны.

При увеличении тока возбуждения скорость вращения падает, при уменьшении тока возбуждения она возрастает.

При уменьшении $I_{\text{в}}$ поток становится меньше. Поскольку при этом скорость вращения в первый промежуток времени остается почти постоянной вследствие инерции вращающихся частей, то уменьшается ЭДС E_a . Уменьшение E_a приводит согласно $I_a = \frac{U - E_a}{\Sigma r}$ к увеличению тока якоря I_a , причем даже небольшое уменьшение E_a дает относительно большое увеличение тока I_a , так как значения U и E_a мало отличаются друг от друга.

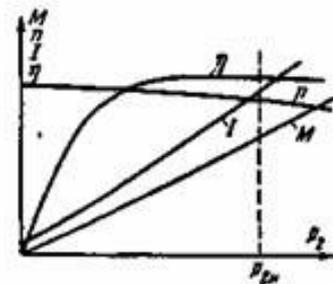


Рис. 9.17. Рабочие характеристики двигателя с параллельным возбуждением

9.7.3. Двигатель с последовательным возбуждением

Схема двигателя с последовательным возбуждением приведена на рис. 9.18. Здесь ток возбуждения равен току якоря. Вследствие этого

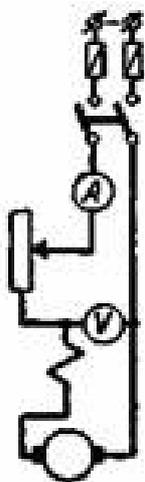


Рис. 9.18.
Двигатель
с последова-
тельным
возбуждением

при малых насыщениях, когда можно считать $\Phi \equiv I_a$, вращающий момент двигателя пропорционален квадрату тока. При больших значениях тока, когда стальные участки магнитной цепи насыщаются, момент двигателя почти пропорционален току.

С увеличением нагрузки при увеличении тока возрастает магнитный поток, что приводит согласно $n = c_{\text{п}} \frac{E_a}{\Phi} = c_{\text{п}} \frac{U - I_a \Sigma r}{\Phi}$ к снижению скорости вращения. При холостом ходе и малых нагрузках на валу ток двигателя имеет небольшое значение. Магнитный поток также будет иметь небольшое значение. Следовательно, скорость вращения при этом согласно $n = c_{\text{п}} \frac{E_a}{\Phi} = c_{\text{п}} \frac{U - I_a \Sigma r}{\Phi}$ сильно возрастает. Она будет превышать допустимое значение в отношении

механической прочности вращающихся частей машины. Поэтому нельзя допускать работу двигателя с последовательным возбуждением при холостом ходе и при малых нагрузках. Обычно для нормальных двигателей нагрузка не должна быть меньше 25 – 30 % номинальной. Лишь малые двигатели (мощностью на десятки ватт) допускают работу при холостом ходе, так как их собственные потери достаточно велики.

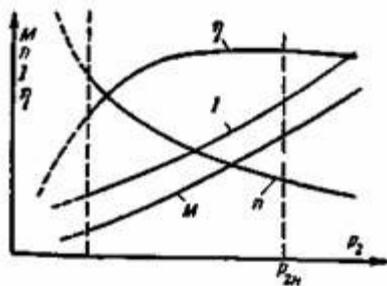


Рис. 9.19. Рабочие
характеристики двига-
теля с последовательным
возбуждением

На рис. 9.19 представлены рабочие характеристики двигателя с последовательным возбуждением. Пунктирные части характеристик относятся к тем нагрузкам, при которых не может быть допущена работа двигателя вследствие большой скорости вращения.

Механическая характеристика двигателя с последовательным возбуждением $n = f(M)$ при $U = \text{const}$ представлена на рис. 9.20.

Благодаря своим свойствам двигатель особенно пригоден для электрической тяги, для электроприводов к кранам и подъемникам. В этих случаях требуется, чтобы при больших нагрузках скорость резко уменьшалась, а вращающий момент (сила тяги) значительно увеличивался.

Скорость вращения последовательного двигателя можно регулировать путем изменения напряжения U на зажимах якоря или путем изменения магнитного потока.

На рис. 9.21 показаны схемы для регулирования: а) путем изменения U при помощи реостата; б) путем изменения потока. Поскольку обычно требуется понижение скорости вращения, то чаще применяют первый способ, который так же неэкономичен, как соответствующий способ регулирования скорости вращения двигателя с параллельным возбуждением.

Для электрической тяги (например, для трамвая) применяют два одинаковых двигателя, установленных на одном и том же вагоне. В этом случае можно получить необходимое число ступеней скорости вращения (7 – 10) путем комбинирования последовательного и параллельного соединений двигателей вместе с регулировочными сопротивлениями.

9.7.4. Двигатель со смешанным возбуждением

Схема двигателя со смешанным возбуждением представлена на рис. 9.22. Обычно последовательную обмотку включают согласно с параллельной таким образом, чтобы она складывалась с НС второй. В этом случае скорость вращения двигателя при увеличении нагрузки будет падать более резко, чем у двигателя с параллельным возбуждением, и менее резко, чем у двигателя с последовательным возбуждением.

Двигатели с параллельным возбуждением, имеющие возрастающую скоростную характеристику, не



Рис. 9.20. Механическая характеристика двигателя с последовательным возбуждением

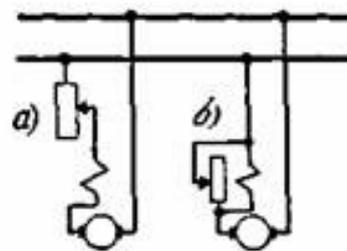


Рис. 9.21. Схемы для регулирования скорости вращения двигателя с последовательным возбуждением

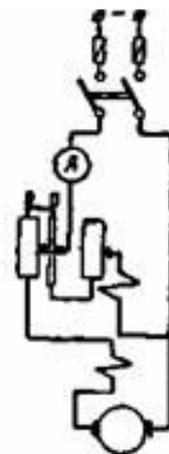


Рис. 9.22. Двигатель со смешанным возбуждением

могут работать устойчиво, поэтому их снабжают последовательной обмоткой с небольшим числом витков, действующей согласно с параллельной обмоткой.

Число витков обмотки рассчитывают таким образом, чтобы получилась падающая скоростная характеристика, при которой работа двигателя становится устойчивой. Таковую последовательную обмотку называют *стабилизирующей*.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия двигателя постоянного тока?
2. Что называют противо-ЭДС и каково ее влияние на работу двигателя постоянного тока?
3. Какие существуют способы регулирования частоты вращения?
4. Каково влияние сопротивления в цепи якоря на механическую характеристику?
5. Какие существуют способы пуска двигателя постоянного тока?
6. Какие существуют способы изменения направления вращения якоря?
7. Каковы последствия обрыва цепи обмотки возбуждения?
8. Почему двигатель постоянного тока параллельного возбуждения нельзя перевести в режим последовательного возбуждения, и наоборот?
9. Каковы рабочие характеристики двигателя постоянного тока?
10. Какие существуют тормозные режимы двигателя постоянного тока (схемы и механические характеристики)?
11. Перечислите свойства двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.
12. Что называют обрывом в цепи возбуждения?
13. Каким образом можно стабилизировать частоту вращения двигателя постоянного тока?
14. Каковы преимущества и недостатки двигателя постоянного тока по сравнению с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором?
15. Что называют режимом противовключения?
16. Как определить скорость идеального холостого хода?
17. Напишите уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока.

18. Напишите уравнения электрического и энергетического равновесий двигателя постоянного тока.
19. Как определить добавочное сопротивление в цепи якоря при противовключении?
20. Как определить сопротивление динамического торможения?
21. Объясните процесс нагрузки и саморегулирования двигателя постоянного тока с помощью его структурно-логической схемы.
22. В каком случае произойдет реверс на ходу под нагрузкой двигателя постоянного тока смешанного возбуждения?
23. Перечислите конструктивные элементы двигателя постоянного тока. Каково их назначение?
24. При каких условиях возможен реверс двигателя постоянного тока в процессе работы под нагрузкой?
25. По каким причинам снижается пусковой ток двигателя постоянного тока при питании цепи якоря однополупериодным напряжением?
26. Каковы отличия обмоток последовательного и параллельного возбуждения?
27. Каковы назначения основных конструктивных элементов двигателя постоянного тока?
28. Какие аварийные режимы работы возможны для двигателя постоянного тока?
29. Каков результат обрыва цепи возбуждения двигателя постоянного тока независимого возбуждения?
30. Почему ток холостого хода асинхронного двигателя больше, чем ток трансформатора такой же номинальной мощности?

Глава 10. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

10.1. Сельсины

Сельсин – информационная электрическая машина переменного тока, вырабатывающая напряжения, амплитуды и фазы которых определяются угловым положением ротора. Сельсины позволяют осуществить без общего механического вала согласованное вращение или поворот механизмов. Известно два режима работы сельсинов: *индикаторный* и *трансформаторный*. При работе сельсинов в индикаторном режиме происходит передача значений вращения на расстояние угла поворота механической системы. При работе сельсинов в трансформаторном режиме передается сигнал, воздействующий на исполнительный механизм таким образом, чтобы заставить его отработать заданный поворот.

Рассмотрим устройство и принцип действия однофазных двухполюсных контактных сельсинов. Однофазная обмотка возбуждения, включенная в сеть переменного тока, расположена на явнополюсном статоре. На роторе размещены три пространственно смещенные относительно друг друга под углом 120° катушки синхронизации. Концы катушек соединены в общий узел, начала катушек выведены на контактные кольца.

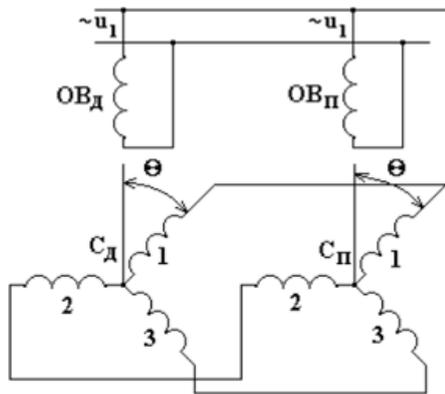


Рис. 10.1. Схема соединения однофазных сельсинов при индикаторном режиме работы: ОВ_д и ОВ_п – обмотки возбуждения сельсина-датчика и сельсина-приемника; С_д и С_п – катушки синхронизации

Обмотка возбуждения создает пульсирующий магнитный поток. Этот поток индуцирует трансформаторные ЭДС в катушках синхронизации. Наибольшая ЭДС индуцируется в катушке, ось которой совпадает с осью пульсирующего потока. При отклонении оси катушки ЭДС уменьшается по синусоидальному закону. Величина и фаза ЭДС в каждой катушке зависят от угла поворота ротора сельсина.

На рис. 10.1 приведена схема соединения однофазных сельсинов при индикаторном режиме работы. В схеме используются сельсин-датчик и сельсин-приемник, представляющие собой два совершенно одинаковых сельсина.

Если роторы обоих сельсинов ориентированы одинаковым образом относительно обмоток возбуждения, то в каждой паре катушек индуктируются одинаковые ЭДС. Катушки роторов обоих сельсинов соединены таким образом, что ЭДС в них направлены встречно друг другу и ток в соединительных проводах отсутствует. Такое положение сельсинов называют *согласованным*. Если повернуть ротор сельсина-датчика на угол θ , то в соответствующих катушках роторов наводятся различные по величине ЭДС, и в них возникают токи, которые, взаимодействуя с магнитными полями обмоток возбуждения, создают вращающие моменты. Ротор датчика удерживается в повернутом положении, следовательно, ротор приемника будет поворачиваться до тех пор, пока не исчезнет вращающий момент, т. е. пока не исчезнут токи в катушках сельсина, а это произойдет, когда ротор сельсина-приемника повернется на тот же угол θ , возникнет новое согласованное положение роторов сельсина-датчика и сельсина-приемника. На роторе сельсина-приемника устанавливают стрелку и шкалу, показывающие угол поворота сельсина-датчика. Если необходимо осуществить дистанционную передачу угла поворота к механизму, требующему большого вращающего момента, то используют схему трансформаторного режима работы сельсинов (рис. 10.2).

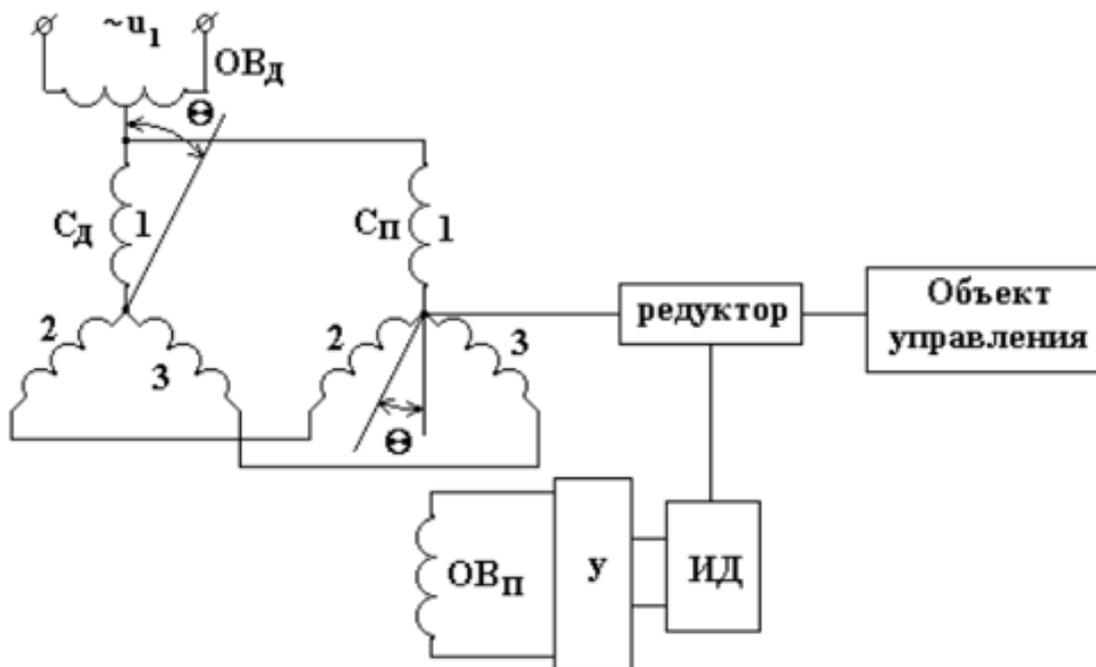


Рис. 10.2. Схема трансформаторного режима работы сельсинов

Обмотку возбуждения сельсина-датчика подключают к источнику однофазного тока. Катушки синхронизации датчика соединены с катушками синхронизации приемника, который работает как сельсин-трансформатор. Катушки синхронизации $C_{\text{п}}$ являются первичной обмоткой, а статорная обмотка $OB_{\text{п}}$ – вторичной (выходной) обмоткой. Последнюю через усилитель (y) соединяют с исполнительным двигателем. Исполнительный двигатель через редуктор связан с валом сельсина-приемника.

Обмотка возбуждения датчика образует пульсирующий по горизонтали магнитный поток. В катушках $C_{\text{д}}$ индуктируются ЭДС, которые создают токи в роторных катушках датчика и приемника. Каждая катушка синхронизации сельсина-приемника создает свой магнитный поток, а результирующий магнитный поток имеет такое же направление, как и поток в сельсине-датчике.

В обмотке возбуждения сельсина-приемника индуктируется ЭДС, величина и фаза которой зависят от угла и направления результирующего потока обмотки синхронизации приемника. Ось обмотки возбуждения приемника сдвинута на 90° относительно оси обмотки возбуждения датчика, поэтому, когда магнитный поток направлен горизонтально, в обмотке приемника $OB_{\text{п}}$ не возникает ЭДС. Это согласованное положение в трансформаторном режиме.

Если ротор сельсина-датчика повернуть на угол θ , то результирующий магнитный поток в роторе сельсина-приемника повернется тоже на угол θ , а на зажимах обмотки $OB_{\text{п}}$ появится напряжение, зависящее от угла θ . Это напряжение подается на вход усилителя, а затем на исполнительный двигатель. Двигатель вращается, поворачивая обмотки управления. Вал ротора сельсина-приемника через редуктор связан с валом объекта управления. Когда вал объекта управления повернется на нужный угол, одновременно с ним повернется на угол θ вал сельсина-приемника. Возникнет новый согласованный режим, и движение прекратится.

Исполнительный механизм и сельсин-датчик не нуждаются в механической связи и могут находиться на большом расстоянии друг от друга. Электрические системы дистанционной передачи угла поворота или вращения механизмов используют в радиолокаторах, радиопеленгаторах и другой специальной технике.

10.2. Поворотные трансформаторы. Индуктосины. Редуктосины

Поворотным, или вращающимся, **трансформатором** называют информационную электрическую машину, амплитуда выходного напряжения которой является функцией входного напряжения и углового положения ротора. Поворотные трансформаторы конструктивно сходны с асинхронными машинами с фазным ротором и контактными кольцами. К ним обычно подводят питание со стороны статора от источника переменного напряжения. На обмотке ротора (на выходе) получают напряжение, представляющее собой определенную функцию угла поворота ротора α . Обычно в трансформаторах требуется, чтобы это напряжение было пропорционально $\sin\alpha$, $\cos\alpha$. В соответствии с этим различают *синусные*, *косинусные* и *синус-косинусные трансформаторы*.

На рис. 10.3 представлена принципиальная схема поворотного трансформатора с двумя взаимно перпендикулярными обмотками на статоре и роторе.

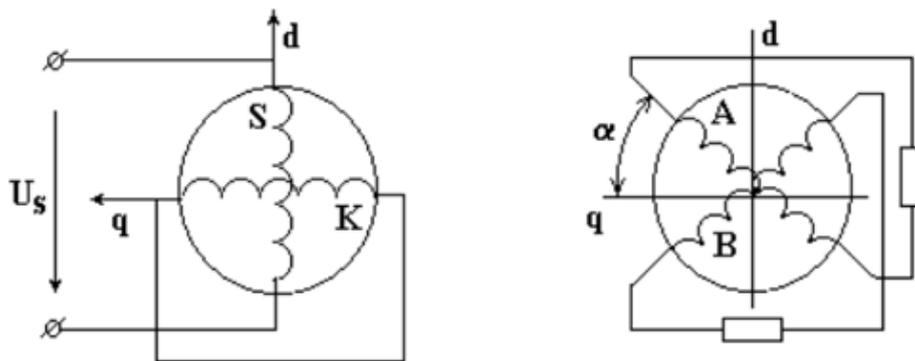


Рис. 10.3. Принципиальная схема поворотного трансформатора с двумя взаимно перпендикулярными обмотками на статоре и роторе

Назовем оси обмоток статора S и K соответственно продольной d и поперечной q осями поворотного трансформатора. Статорную обмотку S подключим к источнику переменного напряжения. Обмотка создает продольное пульсирующее магнитное поле, которое будет индуцировать в роторных обмотках A и B ЭДС. Значения электродвижущих сил зависят от угла поворота ротора α . При синусоидальном распределении поля вдоль окружности ротора напряжение на обмотке A будет меняться при повороте ротора пропорционально $\sin \alpha$, а напряжение на обмотке B – пропорционально $\cos \alpha$. При использовании обеих обмоток ротора получим синус-косинусный поворотный трансформатор.

Токи в роторных обмотках создают продольную составляющую магнитного потока, направленную встречно магнитному потоку статорной обмотки S , и поперечную составляющую потока, направленную перпендикулярно магнитному полю обмотки S . Вследствие появления поперечной составляющей нарушатся синусоидальный и косинусоидальный законы изменения ЭДС от угла поворота ротора α . Для компенсации полученной составляющей магнитного поля роторных обмоток на статоре размещают компенсационную обмотку K , замкнутую накоротко, под углом 90° к обмотке S . Обмотка K создает магнитный поток, направленный встречно поперечной составляющей магнитного потока ротора, и ослабляет ее. В результате погрешность поворотного трансформатора уменьшается.

Индукционный редуктосин представляет собой бесконтактный синус-косинусный поворотный трансформатор. Первичная и две вторичные обмотки размещены на статоре. Ротор выполнен в виде зубчатого кольца из электротехнической стали. Редуктосины не имеют скользящих контактов, что повышает надежность и точность их работы. При питании первичной обмотки синусоидальным напряжением со вторичных обмоток снимают два напряжения, амплитуды которых изменяются в функции угла поворота ротора. Повороту ротора на угол, равный зубцовому делению, соответствует полный период изменения амплитуды выходного напряжения (*зубцовым делением ротора* называют расстояние между зубцами ротора).

Индуктосином называют бесконтактную информационную машину без магнитопровода с печатными первичной и вторичной обмотками, возбуждаемую однофазным напряжением. Выходное напряжение индуктосина – функция углового положения ротора.

Конструктивно индуктосин представляет собой два диска (ротор и статор) из изоляционного материала (керамики, стекла). Один из дисков соединяют с валом, угловое положение которого подлежит изменению, второй оставляют неподвижным. На торцевых поверхностях, обращенных друг к другу, диски несут печатные обмотки. Поворотные трансформаторы используют в электрических счетно-решающих системах, в следящих системах в качестве датчиков угла, преобразователях «угол-код», системах числового и программного управления металлорежущими станками.

10.3. Тахогенераторы

Тахогенератор – информационная электрическая машина, предназначенная для выработки электрических сигналов, пропорциональных частоте вращения ротора. Существуют тахогенераторы постоянного и переменного тока. Тахогенераторы постоянного тока представляют собой маломощные генераторы постоянного тока с независимым возбуждением или с возбуждением от постоянных магнитов. Выходное напряжение тахогенератора пропорционально частоте вращения ротора.

Асинхронный тахогенератор по конструктивному исполнению подобен асинхронному двигателю с полым немагнитным ротором. Он состоит из статора и неподвижного сердечника ротора, между которыми в воздушном зазоре вращается тонкий полый немагнитный цилиндр. Принципиальная схема асинхронного тахогенератора представлена на рис. 10.4.

На статоре генератора размещены две обмотки, пространственно смещенные относительно друг друга на 90° . Одна из них, обмотка возбуждения (В), подключена к источнику синусоидального напряжения, другая обмотка, являющаяся генератором (Г), включается на измерительный прибор или измерительную схему. Обмотка возбуждения создает пульсирующий магнитный поток Φ_B .

При неподвижном роторе ЭДС в генераторной обмотке равна нулю, так как вектор магнитного потока Φ_B перпендикулярен оси этой обмотки.

При вращении цилиндра пульсирующий магнитный поток индуцирует в нем ЭДС вращения. Под действием ЭДС в цилиндре появляются токи, направления которых указаны на рис. 10.4. Токи создают по оси генераторной обмотки пульсирующий поперечный поток Φ_{II} . Этот поток индуцирует в генераторной обмотке ЭДС, пропорциональную частоте вращения цилиндра. Асинхронные тахогенераторы, как и тахогенераторы постоянного тока, используют для измерения скорости вращения валов, а также для выработки ускоряющих или замедляющих сигналов в автоматических устройствах.

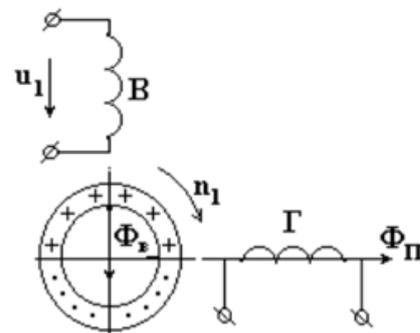


Рис. 10.4. Принципиальная схема асинхронного тахогенератора

10.4. Шаговые электродвигатели

Шаговый электродвигатель – вращающийся электродвигатель с дискретными угловыми перемещениями ротора, осуществляемыми за счет импульсов сигнала управления. Шаговые, или импульсные, электродвигатели преобразуют электрические импульсы в фиксированные угловые перемещения – «шаги». Шаговые двигатели находят применение в различных механизмах, рабочие органы которых должны перемещаться дискретно. К таким механизмам относят киносъёмочную и проекционную аппаратуру, механизмы подачи различных станков, устройства перемещения валов прокатных станков и др. Шаговые электродвигатели с активным ротором имеют ротор, выполненный из постоянных магнитов (рис. 10.5). Статор имеет выступающие полюсы с сосредоточенной обмоткой в виде катушек на каждом полюсе. Питание статорных катушек производится импульсами напряжения, поступающими с электронного коммутатора.

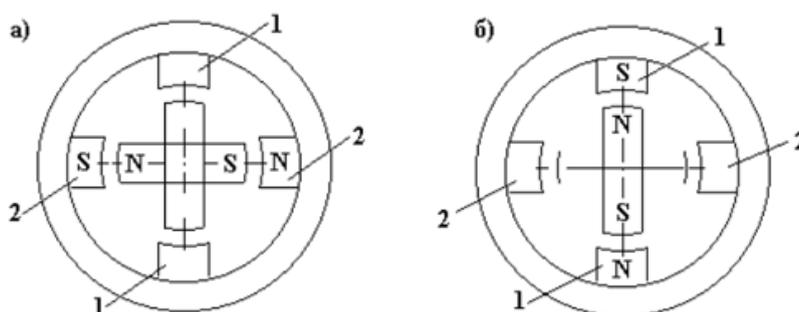


Рис. 10.5. Ротор, выполненный из постоянных магнитов

Пусть в начальный момент времени подают напряжение на обмотки полюсов 2 – 2. Образуется статорное магнитное поле с горизонтально расположенными полюсами $N-S$. В результате взаимодействия этого поля с постоянными магнитами ротора последний займет положение, при котором оси магнитных полей статора и ротора совпадают. Далее с помощью коммутатора напряжение снимают с обмоток 2 – 2 и подают на обмотки полюсов 1 – 1. Образуется магнитное поле статора с вертикально расположенными полюсами. Отключение катушек 2 – 2 и подключение катушек 1 – 1 вызывает скачкообразный поворот магнитного поля статора на 90° . Ротор также поворачивается на 90° вслед за магнитным полем статора. Ротор шагового двигателя занимает определенное фиксированное положение, соответствующее наибольшей

магнитной проводимости относительно возбужденных статорных полюсов. Если отклонить ротор от этого равновесного положения на некоторый угол, то магнитная проводимость для потока уменьшится, силовые линии магнитного поля деформируются и возникнет синхронизирующий момент, возвращающий ротор в прежнее положение. На статоре шагового реактивного двигателя имеются явно выраженные полюсы с обмоткой возбуждения. Ротор представляет собой зубчатое колесо без обмотки возбуждения. Катушки статора двигателя получают поочередно импульсы тока, образуя магнитное поле, бегущее определенными скачками по окружности статора. Явнополюсный ротор двигателя синхронно следует за этим полем статора соответствующими дискретными шагами, равными углу $\alpha_{ш}$, где $\alpha_{ш}$ – величина шага ротора двигателя

$$\alpha_{ш} = \frac{360^\circ}{2P \cdot m},$$

где $2P$ – число явных полюсов ротора, равное числу роторных зубцов; m – число обмоток управления на статоре.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой информационная электрическая машина переменного тока?
2. Какие режимы работы сельсинов вам известны?
3. Что происходит при работе сельсинов в индикаторном режиме?
4. Что происходит при работе сельсинов в трансформаторном режиме?
5. Какое положение сельсинов называют согласованным?
6. Что устанавливают на роторе сельсина-приемника?
7. Что представляют собой поворотные трансформаторы?
8. Что представляет собой индукционный редуктосин?
9. Какие контакты не имеют редуктосины?
10. Какие информационные машины называют индуктосинами?
11. В каких системах используют поворотные трансформаторы?
12. Какие информационные машины называют тахогенераторами?
13. Какие виды тахогенераторов существуют?
14. Что представляют собой тахогенераторы постоянного тока?
15. Что представляют собой тахогенераторы переменного тока?
16. Что представляют собой шаговые электродвигатели?

Контрольные работы

Методические указания по выполнению контрольных работ

При выполнении контрольной работы необходимо соблюдать следующие требования:

- чертежи следует оформлять на листах формата А4, при необходимости А3 (печать в А4) в соответствии с единой системой конструкторской документации; заполнить основную надпись чертежа (обозначение документа; наименование изделия; наименование организации, выпускающей документ; фамилии лиц, подписывающих документ);

- контрольную работу необходимо сдать в печатном варианте в папке со скоросшивателем, листы вставить в файлы, по установленному образцу оформить титульный лист; после чертежей указать список литературы, поставить подпись исполнителя и оставить место для рецензии; допускается выполнять работу в тетради в клеточку;

- схему следует выполнять при помощи чертежных инструментов;

- в работе должен быть проставлен номер варианта;

- обозначения и изображения элементов в схемах необходимо выполнять строго в соответствии с ГОСТом и ЕСКД, в конце работы указать список используемой литературы;

- задания, выполненные не по своему варианту, не засчитываются и возвращаются студенту;

- незначительная контрольная работа подлежит повторному выполнению.

В установленные учебным графиком сроки студент направляет выполненную работу для проверки в учебное заведение. Домашние контрольные работы оцениваются по пятибалльной шкале. После получения прорецензированной работы студенту необходимо исправить отмеченные ошибки, выполнить все указания преподавателя, повторить недостаточно усвоенный материал.

Задача № 1

Электродвигатель постоянного тока с параллельным возбуждением имеет номинальную мощность $P_{\text{ном}}$; номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$; частоту вращения $n = 3000 \text{ об/мин}$; ток потребляется из сети I ; сопротивление обмоток возбуждения R_b ; сопротивление якорной обмотки R_a .

Определите:

- 1) потребляемую мощность P ;
 - 2) КПД двигателя;
 - 3) полезный вращающий момент M ;
 - 4) ток якоря I_a ;
 - 5) противо-ЭДС в обмотке якоря;
 - 6) суммарные потери в двигателе P ;
 - 7) потери в обмотке якоря P_a и обмотке возбуждения P_b .
- Изобразите схему двигателя.

| Параметр | Номер варианта | | | | | | | | | |
|------------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| $P_{\text{ном}}$, кВт | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| I , А | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 50 | 60 |
| R_b , Ом | 1,90 | 1,80 | 1,70 | 1,50 | 1,30 | 1,20 | 1,10 | 0,95 | 0,90 | 0,80 |
| R_a , Ом | 0,18 | 0,15 | 0,13 | 0,11 | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,03 |

Задача № 2

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет номинальную мощность $P_{\text{ном}}$; номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 0,4$ кВ; частоту вращения n_2 ; КПД $\eta_{\text{ном}} = 0,8$; $M_n/M_h = 2S$; $M_{\text{max}}/M_n = 2,2$; промышленную частоту $f_{\text{ном}} = 50$ Гц.

Определите:

- 1) потребляемую мощность P ;
- 2) номинальный, максимальный и пусковой моменты;
- 3) номинальный и пусковой токи;
- 4) номинальное скольжение;
- 5) частоту тока в роторе;
- 6) суммарные потери в электродвигателе.

| Параметр | Номер варианта | | | | | | | | | |
|------------------------|----------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| $P_{\text{ном}}$, кВт | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| n_2 , об/мин | 2950 | 1570 | 735 | 950 | 575 | 475 | 950 | 1570 | 950 | 735 |

Задача № 3

Трехфазный трансформатор имеет номинальные параметры $S_{ном}$; $U_{ном1}$; $U_{ном2} = 0,4$ кВ; потери в обмотках $P_{сиз}$, P_k (взять из таблиц в учебнике). Первичные обмотки соединены $\Delta/Y \cos\varphi_2 = 0,9$; нагрузка P_2 .

Определите:

- 1) номинальные токи в обмотке и при фактической нагрузке;
- 2) число витков обмотки;
- 3) КПД трансформатора при номинальной и фактической нагрузке.

Нарисуйте схему трансформатора.

| Параметр | Номер варианта | | | | | | | | | |
|-----------------|----------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| $S_{ном}$, кВА | 160 | 250 | 400 | 630 | 1000 | 1500 | 2000 | 1000 | 2500 | 4000 |
| $U_{ном1}$, кВ | 10 | 6 | 10 | 6 | 10 | 6 | 10 | 6 | 10 | 6 |
| P_2 , кВт | 120 | 200 | 350 | 580 | 800 | 1400 | 1700 | 1300 | 2200 | 3700 |

Задачи и тестовые вопросы

Асинхронные трехфазные двигатели

1. Каков сдвиг фаз между токами в двухфазной и трехфазной системах соответственно?

- а) 90 и 90°; б) 90 и 120°; в) 180 и 120°; г) 120 и 90°.

2. Через две катушки, сдвинутые в пространстве на угол 90°, проходят токи $i_1 = 10\sin 314t$ и $i_2 = 10\cos 314t$ соответственно. Какова частота вращения результирующего магнитного поля?

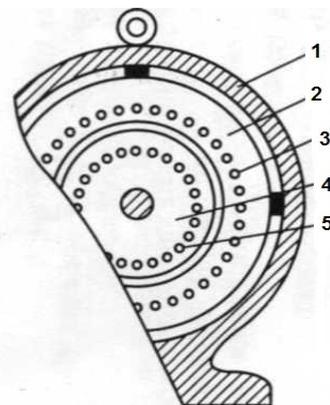
- а) 1000 об/мин; б) 1500 об/мин; в) 3000 об/мин.

3. Частота сети $f = 500$ Гц. Какова частота вращения соответственно двухполюсного и четырехполюсного вращающихся магнитных полей?

- а) 60 000 и 30 000 об/мин;
б) 30 000 и 15 000 об/мин;
в) 30 000 и 60 000 об/мин.

4. Какая из частей асинхронного двигателя на рисунке не может быть изготовлена из указанных материалов?

- а) корпус 1 – из стали, чугуна, алюминия;
б) сердечник статора 2 – из электротехнической стали, чугуна, алюминия;
в) обмотка статора 3 – из меди, алюминия;
г) ротор 4 – из электротехнической стали;
д) обмотка ротора 5 – из меди, алюминия, латуни.



5. Как определить скольжение S асинхронного двигателя, если известны n_0 – частота вращения магнитного поля, n – частота вращения ротора?

- а) $S = n_0/n$; б) $S = n/n_0$; в) $S = (n_0 - n) / n_0$.

6. Какие двигатели переменного тока называют асинхронными?

а) у которых скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля;

б) у которых скорость вращения ротора меньше скорости вращения магнитного поля;

в) у которых скорость вращения ротора больше скорости вращения магнитного поля.

7. Почему намагничивающий ток асинхронного двигателя составляет 25 – 50 % $I_{ном}$, в то время как у трансформатора он равен 3 – 10 % $I_{ном}$?

а) так как на отдельных участках магнитной цепи двигателя амплитуда магнитной индукции B_{max} больше, чем у трансформатора;

б) так как среднее значение B_{max} вдоль всего магнитопровода асинхронного двигателя больше, чем у трансформатора;

в) так как в магнитопроводе двигателя значительно больший воздушный зазор между статором, чем у трансформатора.

8. Сколько полюсов имеет магнитное поле трехфазного тока частотой 50 Гц, вращающееся с частотой 3000 об/мин?

а) два; б) три; в) шесть.

9. Как можно изменить направление вращения магнитного поля трехфазного тока?

а) это невозможно;

б) нужно поменять местами две любые фазы;

в) нужно поменять местам все три фазы.

10. Почему магнитопровод асинхронного двигателя набирают из тонких листов электротехнической стали, изолированных лаком друг от друга?

а) для уменьшения потерь на вихревые токи;

б) уменьшения потерь на гистерезис (перемагничивание);

в) упрощения конструкции магнитопровода.

11. Чем асинхронный двигатель с фазным ротором отличается от двигателя с короткозамкнутым ротором?

- а) наличием контактных колец и щеток;
- б) наличием пазов для охлаждения;
- в) числом катушек обмотки статора.

12. Как изменится ток в обмотке ротора при увеличении механической нагрузки на валу двигателя?

- а) увеличится; б) не изменится; в) уменьшится.

13. Каким будет скольжение при частоте вращения магнитного поля 3000 об/мин и частоте вращения ротора 2940 об/мин?

- а) 0,2 %; б) 2 %; в) 20 %.

14. Какова частота вращения ротора, если $S = 0,05$; $p = 1$; $f = 50$ Гц?

- а) 3000 об/мин; б) 1425 об/мин; в) 2850 об/мин.

15. Как изменится скольжение, если увеличить момент механической нагрузки на валу двигателя?

- а) увеличится; б) не изменится; в) уменьшится.

16. Какая часть механической характеристики асинхронного двигателя, изображенная на рисунке, является рабочей?

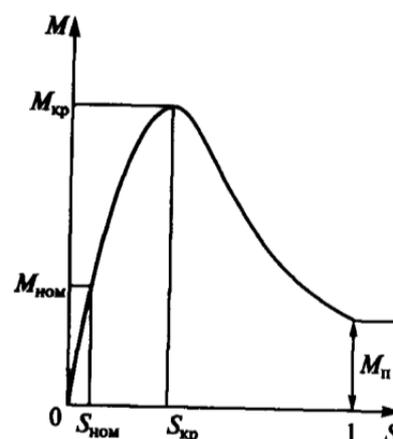
- а) при S от 0 до $S_{\text{ном}}$;
- б) при S от $S_{\text{кр}}$ до 1;
- в) при S от 0 до $S_{\text{кр}}$.

17. Какое скольжение асинхронного двигателя называют критическим?

а) максимальное скольжение двигателя;

б) скольжение при работе двигателя вхолостую;

в) скольжение, при котором двигатель развивает критический, т. е. максимальный, момент.



18. В каком соотношении находятся частота вращения магнитного поля n_0 асинхронного двигателя и частота вращения ротора n ?

- а) $n_0 = n$; б) $n_0 > n$; в) $n_0 < n$.

19. Как зависит частота тока ротора f_2 асинхронного двигателя от частоты сети f_1 и скольжения S ?

а) $f_2 = f_1$; б) $f_2 = f_1/S$; в) $f_2 = f_1 S$.

20. Каким выражением определяется момент асинхронного двигателя?

а) $M = CM\Phi I_2$. б) $M = CM\Phi I_2 \cos \Psi_2$. в) $M = CM\Phi I_1$.

21. Как изменяется частота тока ротора f_2 асинхронного двигателя при пуске его до номинальной скорости?

а) от нуля до значения, равного произведению $f_1 S_{\text{ном}}$;

б) от частоты сети f_1 до значения, равного произведению $f_1 S_{\text{ном}}$;

в) не изменяется.

22. Что произойдет, если тормозной момент на валу асинхронного двигателя превысит максимальный момент, который способен развить двигатель?

а) скольжение уменьшится до нуля;

б) скольжение увеличится до единицы, и ротор остановится;

в) скольжение будет равно критическому.

23. Чему равен вращающий момент M асинхронного двигателя при $S = 0$ и $S = 1$?

а) при $S = 0$ момент $M = 0$; при $S = 1$ момент $M = M_{\text{ном}}$;

б) при $S = 0$ момент $M = 0$; при $S = 1$ момент $M = 0$;

в) при $S = 0$ момент $M = M_{\text{ном}}$; при $S = 1$ момент $M = 0$.

24. Чему равен вращающий момент асинхронного двигателя при критическом скольжении?

а) нулю; б) $M_{\text{ном}}$; в) M_n ; г) $M_{\text{max}} = M_{\text{кр}}$.

25. Напряжение на зажимах асинхронного двигателя уменьшилось в два раза. Как изменится при этом его вращающий момент?

а) не изменится;

б) уменьшится в два раза;

в) уменьшится в четыре раза;

г) увеличится в два раза;

д) увеличится в четыре раза.

26. Частота тока питающей сети равна 50 Гц. Ротор асинхронного двигателя вращается со скольжением, равным 2 %. Какова при этом частота тока в обмотке ротора?

- а) 20 Гц; б) 1 Гц; в) 2 Гц.

27. Как зависит ЭДС ротора E_2 вращающегося асинхронного двигателя от скольжения?

- а) не зависит от скольжения;
 б) прямо пропорциональна скольжению;
 в) обратно пропорциональна скольжению.

28. При скольжении 2 % в одной фазе обмотки ротора асинхронного двигателя индуцируется ЭДС, равная 1 В. Чему будет равна ЭДС, если ротор остановить?

- а) нулю; б) 1 В; в) 10 В; г) 50 В.

29. Как изменятся критический момент $M_{кр}$ и критическое скольжение $S_{кр}$ асинхронного двигателя при введении в цепь ротора дополнительного сопротивления?

- а) $M_{кр}$ и $S_{кр}$ увеличатся;
 б) $M_{кр}$ уменьшится, а $S_{кр}$ увеличится;
 в) $M_{кр}$ не изменится, а $S_{кр}$ увеличится.

30. Какое из значений величин, характерных для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором общего назначения (см. рисунок), указано неправильно?

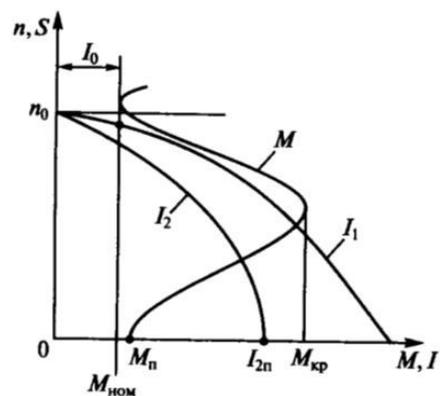
а) номинальное скольжение $S_{ном} = 2 - 8 \%$;

б) пусковой момент $M_{п} = (1,0 - 1,8) \times M_{ном}$;

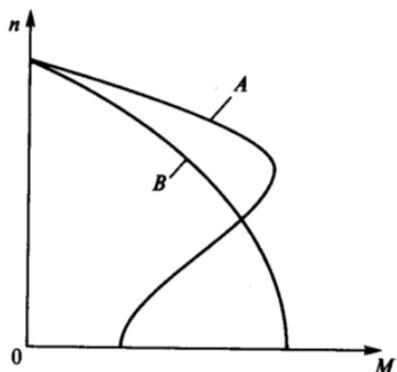
в) максимальный (критический) момент $M_{кр} = (1,6 - 2,5)M_{ном}$;

г) ток холостого хода $I_0 = 10 - 15 \%$;

д) пусковой ток ротора $I_{2п} = (5 - 7)I_{2ном}$.



31. Как можно уменьшить значение пускового тока асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором? (Укажите *неправильный* ответ.)



- а) увеличить активное сопротивление цепи ротора;
- б) увеличить сопротивление цепи статора;
- в) уменьшить напряжение, подводимое к статору при пуске.

32. Как можно получить для асинхронного двигателя с фазным ротором, работающего на естественной характеристике *A* (см. рисунок), искусственную характеристику *B*?

- а) характеристику *B* получить нельзя;
- б) характеристику *B* можно получить, увеличив частоту тока статора;
- в) характеристику *B* можно получить, увеличив сопротивление цепи ротора.

33. Может ли пусковой момент асинхронного двигателя с фазным ротором стать равным максимальному моменту?

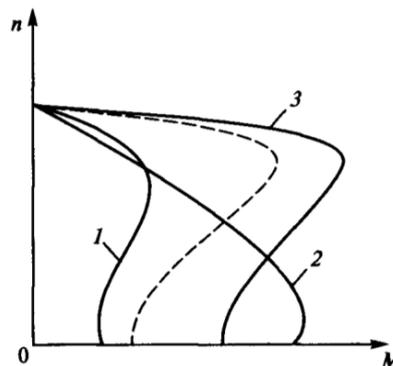
- а) может, если в цепь ротора ввести дополнительное сопротивление, при котором критическое скольжение станет равным единице;
- б) не может, так как пусковой момент всегда меньше критического;
- в) не может, так как при пуске скольжение равно единице, а критическое скольжение всегда меньше единицы.

34. Линейное напряжение сети 220 В. В паспорте асинхронного двигателя указано напряжение 220/380 В. Как должны быть соединены обмотки двигателя при пуске с ограничением пусковых токов и в рабочем режиме?

- а) при пуске – «звездой», в рабочем режиме – «треугольником»;
- б) в обоих случаях «звездой»;
- в) в обоих случаях «треугольником»;
- г) при пуске – «треугольником», в рабочем режиме – «звездой».

35. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя показана на рисунке штриховой линией. Укажите, какой вид (1, 2 или 3) будет иметь характеристика двигателя при напряжении на обмотках его статора меньше номинального.

- а) 1; б) 2; в) 3.



36. Как изменится номинальная скорость вращения асинхронного двигателя при увеличении числа полюсов обмотки статора в два раза?

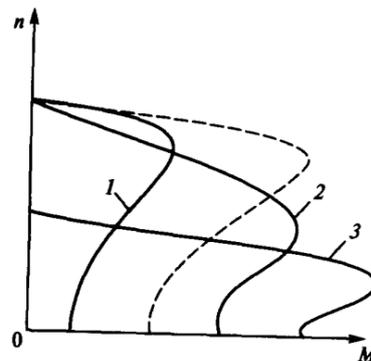
- а) уменьшится;
б) не изменится;
в) увеличится.

37. Какой асинхронный двигатель можно использовать в качестве трансформатора для регулировки напряжения?

- а) с фазным ротором, если ротор вращается;
б) с фазным ротором, если ротор неподвижен;
в) с короткозамкнутым ротором, если ротор вращается;
г) с короткозамкнутым ротором, если ротор неподвижен.

38. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя показана на рисунке штриховой линией. Укажите, какой вид (1, 2 или 3) будет иметь искусственная механическая характеристика, если в цепь ротора ввести добавочное сопротивление.

- а) 1; б) 2; в) 3.



39. Какой будет частота вращения двигателя при номинальном моменте на его валу, если в цепь ротора ввести добавочное сопротивление $R_d = 0,4$ Ом? (Сопротивление фазы обмотки ротора $R_2 = 0,08$ Ом, номинальная частота вращения двигателя $n_{ном} = 950$ об/мин.)

- а) 700 об/мин; б) 750 об/мин; в) 600 об/мин; г) 720 об/мин.

40. Как можно плавно регулировать в широких пределах частоту вращения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?

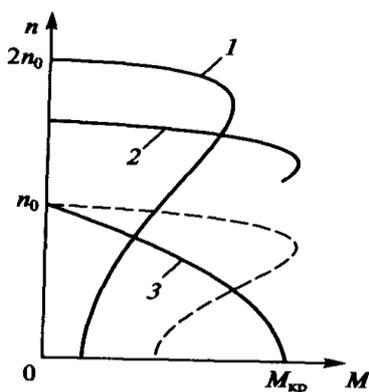
- а) изменением числа пар полюсов вращающегося магнитного поля статора;
- б) изменением сопротивления обмотки ротора;
- в) изменением частоты питающего напряжения.

41. Как можно плавно регулировать частоту вращения асинхронного двигателя с фазным ротором?

- а) изменением числа пар полюсов вращающегося магнитного поля статора;
- б) изменением сопротивления цепи обмотки ротора;
- в) частота вращения плавно не регулируется.

42. Во сколько раз уменьшаются начальный пусковой фазный и линейный токи обмотки статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, а также пусковой момент, если при пуске обмотки статора соединить «звездой», а не «треугольником»? (Укажите неправильный ответ.)

- а) фазный ток уменьшится в $\sqrt{3}$ раз;
- б) линейный ток уменьшится в $\sqrt{3}$ раз;
- в) линейный ток уменьшится в три раза;
- г) пусковой момент уменьшится в три раза.



43. Укажите на рисунке механическую характеристику трехфазного асинхронного двигателя (1, 2 или 3), соответствующую регулированию его скорости путем увеличения частоты напряжения статора, если штриховой линией показана естественная характеристика этого двигателя.

- а) 1; б) 2; в) 3.

44. Почему при увеличении нагрузки мощность асинхронного двигателя также увеличивается?

- а) так как с возрастанием нагрузки активная мощность увеличивается, а реактивная мощность практически остается постоянной;

б) так как с возрастанием нагрузки потери мощности остаются постоянными;

в) так как с возрастанием нагрузки реактивная мощность двигателя уменьшается.

45. Какова мощность асинхронного двигателя в режиме холостого хода?

а) большая, так как активная мощность двигателя соизмерима с реактивной;

б) маленькая, так как активная мощность меньше реактивной;

в) большая, так как активная мощность больше реактивной.

46. Как зависит мощность электрических потерь в роторе асинхронного двигателя от скольжения?

а) не зависит от скольжения;

б) прямо пропорциональна скольжению;

в) обратно пропорциональна скольжению.

47. Как можно увеличить мощность асинхронного двигателя без применения искусственных схем для повышения коэффициента мощности?

а) работать с нагрузкой, равной 30 – 50 % номинальной нагрузки двигателя;

б) не отключать двигатель при его работе вхолостую;

в) работать с нагрузкой, близкой к номинальной, и отключать двигатель при его работе вхолостую.

48. Как изменяются при увеличении нагрузки асинхронного двигателя потери энергии в меди и стали?

а) в обоих случаях увеличиваются;

б) в меди увеличиваются, в стали не изменяются;

в) в меди не изменяются, в стали увеличиваются.

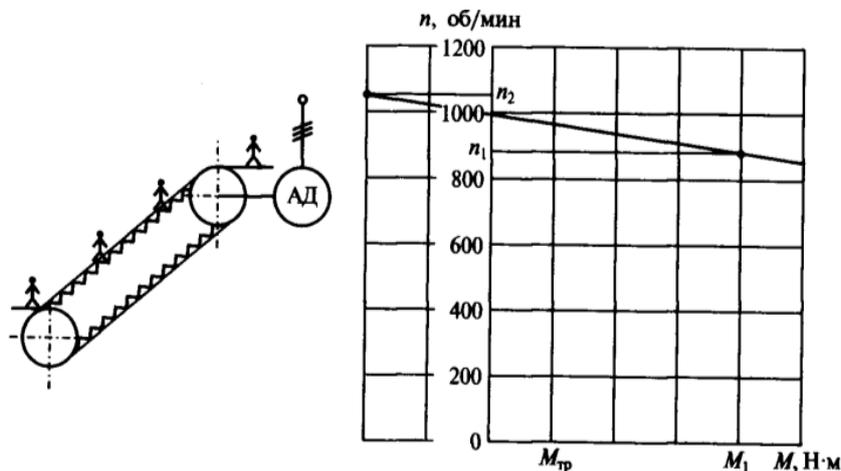
49. Ваттметр, подключенный к асинхронному двигателю, показывает при номинальной нагрузке 1 кВт, при холостом ходе 50 Вт, при коротком замыкании 50 Вт. Каков КПД двигателя?

а) 90 %; б) 95 %; в) 98 %.

50. Асинхронный двигатель развивает на валу полезную механическую мощность 5 кВт, его КПД составляет 0,8, а коэффициент мощности 0,625. Какую полную мощность S потребляет двигатель от сети?
 а) 1 кВ·А; б) 25 кВ·А; в) 10 кВ·А.

51. Какой из перечисленных способов электрического торможения асинхронного двигателя является экономичным?
 а) динамическое торможение;
 б) генераторное торможение с отдачей энергии в сеть;
 в) торможение противовключением.

52. Эскалатор метро приводится в движение асинхронным трехфазным двигателем с фазным ротором, естественная механическая характеристика которого изображена на рисунке. Частота вращения двигателя при подъеме пассажиров $n_1 = 900$ об/мин, а момент, развиваемый двигателем, M_1 . Какова частота вращения двигателя n_2 при спуске того же числа пассажиров, если момент, определяемый силами трения в звеньях механизма эскалатора, при подъеме и спуске одинаков и равен $M_{тр}$, а двигатель работает в режиме генераторного торможения?
 а) 1000 об/мин; б) 1025 об/мин; в) 1050 об/мин; г) 1100 об/мин.



53. На рисунке представлены механические характеристики трехфазного асинхронного двигателя. Какие приведенные режимы работы двигателя определяют различные участки этих характеристик? (Укажите неправильный ответ.)

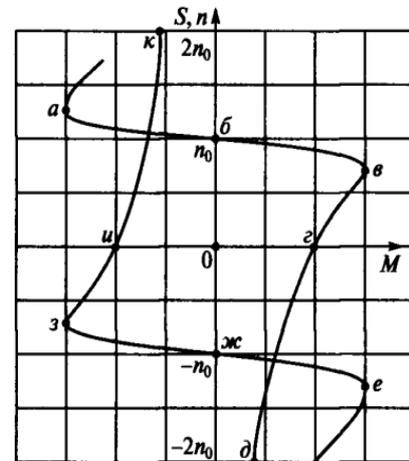
а) участки *бвг* и *жзи* – двигательные режимы при вращении соответственно вперед и назад;

б) участки *ab* и *же* – генераторное рекуперативное торможение при вращении соответственно вперед и назад;

в) участки *ки* и *гд* – торможение противовключением при вращении соответственно назад и вперед.

54. Для какой из точек механических характеристик, приведенных на рисунке, скольжение определено неправильно?

- а) $S_{\text{б}} = 0$; б) $S_{\text{в}} = 0,25$; в) $S_{\text{и}} = 1,0$;
 г) $S_{\text{е}} = -0,25$; д) $S_{\text{к}} = -3$; е) $S_{\text{д}} = 3$.



55. Как изменяются магнитный поток Φ , номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$, номинальный момент $M_{\text{ном}}$, номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ и номинальное скольжение $S_{\text{ном}}$ трехфазного асинхронного двигателя американского производства с $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$ и $f = 60 \text{ Гц}$ при работе его в России от сети с напряжением 380 В и частотой 50 Гц ? (Укажите неправильный ответ.)

- а) поток Φ увеличивается;
 б) частота вращения $n_{\text{ном}}$ уменьшается;
 в) момент $M_{\text{ном}}$ практически не изменяется;
 г) мощность $P_{\text{ном}}$ уменьшается;
 д) скольжение $S_{\text{ном}}$ уменьшается.

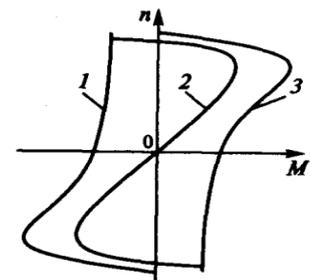
56. Какую полезную мощность на валу можно получить от трехфазного двигателя мощностью 1 кВт , включенного в однофазную сеть?

- а) не более 2000 Вт ;
 б) не более 7000 Вт ;
 в) не менее 1 кВт .

Асинхронные однофазные двигатели

57. Какая из характеристик (1, 2 или 3) на рисунке принадлежит механической характеристике однофазного асинхронного двигателя без пусковой обмотки?

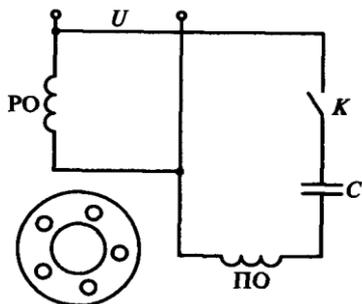
- а) 1; б) 2; в) 3.



58. Чему равен пусковой момент однофазного асинхронного двигателя, не имеющего пусковой обмотки?

- а) половине максимального момента;
- б) номинальному моменту;
- в) нулю.

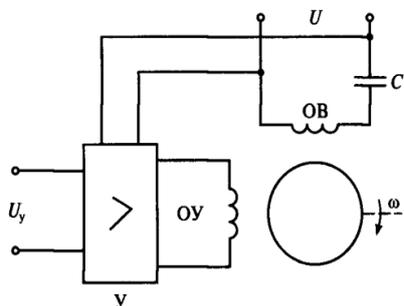
59. Какое из приведенных положений ошибочно для схемы пуска однофазного асинхронного двигателя на рисунке?



- а) рабочая (РО) и пусковая (ПО) обмотки сдвинуты в пространстве на 90° ;
- б) конденсатор С сдвигает фазу тока в ПО на 90° ;
- в) при пуске РО и ПО образуют вращающееся магнитное поле;
- г) после окончания пуска ключ К размыкается;

кается;

- д) после окончания пуска ключ К остается включенным.



60. Какими способами осуществляется регулирование скорости вращения в схеме двухфазного широкорегулируемого асинхронного двигателя с обмотками возбуждения (ОВ) и управления (ОУ), изображенной на рисунке?

- а) изменением напряжения управления

U_y с помощью усилителя У;

- б) изменением напряжения сети U ;
- в) изменением емкости конденсатора С.

61. В автоматических устройствах находят применение асинхронные однофазные электродвигатели. Какой из перечисленных двигателей используют в приборных следящих системах?

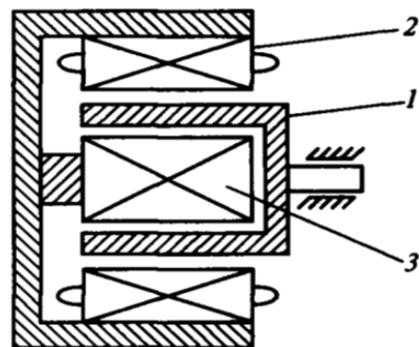
- а) однофазный;
- б) двигатель с экранированными (расщепленными) полюсами;
- в) двухфазный конденсаторный.

62. Для чего ротор асинхронных микродвигателей выполняют в виде латунного или алюминиевого стакана 1 (см. рисунок), расположенного в расточке сердечника статора между его наружной 2 и внутренней 3 частями, и какая из указанных причин главная?

а) для уменьшения сопротивления обмотки ротора;

б) увеличения начального пускового момента;

в) уменьшения момента инерции ротора.



63. Как осуществляют реверсирование (изменение направления вращения) трехфазных и однофазных асинхронных двигателей? (Укажите неправильный ответ.)

а) в трехфазном двигателе меняют местами две фазы;

б) в конденсаторном двигателе изменяют фазу напряжения на управляющей обмотке;

в) в двигателе с экранированными (расщепленными) полюсами меняют местами две фазы.

64. Какие асинхронные двигатели имеют наилучшие энергетические показатели (КПД и $\cos\phi$)?

а) трехфазные;

б) двухфазные;

в) однофазные.

Синхронные машины

65. Для какой из частей синхронной машины, изображенных на рисунке, неправильно указан материал, из которого она изготавливается?

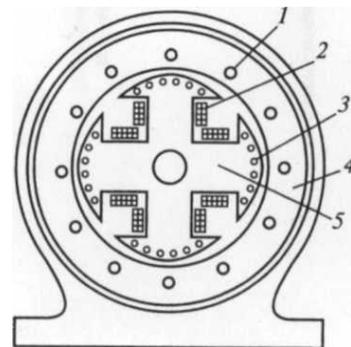
а) обмотка статора 1 – медный провод;

б) обмотка возбуждения 2 – медный провод;

в) пусковая или демпферная обмотка 3 – медные, латунные или алюминиевые стержни;

г) сердечник статора 4 – чугун;

д) сердечник ротора 5 – электротехническая сталь.



66. Почему сердечник статора синхронной машины обязательно собирают из отдельных тонких листов электротехнической стали, а ротор могут изготавливать из куска стали? (Укажите неправильный ответ.)

- а) так как магнитный поток в сердечнике статора переменный и перемещается относительно сердечника;
- б) так как магнитный поток относительно сердечника ротора неподвижен;
- в) так как магнитный поток в сердечнике статора намного больше, чем в сердечнике ротора.

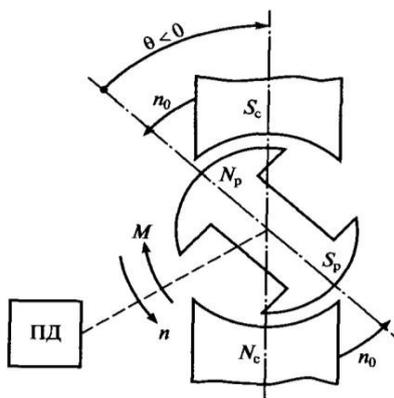
67. В каком соотношении находятся частота вращения магнитного поля синхронной машины n_0 и частота вращения ротора n ?

- а) $n_0 = n$; б) $n_0 > n$; в) $n_0 < n$.

68. Какие машины переменного тока называют синхронными?

- а) машины, в которых скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля;
- б) машины, в которых скорость вращения ротора меньше скорости вращения магнитного поля;
- в) машины, в которых скорость вращения ротора больше скорости вращения магнитного поля.

69. Синхронный генератор вращается приводным двигателем (ПД). На рисунке показано расположение полюсов ротора N_p, S_p и статора S_c, N_c генератора. (Полюса статора для наглядности изображены в виде постоянных магнитов, на самом деле они являются неявными.) В каком из перечисленных признаков генераторного режима синхронной машины допущена ошибка?



В каком из перечисленных признаков генераторного режима синхронной машины допущена ошибка?

- а) полюса ротора N_p, S_p опережают на угол θ полюса статора S_c, N_c ;
- б) момент генератора M является тормозным;
- в) момент ПД противоположен направлению вращения;
- г) механическая энергия ПД превращается в электрическую энергию генератора;
- д) частота вращения ротора n с полюсами N_p, S_p равна частоте вращения n_0 полюсов статора S_c, N_c .

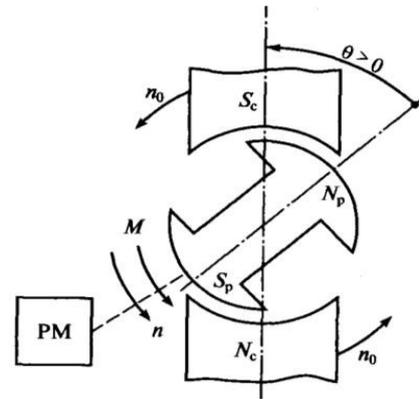
70. Синхронный двигатель вращает рабочий механизм (РМ). На рисунке показано расположение полюсов ротора N_p, S_p и статора S_c, N_c двигателя. (Полюса статора для наглядности изображены в виде постоянных магнитов, на самом деле они являются неявными.) В каком из перечисленных признаков двигательного режима синхронной машины допущена ошибка?

а) полюса ротора N_p, S_p отстают на угол θ от полюсов статора S_c, N_c ;

б) момент двигателя M является движущим;

в) двигатель превращает электрическую энергию в механическую энергию РМ;

г) частота вращения ротора n с полюсами N_p, S_p меньше частоты вращения n_0 полюсов статора S_c, N_c .



71. Двухполюсный ротор синхронного генератора вращается с частотой 3000 об/мин. Какова частота напряжения статора?

а) 50 Гц; б) 100 Гц; в) 500 Гц.

72. Какое число полюсов должно быть у синхронного генератора, имеющего частоту генерируемого тока $f = 50$ Гц, если его ротор вращается с частотой $n = 125$ об/мин?

а) 24 полюса; б) 36 полюсов; в) 48 полюсов.

73. Фазное напряжение однофазного синхронного генератора $U_\phi = 6300$ В, а фазный ток $I_\phi = 2,5$ А. Какова полезная мощность P_2 генератора, если сдвиг фаз между напряжением и током в нагрузке 0,8?

а) 12,6 кВт; б) 10,6 кВт; в) 14,6 кВт.

74. Каков КПД синхронного генератора, если суммарная мощность потерь ΔP составляет 8 % полезной мощности, отдаваемой им?

а) 0,9; б) 0,926; в) 0,95.

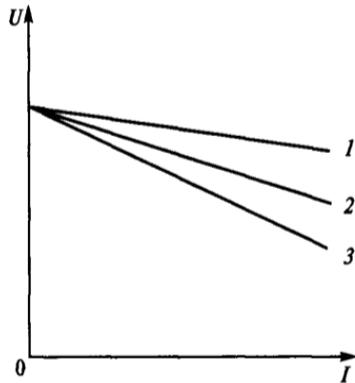
75. Каковы число пар полюсов p , вращающий момент $M_{\text{ном}}$ и ток $I_{\text{ном}}$ гидрогенератора Красноярской ГЭС, имеющего следующие паспортные данные: $P_{\text{ном}} = 500$ МВт, $U_{\text{ном}} = 15\,750$ В, $\cos\phi = 0,85$, $\eta = 98,2$ %, $n_{\text{ном}} = 93,8$ об/мин? (Укажите неправильный ответ.)

а) $p = 64$; б) $M_{\text{ном}} = 51 \cdot 10^6$ Н·м; в) $I_{\text{ном}} = 22$ кА.

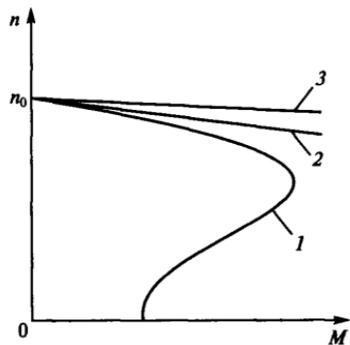
76. При выполнении каких приведенных условий зависимость $U = f(I)$ является внешней характеристикой синхронного генератора?

- а) $n = \text{const}$;
- б) $\cos\varphi = \text{const}$;
- в) $I_B = \text{const}$;
- г) всех ранее перечисленных условий.

77. Синхронный генератор работает на отдельную активно-индуктивную нагрузку. В каком соотношении находятся коэффициенты мощности потребителей, при которых генератор имеет внешние характеристики, приведенные на рисунке?



- а) $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_2 = \cos\varphi_3$;
- б) $\cos\varphi_1 > \cos\varphi_2 > \cos\varphi_3$;
- в) $\cos\varphi_1 < \cos\varphi_2 < \cos\varphi_3$.



78. Какая из показанных на рисунке характеристик (1, 2 или 3) является механической характеристикой синхронного двигателя?

- а) 1; б) 2; в) 3.

79. Почему синхронный двигатель без дополнительной пусковой обмотки на роторе (беличьей клетки) не развивает на валу начальный пусковой момент?

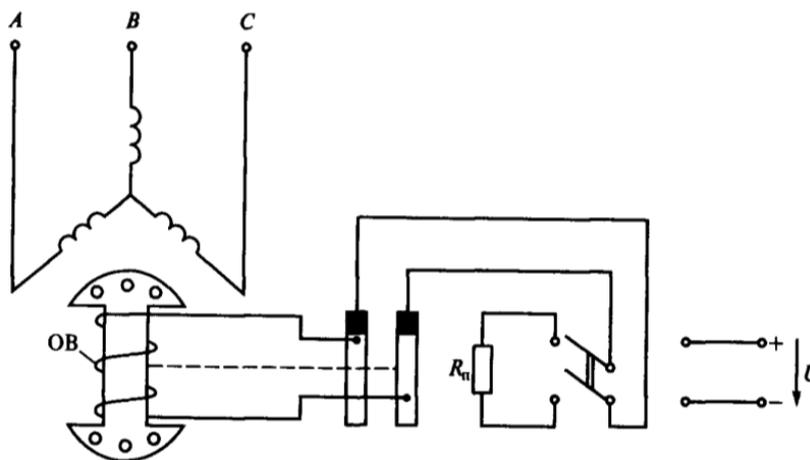
- а) между вращающимися полюсами статора и полюсами неподвижного ротора не возникает взаимодействия, а следовательно, момента;
- б) возникающий при взаимодействии полюсов статора и ротора момент пульсирует, и его среднее значение при неподвижном роторе равно нулю;
- в) в обмотке ротора индуцируется значительная ЭДС.

80. Чем отличается синхронный двигатель от асинхронного?

- а) устройством статора;
- б) устройством ротора;
- в) устройством статора и ротора.

81. На рисунке приведена одна из схем пуска синхронного двигателя. Для чего обмотка возбуждения (ОВ) в этой схеме на время пуска замыкается на резистор R_n ?

- а) для увеличения начального пускового момента;
- б) для увеличения максимального момента при пуске;
- в) для предотвращения пробоя изоляции ОВ.

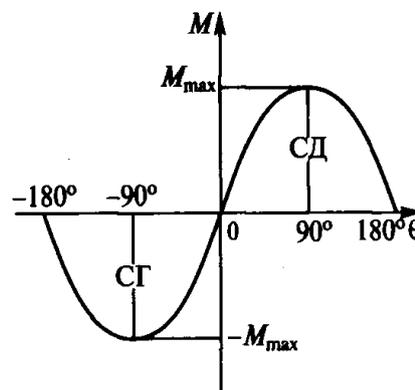


82. Как зависят максимальный момент M_{\max} и угол θ от тока возбуждения I_B при работе синхронного двигателя с номинальным моментом на валу?

- а) чем больше I_B , тем больше M_{\max} и меньше θ ;
- б) чем больше I_B , тем больше M_{\max} и θ ;
- в) чем больше I_B , тем меньше M_{\max} и больше θ ;
- г) чем больше I_B , тем меньше M_{\max} и θ .

83. На рисунке представлена угловая характеристика синхронной машины, работающей в режимах двигателя (СД) и генератора (СГ). При каких углах θ обеспечивается ее устойчивая работа? (Укажите неправильный ответ.)

- а) СД работает устойчиво при $0 < \theta < 90^\circ$;
- б) СГ работает устойчиво при $-90^\circ < \theta < 0$;
- в) устойчивая работа СД и СГ возможна при $-180^\circ < \theta < 180^\circ$.



84. Как можно регулировать скорость вращения синхронного двигателя?

- а) изменением напряжения на статоре;
- б) изменением тока возбуждения ротора;
- в) изменением частоты напряжения статора.

85. Как выполняют ротор в синхронном двигателе малой мощности (микродвигателя)? (*Укажите неправильный ответ.*)

- а) с электромагнитным возбуждением, если необходимы кольца и щетки;
- б) с ротором в виде постоянного магнита;
- в) с реактивным ротором, без обмотки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электрические машины – основные элементы электрических установок. Их используют в качестве источников (генераторов) электрической энергии; двигателей, чтобы приводить в движение самые разнообразные рабочие механизмы на заводах и фабриках; в сельском хозяйстве, на строительных работах и т. д.

Электрические машины, предназначенные для преобразования механической энергии в электрическую, называют генераторами; электрические машины, предназначенные для обратного преобразования (электрической энергии в механическую), называют двигателями.

Электрические машины применяют также для преобразования рода тока (например, переменного тока в постоянный), частоты и числа фаз переменного тока, постоянного тока одного напряжения в постоянный ток другого напряжения. Такие машины называют электромашинами преобразователями.

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основная литература

1. *Вольдек, А. И.* Электрические машины : учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений / А. И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Л. : Энергия, 1978. – 832 с.

2. *Брускин, Д. Э.* Электрические машины : учеб. для электротехн. специальностей вузов : в 2 ч. / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1987.

3. *Копылов, И. П.* Электрические машины : учеб. для вузов / И. П. Копылов. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.

4. *Кацман, М. М.* Электрические машины : учеб. для учащихся электротехн. специальностей техникумов / М. М. Кацман. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1990. – 463 с. – ISBN 5-06-000120-2.

5. *Читечян, В. И.* Электрические машины : сб. задач : учеб. пособие для специальности «Электромеханика» / В. И. Читечян. – М. : Высш. шк., 1988. – 231 с. – ISBN 5-06-001511-4.

6. Справочник по электрическим машинам : в 2 т. / под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – М. : Энергоатомиздат, 1988.

7. *Рябуха, В. И.* Электрические машины. Общие вопросы теории машин переменного тока : сб. задач с ответами / В. И. Рябуха. – СПб. : СЗПИ, 1994.

8. *Рябуха, В. И.* Электрические машины. Трансформаторы : сб. задач с ответами / В. И. Рябуха. – СПб. : СЗПИ, 1994.

9. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия [Электронный ресурс] : утв. и введ. Постановлением Гос. комитета СССР по стандартам от 24 сент. 1985 г. № 3005. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004970> (дата обращения: 20.06.2025).

10. ГОСТ 16264.1-85. Двигатели асинхронные. Общие технические условия [Электронный ресурс] : утв. и введ. Постановлением Гос. комитета СССР по стандартам от 28 янв. 1985 г. № 169. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004476> (дата обращения: 20.06.2025).

11. ГОСТ 16264.2-85. Двигатели синхронные. Общие технические условия [Электронный ресурс] : утв. и введ. Постановлением Гос. комитета СССР по стандартам от 28 янв. 1985 г. № 168. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012374> (дата обращения: 20.06.2025).

12. ГОСТ 4.171-85. Турбогенераторы, гидрогенераторы, синхронные компенсаторы и их системы возбуждения. Номенклатура показателей [Электронный ресурс] : утв. и введ. Постановлением Гос. комитета СССР по стандартам от 25 сент. 1985 г. № 3030. – URL: <https://gostassistant.ru/doc/33f0af67-a831-431f-b140-56c6f999a3bb> (дата обращения: 20.06.2025).

13. *Александров, Н. Н.* Электрические машины и микромашины / Н. Н. Александров. – М. : Колос, 1983. – 384 с.

14. *Кацман, М. М.* Электрический привод : учебник / М. М. Кацман. – 5-е изд., стер. – М. : Академия, 2013. – 389 с. – ISBN 978-5-7695-9524-0.

15. *Москаленко, В. В.* Системы автоматизированного управления электропривода : учебник / В. В. Москаленко. – М. : ИНФРА-М, 2007. – 210 с. – ISBN 978-5-16-001676-4.

16. *Акимова, Н. А.* Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования : учеб. пособие для студентов сред. профил. образования / Н. А. Акимова, Н. Ф. Котеленец, Н. И. Сентюрихин. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Академия, 2008. – 304 с. – ISBN 978-5-7695-4767-6.

17. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей : утв. приказом Минэнерго РФ от 13 янв. 2003 г. № 6. – Новосибирск : Сиб. университет. изд-во, 2007. – 252 с.

18. *Котеленец, Н. Ф.* Испытание, эксплуатация и ремонт электрических машин : учеб. для вузов / Н. Ф. Котеленец, Н. А. Акимова, М. В. Антонов. – М. : Академия, 2003. – 384 с. – ISBN 5-7695-1281-4.

19. *Кацман, М. М.* Справочник по электрическим машинам / М. М. Кацман. – М. : Академия, 2005. – 480 с. – ISBN: 5-7695-1686-0.

Дополнительная литература

1. *Беспалов, В. Я.* Электрические машины : учеб. пособие для студентов вузов / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. – М. : Академия, 2006. – 313 с. – ISBN 5-7695-2228-3.

2. *Сибикин, Ю. Д.* Техническое обслуживание, ремонт электрооборудования и сетей промышленных предприятий : учебник : в 2 кн. / Ю. Д. Сибикин. – М. : Академия, 2007. – ISBN 978-5-4468-1384-1.

3. *Сибикин, Ю. Д.* Монтаж, эксплуатация и ремонт электрооборудования промышленных предприятий : учеб. пособие для проф.

учеб. заведений / Ю. Д. Сибикин, М. Ю. Сибикин. – М. : Высш. шк., 2003. – 462 с. – ISBN 5-06-004084-4.

4. *Кацман, М. М.* Сборник задач по электрическим машинам : учеб. пособие для студентов учреждений сред. проф. образования / М. М. Кацман. – М. : Академия, 2003. – 160 с. – ISBN 5-7695-1118-4.

5. *Алиев, И. И.* Справочник по электротехнике и электрооборудованию : учеб. пособие для вузов / И. И. Алиев. – 2-е изд., доп. – М. : Высш. шк., 2000. – 255 с. – ISBN 5-06-003652-9.

6. *Браславский, И. Я.* Энергосберегающий асинхронный электропривод : учеб. пособие для вузов / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков ; под ред. И. Я. Браславского. – М. : Академия, 2004. – 249 с. – ISBN 5-7695-1704-2.

7. *Ильинский, Н. Ф.* Электропривод : энерго- и ресурсосбережение : учеб. пособие для студентов высших учеб. заведений, обучающихся по направлению подгот. дипломирован. специалистов 14.06.00 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» / Н. Ф. Ильинский, В. В. Москаленко. – М. : Академия, 2008. – 201 с. – ISBN 978-5-7695-2849-1.

8. *Колач, С. Т.* Бытовые холодильники и кондиционеры : учеб. пособие для студентов образоват. учреждений сред. проф. образования / С. Т. Колач. – М. : Академия, 2006. – 238 с. – ISBN 5-7695-2360-3.

9. *Москаленко, В. В.* Справочник электромонтера : справ. для учреждений начал. проф. образования / В. В. Москаленко. – 3-е изд., стер. – М. : Академия, 2007. – 287 с. – ISBN 5-7695-3594-6.

10. *Рожкова, Л. Д.* Электрооборудование электрических станций и подстанций : учеб. для студентов учреждений сред. проф. образования / Л. Д. Рожкова, Л. К. Карнеева, Т. В. Чиркова. – 10-е изд., стер. – М. : Академия, 2013. – 448 с. – ISBN 978-5-4468-0290-6.

11. *Макаров, Е. Ф.* Обслуживание и ремонт электрооборудования электростанций и сетей : учебник / Е. Ф. Макаров. – М. : Академия, 2003. – 442 с. – ISBN 5-8222-0143-1.

12. *Соколовский, Г. Г.* Электроприводы переменного тока с частотным регулированием : учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности 14.06.04 «Электропривод и автоматика пром. установок и технол. комплексов» направления подгот. 14.06.00 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» / Г. Г. Соколовский. – М. : Академия, 2006. – 264 с.

Учебное электронное издание

БАДАЛЯН Норайр Петикович

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Учебное пособие

Редактор Е. А. Платонова

Технический редактор Ш. Ш. Амирсейидов

Компьютерная верстка П. А. Некрасова, А. Н. Герасина

Корректор Н. В. Пустовойтова

Выпускающий редактор А. А. Амирсейидова

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10; Adobe Reader;
дисковод CD-ROM.

Тираж 9 экз.

Издательство Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.