

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра инженерной графики

В. М. Сурин, С. М. Боровиков, Н. В. Вышинский

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
УСТРОЙСТВА СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области
информатики и радиоэлектроники
для специальности 1-39 03 01 «Электронные системы безопасности»
в качестве учебно-методического пособия*

Минск БГУИР 2014

УДК 621.313(076)

ББК 31.26я73

С90

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок
и технологических комплексов

Белорусский национальный технический университет

(протокол №1 от 02.09.2013);

доцент кафедры полиграфического оборудования и обработки информации
учреждения образования «Белорусский государственный технологический
университет», кандидат технических наук, доцент В. П. Беляев

Сурин, В. М.

С90 Электромеханические и электромагнитные устройства систем безопасности :
учеб.-метод. пособие / В. М. Сурин, С. М. Боровиков, Н. В. Вышинский. –
Минск : БГУИР, 2014. – 136 с. : ил.
ISBN 978-985-543-005-7.

Излагаются физические основы преобразования электрического сигнала в механическое перемещение, электрической энергии в механическую работу и наоборот; основные электромеханические преобразователи энергии. Рассмотрены устройства, принцип работы, методы управления двигателей и микродвигателей постоянного тока, асинхронных, синхронных и шаговых исполнительных двигателей, электромагнитных исполнительных механизмов.

Предназначено для изучения студентами дисциплин «Теоретическая электромеханика» и «Исполнительные устройства систем безопасности».

УДК 621.313(076)

ББК 31.26я73

ISBN 978-985-543-005-7

© Сурин В. М., Боровиков С. М., Вышинский Н. В., 2014

© УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники», 2014

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ | 5 |
| 1.1. Основные характеристики механических составляющих электромеханических устройств | 5 |
| 1.2. Основные характеристики электрических составляющих электромеханических устройств | 7 |
| 1.3. Основные характеристики магнитного поля | 9 |
| 1.4. Намагничивание и циклическое перемагничивание ферромагнитных материалов | 14 |
| 1.5. Понятие об электромагнитной силе. Закон Ампера. Правило левой руки | 18 |
| 1.6. Явление электромагнитной индукции | 19 |
| 1.7. Преобразование механической энергии в электрическую | 22 |
| 1.8. Понятие о собственной индуктивности и самоиндукции | 23 |
| 1.9. Взаимоиндукция и вихревые токи | 24 |
| 2. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА | 26 |
| 2.1. Общие сведения об электрических машинах | 26 |
| 2.2. Устройство, принцип работы двигателей постоянного тока | 28 |
| 2.3. Пуск, регулирование скорости и реверс двигателей постоянного тока | 29 |
| 2.4. Понятие о механических характеристиках электродвигателей | 32 |
| 2.5. Схемы включения обмоток возбуждения двигателей постоянного тока | 34 |
| 2.6. Исполнительные микродвигатели постоянного тока | 37 |
| 3. СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА | 40 |
| 3.1. Однофазный переменный ток и его параметры | 40 |
| 3.2. Трехфазная система переменного тока | 45 |
| 4. ТРАНСФОРМАТОРЫ | 50 |
| 4.1. Назначение и принцип действия трансформаторов | 50 |
| 4.2. Режимы работы трансформатора | 52 |
| 4.3. Трехфазные трансформаторы | 54 |
| 4.4. Измерительные трансформаторы | 56 |
| 5. ДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА | 57 |
| 5.1. Устройство и принцип работы асинхронных трехфазных двигателей | 57 |
| 5.2. Вращающееся магнитное поле трехфазного тока | 61 |
| 5.3. Вращающий момент асинхронного двигателя | 63 |
| 5.4. Механическая характеристика асинхронного двигателя | 67 |
| 5.5. Управление асинхронными трехфазными двигателями | 69 |
| 5.6. Однофазные асинхронные двигатели | 73 |
| 5.7. Асинхронные исполнительные двигатели | 77 |
| 5.8. Синхронные двигатели | 81 |

| | |
|--|------------|
| 5.9. Синхронные микродвигатели..... | 83 |
| 5.10. Шаговые двигатели | 85 |
| 6. ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ | 89 |
| 6.1. Типы электроприводов и режимы их работы | 89 |
| 6.2. Коэффициент полезного действия приводов..... | 92 |
| 6.3. Выбор типа и мощности электродвигателя для электромехани- ческого привода..... | 93 |
| 6.4. Динамическая модель привода..... | 95 |
| 6.5. Приведение сил, действующих на звенья привода и инерционных свойств звеньев к начальному звену | 96 |
| 6.6. Определение времени переходных режимов электромеханического привода..... | 98 |
| 6.7. Проверка выбранного электродвигателя по нагреву | 101 |
| 7. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МИКРОМАШИНЫ..... | 103 |
| 7.1. Тахогенераторы..... | 104 |
| 7.2. Вращающиеся трансформаторы..... | 107 |
| 7.3. Сельсины..... | 110 |
| 8. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ..... | 113 |
| 8.1. Элементы электромагнитных устройств..... | 113 |
| 8.2. Классификация электромагнитных исполнительных механизмов | 116 |
| 8.3. Расчет магнитной цепи электромагнитного механизма | 119 |
| 8.4. Механическая и тяговая характеристика электромагнита | 120 |
| 8.5. Тяговое усилие электромагнита постоянного тока..... | 121 |
| 8.6. Расчет электромагнита постоянного тока | 124 |
| 8.7. Тяговое усилие электромагнитов переменного тока | 126 |
| 8.8. Классификация контактных устройств | 129 |
| 8.9. Физические явления в контактных парах | 130 |
| 8.10.Магнитоуправляемые контакты..... | 133 |
| ЛИТЕРАТУРА..... | 136 |

ВВЕДЕНИЕ

Для облегчения труда и повышения его производительности применяют различные машины, т. е. устройства для преобразования и обработки энергии, информации, материалов. Их можно классифицировать по виду подводимой энергии, принципу работы, по функциональному назначению и другим признакам.

Широкое распространение в качестве машин и их составляющих получили различные электромеханические устройства (ЭМУ). Они представляют собой преобразователи электрической энергии в механическую, электрического сигнала в механическое перемещение или наоборот, механической энергии в электрическую, механического перемещения в электрический сигнал, т. е. процесс преобразования энергии в этих устройствах может быть обратимым.

Повсеместное использование ЭМУ связано с наличием, простым подводом и управлением, в том числе дистанционным, электрического тока. Преобразование электрической энергии в механическую происходит с помощью электродвигателей и электромагнитных механизмов. Преобразование механической энергии в ЭМУ используют не только для преобразования в электрическую энергию с помощью генераторов, но и для получения информации о положении, перемещении, скорости контролируемых объектов технических систем при их управлении и защите от перегрузок.

Возможности преобразования электрической энергии в механическую и наоборот позволили разработать простые по конструкции и надежные в эксплуатации двигатели различной мощности с вращательным и поступательным перемещением подвижной части; разнообразные устройства контроля, управления и защиты технических систем от перегрузок.

Цель и задача дисциплины – познакомить с принципами преобразования энергии в электромеханических устройствах и типовыми видами этих устройств.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

1.1. Основные характеристики механических составляющих электромеханических устройств

В любом ЭМУ можно выделить механическую, электрическую и электромагнитную составляющие. Совершаемая работа пропорциональна затраченной и преобразованной энергии. Следует уметь соизмерять работу и энергию составляющих ЭМУ.

Работа, выполненная в том или ином процессе, измеряется количеством энергии, преобразованной в данном процессе из одной формы в другую.

Энергия – способность тела или системы тел совершать работу. Существующие виды энергии могут быть подразделены на механическую, электромагнитную и внутреннюю (тепловую, химическую, атомную) энергии. Одни виды энергии могут превращаться в другие виды в полном соответствии с зако-

ном сохранения энергии, по которому энергия не создается из ничего и не уничтожается, а лишь превращается из одной формы в другую.

При рассмотрении принципа и результатов действия механических составляющих ЭМУ имеют дело с единицами перемещений, массы и времени, а также с производными от них единицами.

Перемещение линейное l задается в метрах (м), угловое φ – в радианах (рад). Метр приблизительно равен 1/40000000 доле длины земного меридиана.

Радиан равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу.

Массу можно рассматривать как количество материи, т. е. меру количества вещества, способного создавать поле тяготения, и как величину заключенной в теле инертности, вследствие которой тело стремится сохранить свое состояние и противодействовать всякому его изменению. **Масса m измеряется в килограммах (кг).** Килограмм равен массе международного прототипа килограмма.

Если при поступательном движении звеньев мерой инертности является масса в кг, то для звеньев, совершающих вращательное движение, инертность определяется моментом инерции. **Момент инерции J звена**, совершающего вращательное движение вокруг оси, равен сумме произведений элементарных масс m_i звена и квадратов их расстояний r_i до оси вращения, т. е. $J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$ (кг м²), он учитывает распределение масс в звене. Для звеньев типа диска, зубчатого колеса, вала диаметром $2 \cdot r$ момент инерции относительно оси симметрии равен $J = 0,5 Mr^2$, где M – масса всего звена.

Время t задают в секундах (с). **Секунда** приблизительно равна 1/86 400 средних солнечных суток.

Единицей линейной скорости V служит метр в секунду (м/с), равный скорости равномерно движущегося тела, проходящего в секунду путь, равный одному метру ($V = \Delta l / \Delta t$ (м/с)). **Единицей угловой скорости ω при вращательном движении служит радиан в секунду (рад/с)**, при котором радиус-вектор любой точки равномерно вращаемого тела описывает в течение одной секунды центральный угол, равный одному радиану, т. е. $\omega = \Delta \varphi / \Delta t$ (рад/с) или (с⁻¹). Иногда **угловую скорость выражают в оборотах за минуту (об/мин)**, равную числу оборотов n равномерно вращаемого тела в течение одной минуты ($n = 30\omega / \pi$ (об/мин)).

Единица линейного ускорения a – метр в секунду за секунду (м/с²) – есть ускорение равноускоренного движения, при котором скорость тела возрастает за секунду на 1 м/с ($a = \Delta v / \Delta t$ (м/с²)). **Единица углового ускорения ε – радиан в секунду за секунду (рад/с²)** – есть ускорение равноускоренного вращательного движения, при котором угловая скорость тела возрастает за секунду на 1 рад/с ($\varepsilon = \Delta \omega / \Delta t$ (рад/с² или с⁻²)).

Мерой механического взаимодействия тел, способного изменить их кинематическое состояние, является сила. **Единица силы F названа ньютоном (Н)** и равна силе, под действием которой тело массой 1 кг получает ускорение в

1м/с^2 ($F = m \cdot (H)$), т. е. $1\text{ Н} = 1\text{ кг}\cdot\text{м/с}^2$). Вращательное движение тел связано с действием момента силы относительно оси вращения. **Единицей момента силы (вращательного момента T) является ньютон-метр (Нм)**, равный произведению силы в 1 Н на кратчайшее расстояние в 1 м от линии действия силы до оси вращения ($T = F \cdot \ell$ (Н·м)).

Работа (энергия) измеряется в джоулях (Дж). При поступательном движении звена джоуль равен работе A , которую совершает постоянная сила в 1 Н на пути в 1 м , пройденным звеном под действием этой силы в направлении ее действия ($A = F \cdot \ell$; т. е. $1\text{ Дж} = 1\text{ Н}\cdot\text{м}$). При вращательном движении звена джоуль равен работе A , которую совершает постоянный вращательный момент T в $1\text{ Н}\cdot\text{м}$ при повороте звена на угол φ в 1 рад . Под действием этого момента ($A = T \cdot \varphi$; т. е. $1\text{ Дж} = 1\text{ Н}\cdot\text{м}$).

Работа, совершенная в единицу времени, называется **мощностью**. Измеряется мощность P в ваттах (Вт) ($P = \Delta A / \Delta t$; т. е. $1\text{ Вт} = 1\text{ Дж/с}$). Ватт равен мощности, при которой за 1 с совершается работа в 1 Дж . При поступательном движении звена механическую мощность можно выразить как $P = F \cdot v$, т. е. $1\text{ Вт} = 1\text{ Н}\cdot\text{м/с}$. При вращательном движении звена механическую мощность можно выразить как $P = T \cdot \omega$, т. е. $1\text{ Вт} = 1\text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{рад/с}$ или $1\text{ Вт} = 1\text{ Н}\cdot\text{м/с}$.

1.2. Основные характеристики электрических составляющих электромеханических устройств

Получение, передача и распределение энергии в ЭМУ, преобразование ее в другие виды связано с явлением электрического тока. Эти преобразования происходят в электрических цепях – замкнутых контурах, включающих устройства для получения, передачи, преобразования и использования электрической энергии.

Неотъемлемыми свойствами элементарных частиц являются масса и заряд. Установлено два вида элементарных зарядов. Заряды одного вида отталкиваются друг от друга, а заряды разных видов притягиваются.

Под зарядом понимают частицу или тело, которые обладают способностью к электромагнитному взаимодействию, т. е. носителей заряда. Носителем электромагнитного отрицательного заряда является электрон, а положительно – протон. Они равны по модулю и составляют $1.6 \cdot 10^{-19}$ кулонов (Кл), при этом масса протона в 1843 раза больше массы электрона. Заряд электрона – фундаментальная физическая постоянная. Дробных зарядов нет, заряд любой частицы кратен элементарному заряду или равен нулю. Заряд макроскопических тел равен алгебраической сумме электрических зарядов элементарных частиц, входящих в состав тела. Если число протонов и электронов одинаково, то тело электрически нейтрально, и его заряд равен нулю. Процесс, в результате которого на телах или на разных частях тела появляется нескомпенсированный заряд, называют **электризацией**. Электризация происходит за счет перераспределения между телами электронов. На теле с отрицательным зарядом – избыток электронов, на теле с положительным зарядом – их недостаток по сравнению с

количеством протонов. Электрический ток возможен только в проводниках, т. е. в материалах со свободными заряженными частицами. В металлах и полупроводниках носителями зарядов являются электроны (электронный газ), в растворах и газах – ионы, в диэлектриках свободных заряженных частиц нет.

При отсутствии электрического поля свободные носители электрических зарядов совершают беспорядочное тепловое движение, при этом количество электричества через любое поперечное сечение равно нулю. В общем случае постоянный ток в проводящей среде представляет собой упорядоченное движение положительных и отрицательных зарядов под действием электрического поля.

При замыкании электрической цепи заряды, находящиеся на полюсах источника тока, взаимодействуют со свободными зарядами проводника и создают по всей длине проводника электрическое поле, которое является причиной упорядоченного движения электрических зарядов. Благодаря электромагнитному характеру взаимодействия зарядов, процесс установления электрического поля происходит вдоль поверхности проводника со скоростью, немного меньшей скорости света.

При наличии электрического поля, созданного источником тока, заряженные частицы движутся в направлении сил электрического поля. За направление тока принято направление движения положительных частиц, т. е. направление, противоположное движению электронов. Прохождение электрического тока в металлах и полупроводниках обусловлено движением электронов и не вызывает изменений химического состава материала.

Для количественной оценки тока служит величина «сила тока», которая численно равна количеству электричества, проходящего через поперечное сечение проводника в единицу времени. **За единицу силы тока в системе СИ принят Ампер (А).** 1 А – сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным бесконечно длинным проводникам ничтожно малого поперечного круглого сечения, находящимся в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, вызывает между ними силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Количество электричества измеряется в кулонах (Кл). 1 Кл равен количеству электричества, проходящего через поперечное сечение проводника при токе в 1 А за 1 секунду ($q = I \cdot t$ (Кл)); т. е. 1 Кл = 1 А·с; 1 Кл = $6.3 \cdot 10^{18}$ зарядов электрона).

Перемещения зарядов по цепи сопровождается затратой энергии. Источник тока в электрической цепи должен иметь достаточный запас энергии для того, чтобы за ее счет выполнялась работа по перемещению свободных электрических зарядов в цепи. Преобразование иных видов энергии в электрическую происходит в источнике с помощью сторонних, не электростатических (кулоновских) сил, которые производят разделение и перенос положительных зарядов в направлении роста энергии (потенциала).

Для количественной оценки энергетических преобразований в источнике тока служит величина «электродвижущая сила» (ЭДС). Она численно равна работе, которую совершают сторонние силы при перемещении единичного положительного заряда внутри источника или сам источник, проводя единичный положительный заряд q по замкнутой цепи. ЭДС измеряется в вольтах (В). ЭДС E равна 1 В, если при перемещении заряда в 1 Кл по замкнутой цепи совершается работа в 1 Дж, ($E = A/q$ (В)) т. е. $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$.

Величину, численно равную работе, которую совершает источник, проводя единичный положительный заряд по данному участку цепи, называют напряжением U , т. е. $U = A/q$.

Измеряют напряжения на различных участках только при замкнутой цепи. ЭДС измеряют между зажимами источника при разомкнутой цепи. Единицей измерения напряжения является вольт (В). Напряжение равно 1 В, если при перемещении заряда в 1 Кл на участке цепи совершается работа в 1 Дж, т.е. $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$.

Работа электричества на любом участке цепи равна $A = U \cdot q = U \cdot I \cdot t$ (Дж), т. е. $1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot \text{Кл} = 1 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}$. Мощность электричества на любом участке цепи равна $P = \Delta A / \Delta t = U \cdot I$ (Вт), т. е. $1 \text{ Вт} = 1 \text{ В} \cdot \text{А}$.

Для существования электрического тока в материале необходимо, чтобы материал был проводником, т. е. имел свободные заряды и в нем существовало электрическое поле, а проводник должен быть частью замкнутой электрической цепи, в которой есть источник тока с достаточным запасом энергии (ЭДС).

1.3. Основные характеристики магнитного поля

Магнетизм – свойство тел притягивать и удерживать частицы железа. Пространство, в котором обнаруживается действие сил на магнитную стрелку, называют магнитным полем.

О природных магнитах и их свойствах было известно, что вокруг магнита существует поле, которое действует на железные предметы и посредством которого магниты взаимодействуют между собой. Не было установлено связи между магнетизмом и электричеством. А. Ампер в 1820 году обнаружил, что если токи в двух прямолинейных параллельных проводниках имеют одинаковое направление, то проводники притягиваются, если же направления токов противоположны, то проводники отталкиваются. Взаимодействие проводников осуществляется посредством силового поля, которое появляется только при движении зарядов. Так как это поле оказывает ориентирующее воздействие на магнитную стрелку (установлено Х. Эрстедом), его называют магнитным.

Магнитное поле является силовым и изображается силовыми линиями, вдоль которых действуют магнитные силы. Касательные к силовым линиям совпадают с ориентацией магнитных стрелок, внесенных в поле. Условно за положительное направление магнитного поля принимают направление северного конца магнитной стрелки.

Представление о магнитном поле можно получить, насыпав на горизонтальный картонный лист, продетый насквозь проводником с током, стальные опилки. Стальные опилки будут располагаться по магнитным линиям – concentрическим окружностям, имеющим центр в точке пересечения проводником картонного листа. По густоте опилок, т. е. магнитных линий, судят о магнитном поле в данном месте.

Основной характеристикой поля, определяющей силу, действующую на проводник с током, помещенный в поле, является магнитная индукция B . Ее направление совпадает с направлением силовых линий поля. При этом собственное поле проводника должно быть малым по сравнению с исследуемым полем.

А. Ампер установил, что на прямолинейный проводник длиной ℓ , по которому течет ток I , в магнитном поле действует сила F , пропорциональная длине проводника, силе тока и относительному расположению проводника к магнитным силовым линиям. Эта сила максимальна F_{\max} при перпендикулярном расположении проводника к силовым линиям поля. Магнитная индукция B определяется как

$$B = F_{\max} / (I\ell). \quad (1.1)$$

На проводник в виде рамки с током, помещенный в магнитное поле, действует вращательный момент T , пропорциональный силе тока I , площади S рамки, относительному расположению рамки к силовым линиям поля и не зависящий от формы рамки. Максимальный вращательный момент T_{\max} действует на рамку, когда плоскость рамки перпендикулярна направлению силовых линий поля, т. е. магнитную индукцию можно определить как

$$B = T_{\max} / (IS). \quad (1.2)$$

Магнитная индукция измеряется в теслах (Тл). 1 Тл – индукция такого магнитного поля, в котором на проводник длиной 1 м, по которому течет ток 1 А, действует максимальная сила в 1 Н, или на замкнутый контур площадью 1 м², по которому течет ток в 1 А, действует максимальный вращательный момент в 1 Нм, т. е. 1 Тл = 1Н/(А·м).

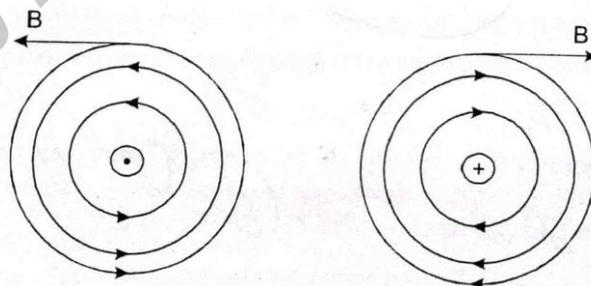


Рис. 1.1

Направление магнитных силовых линий, создаваемых током, определяют с помощью правила буравчика, которое формулируется следующим образом: **если поступательное движение правого буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление линий магнитной индукции сов-**

падает с направлением вращательного движения его рукоятки. Например, линии индукции поля прямого тока представляют систему охватывающих проводник concentрических окружностей (рис. 1.1), а направление северного конца магнитной стрелки, подвешенной на нити вблизи проводника с током, совпадает с указанными стрелками направлениями.

Важнейшей особенностью линий магнитной индукции является их замкнутость, а это отражает тот факт, что в природе в отличие от электростатического поля нет магнитных зарядов.

Элементом электрической цепи, способным накапливать энергию в виде энергии магнитного поля, является соленоид, т. е. элемент в виде катушки с намотанными витками, когда последовательно соединенные кольцевые проводники расположены так, что оси их совпадают. Направление магнитной индукции в соленоиде определяют по правилу буравчика. Если вращать рукоятку буравчика по направлению тока в катушке, то сам буравчик будет двигаться по направлению магнитной индукции B (рис. 1.2). Установлено, что магнитная индукция катушки зависит от числа витков w обмотки и силы тока I в ней. Чем больше ток и чем большее число витков обмотки, тем больше магнитная индукция, т. е. $B \propto I \cdot w$.

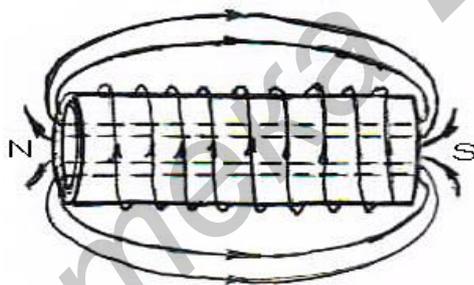


Рис. 1.2

Величина магнитной индукции сильно зависит от среды, в которой создано магнитное поле. Если в вакууме существует магнитное поле с индукцией B_0 , то при заполнении некоторой средой результирующее поле или ослабляется или усиливается.

Величина, показывающая, во сколько раз магнитная индукция B поля больше или меньше индукции B_0 внешнего магнитного поля, называется относительной магнитной проницаемостью μ ($\mu = B/B_0$). Это безразмерная величина, которая характеризует магнитные свойства материала, его способность намагничиваться под действием внешнего поля. Для вакуума $\mu = 1$, у диамагнетиков $\mu \leq 1,0$, у парамагнетиков $\mu \geq 1,0$. Среди парамагнетиков резко выделяется группа материалов, вызывающих большое усиление внешнего поля. Их называют ферромагнетики, ими являются железо, никель, кобальт и их соединения и сплавы. Величина μ у ферромагнетиков достигает 10^2 – 10^5 . Ферромагнетиками являются некоторые редкоземельные металлы (гадолиний, тербий и др.). Магнитную проницаемость физических тел принято сравнивать также с

магнитной проницаемостью вакуума, которую называют магнитной постоянной и обозначают μ_0 где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Чтобы определить абсолютную магнитную проницаемость μ_a какого-либо материала, вначале находят по таблице его относительную магнитную проницаемость μ , которую умножают на магнитную постоянную μ_0 , т. е. $\mu_a = \mu \cdot \mu_0$.

Любой источник магнитного поля характеризуется магнитодвижущей (МДС) или намагничивающей силой F_m . Для прямолинейных проводников это сила тока I , для катушек величина МДС определяется произведением силы тока I в витке на число витков w , т. е.

$$F_m = Iw \quad (A). \quad (1.3)$$

Единицей измерения МДС является ампер. МДС в магнитной цепи аналогична ЭДС источника в электрической цепи. Намагничивающая сила действует в созданном ею магнитном поле вдоль линий магнитной индукции.

Для связи электрических и магнитных характеристик используют **напряженность магнитного поля H** – векторную величину, которая не зависит от свойств среды и определяется только токами, создающими магнитное поле. Направление напряженности H и магнитной индукции B для изотропных сред совпадает. Под **напряженностью магнитного поля** можно понимать долю намагничивающей (магнитодвижущей) силы, приходящейся на единицу длины линий магнитной индукции,

$$H = F_m / \ell \quad (A/m). \quad (1.4)$$

Единицей напряженности H магнитного поля является ампер на метр $|H| = A/m$. Для прямолинейного проводника с силой тока I магнитное поле имеет вид концентрических окружностей (рис. 1.1) и вследствие симметрии напряженность поля во всех точках, равноудаленных на расстояние r от оси проводника, одинакова и равна $H = I/2\pi r (A/m)$.

Для характеристики катушки как элемента электромагнитного устройства не требуется знать распределение магнитной индукции в окружающем катушку пространстве. Во всех точках внутри соленоида индукция магнитного поля направлена вдоль его оси и имеет одно и то же численное значение, т. е. магнитное поле внутри соленоида является однородным. Графически однородное поле изображают параллельными линиями с одинаковой плотностью. Считая магнитное поле внутри катушки длиной ℓ однородным, напряженность поля определяют по формуле

$$H = F_m / \ell = Iw / \ell (A/m). \quad (1.5)$$

Магнитная индукция связана с напряженностью следующим соотношением:

для любой среды $B = \mu_a H$; или для вакуума

$$B_0 = \mu_0 H. \quad (1.6)$$

Соответственно величина магнитной индукции соленоида длиной ℓ с числом витков w , по которым протекает ток силой I при наличии сердечника, с учетом зависимостей (1.5) и (1.6) равна

$$B = \mu_a \cdot H = \mu \cdot \mu_0 Iw / \ell (Тл), \quad (1.7)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость материала сердечника катушки.

Магнитная индукция B характеризует магнитное поле в конкретной точке. Чтобы охарактеризовать магнитное поле во всех точках пространства, ограниченного некоторым замкнутым проводящим контуром, вводится величина, называемая **магнитным потоком Φ** , или потоком магнитной индукции, пронизывающим ограниченную контуром поверхность.

Магнитным потоком Φ , проходящим через поверхность S (рис. 1.3), называется величина, равная произведению модуля индукции B поля и площади проекции данной поверхности на плоскость, перпендикулярную линиям индукции поля, или с учетом равенства углов α произведению BS на косинус угла между направлением индукции и нормалью к данной площади т. е.

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (1.8)$$

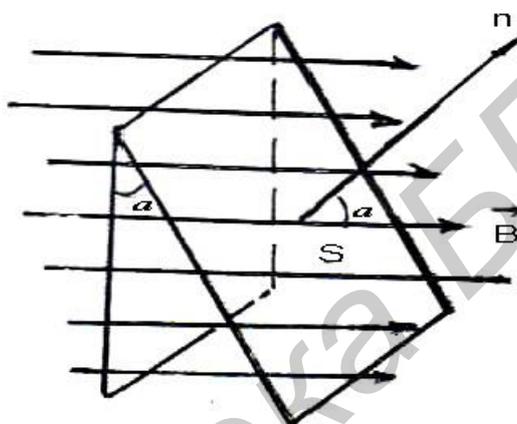


Рис. 1.3

Поток максимален, если площадка перпендикулярна линиям магнитной индукции, и равен нулю, если площадь параллельна линиям индукции.

За единицу магнитного потока Φ в системе Си принимают вебер (Вб). 1 Вб – магнитный поток с индукцией 1 Тл через площадку 1 м^2 , расположенную перпендикулярно направлению силовых линий поля. Изменить магнитный поток, пронизывающий проводящий контур, можно, изменяя индукцию магнитного поля, в котором находится контур, площадь этого контура, или ориентацию контура относительно силовых линий.

Магнитный поток, пронизывающий один виток намагниченной катушки длиной ℓ , равен $\Phi = BS = \mu\mu_0 I w S / \ell$, где S – площадь поперечного сечения соленоида, μ – относительная магнитная проницаемость материала сердечника соленоида. Полный магнитный поток катушки (соленоида) с числом витков w , т. е. потокосцепление Ψ магнитного потока со всеми витками w соленоида равно

$$\Psi = w\Phi = \mu\mu_0 w^2 IS / \ell (\text{Вб}). \quad (1.9)$$

Магнитный поток определяется формулой $\Phi = BS$ или с учетом зависимости (1.4) в виде

$$\Phi = \mu_a H \cdot S = \frac{F_M}{l / (\mu_a S)}. \quad (1.10)$$

Выражение, стоящее в знаменателе формулы (1.10), называется магнитным сопротивлением:

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 S} \left(\frac{A}{B_0} \right). \quad (1.11)$$

Совокупность тел, предназначенных для сосредоточения магнитного поля в определенной части пространства, называют магнитной цепью. Она включает источник магнитодвижущей силы, в ней образуется магнитный поток и вдоль нее замыкаются линии магнитной индукции. Магнитная цепь содержит магнитопровод, выполненный из ферромагнитных материалов и воздушных зазоров. Магнитное сопротивление прямо пропорционально длине магнитопровода, обратно пропорциональна площади поперечного сечения S магнитопровода и зависит от магнитной проницаемости его материала, т. е. аналогично сопротивлению проводника в электрической цепи. Формулу (1.10) магнитного потока можно записать в виде

$$\Phi = \frac{F_M}{R_m} \quad (1.12)$$

и считать, что она выражает закон Ома для магнитной цепи, аналогично закону Ома для электрической цепи.

По аналогии магнитный поток Φ соответствует силе тока I , магнитодвижущая сила F_M соответствует электродвижущей силе, а магнитное сопротивление магнитной цепи – электрическому сопротивлению проводника. Магнитный поток в магнитопроводе прямо пропорционален магнитодвижущей силе и обратно пропорционален магнитному сопротивлению магнитной цепи. Анализ зависимости (1.11) показывает, что воздушные зазоры магнитной цепи обладают большим магнитным сопротивлением.

1.4. Намагничивание и циклическое перемангничивание ферромагнитных материалов

Все вещества в природе являются магнетиками, т. е. они обладают определенными магнитными свойствами и определенным образом взаимодействуют с внешним магнитным полем. Одни ослабляют внешнее поле, их называют диамагнетиками, другие – усиливают, их называют парамагнетиками. Внутреннее магнитное поле парамагнетика совпадает по направлению с внешним магнитным полем, а внутреннее магнитное поле диамагнетика противоположно направлению внешнего поля. Подавляющее большинство материалов – диамагнетики (медь, свинец, серебро, золото, углерод, сера и др.). Парамагнетиками являются магний, марганец, кальций, алюминий, платина, азот, кислород и др. Внешне диамагнетики отличаются тем, что выталкиваются из неоднородного магнитного поля, а парамагнетики – втягиваются.

Магнитная проницаемость диамагнетиков и парамагнетиков мало отличается от единицы, они являются слабомагнитными материалами. Например, у одного из самых сильных диамагнетиков – висмута $\mu = 0,999824$, у наиболее сильных парамагнетиков, например, платины $\mu = 1,00036$.

Среди парамагнетиков резко выделяется группа материалов, вызывающих большое усиление внешнего поля, их называют ферромагнетиками. Ферромагнетиками являются железо, никель, кобальт и их сплавы (пермаллой – сплавы железа и никеля). Ферромагнитные материалы имеют области самопроизвольного намагничивания (домены) размерами $10^{-4} \dots 10^{-6}$ м. Магнитное состояние таких областей характеризуется векторами намагниченности, которые для разных областей ориентированы случайным образом, беспорядочно, поэтому и результирующая намагниченность тела при отсутствии внешнего магнитного поля равна нулю. Если ферромагнитное тело поместить во внешнее магнитное поле, то под его воздействием произойдут изменения, в результате которых векторы намагниченности доменов будут ориентированы в направлении внешнего поля. Чем больше индукция внешнего поля, тем сильнее эта ориентация, тем сильнее намагничивается ферромагнетик. Индукция результирующего магнитного поля будет определяться индукцией внешнего поля и индукцией отдельных доменов.

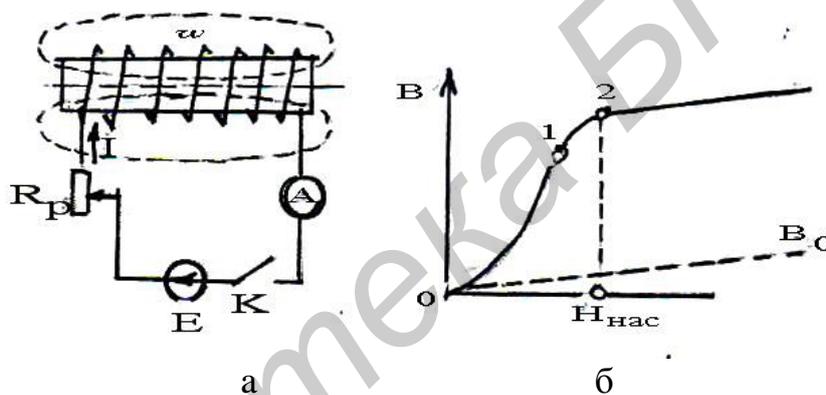


Рис. 1.4

Магнитное состояние ферромагнетика характеризуется **кривой намагничивания**, т. е. зависимостью индукции B магнитного поля от напряженности (тока).

Рассмотрим процесс намагничивания ферромагнитного сердечника, помещенного в катушку с током (рис. 1.4, а). Предположим сначала, что сердечник в катушке отсутствует. Тогда при увеличении тока в катушке магнитная индукция меняется по линейному закону, т. к. $B_0 = \mu_0 H = \mu_0 I w / \ell$.

Пусть соленоид имеет сердечник из ферромагнитного материала, который в исходном состоянии размагничен. Магнитные свойства материала зависят не только от напряженности поля, температуры, наличия или отсутствия механических напряжений, но и от предшествующего магнитного состояния. В качестве исходного принимают размагниченное состояние образца, при котором в отсутствии внешнего поля индукция равна нулю. Наилучшего размагничивания можно достичь, нагрев материал выше точки Кюри с последующим охлаждением при отсутствии внешнего поля. В технике этот метод применяют очень редко. Чаще образец размагничивают, воздействуя на него переменным полем с

использованием специальных измерительных устройств. По мере увеличения тока в соленоиде магнитная индукция быстро возрастает (участок $\beta \dots 1$ кривой намагничивания (рис. 1.4, б). Это объясняется ориентацией векторов намагниченности доменов ферромагнитного сердечника. Затем интенсивность ориентации замедляется (участок $1 \dots 2$ кривой намагничивания). Точка 2 соответствует магнитному насыщению, т. е. при некотором значении напряженности $H_{\text{нас}}$ поля, все домены ориентированы, и при дальнейшем увеличении тока в катушке индукция поля растет так же, как она росла бы при отсутствии сердечника.

Если через катушку пропустить ток, меняющий величину и направление, то сердечник будет перемагничиваться. Рассмотрим этот процесс (рис. 1.5). При увеличении тока в катушке магнитная индукция возрастает до индукции насыщения B_M (точка b).

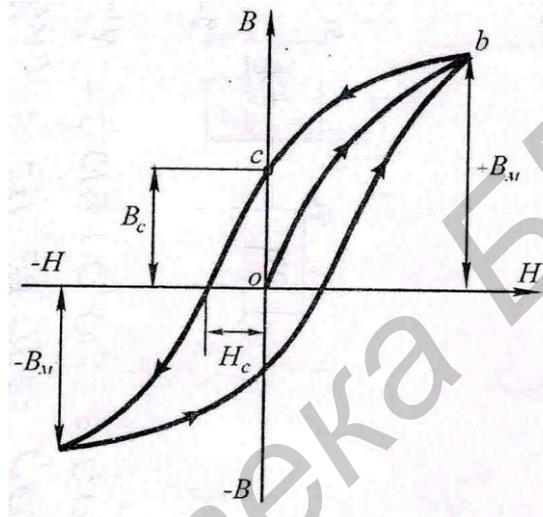


Рис. 1.5

При уменьшении тока магнитная индукция снижается, но так, что при тех же значениях напряженности H она оказывается больше значений магнитной индукции, соответствующих увеличению тока. Это объясняется тем, что часть доменов еще сохраняет свою ориентацию и при уменьшении тока до нуля размагничивания не произойдет, индукция B_c магнитного поля при отсутствии тока будет больше нуля и называется она остаточной намагниченностью. Чтобы ферромагнетик полностью размагнитить, нужно изменить направление тока на противоположное и постепенно увеличивать его. При некоторой величине напряженности H_c ферромагнетик окажется полностью размагниченым. Величину H_c называют коэрцитивной силой.

Остаточная индукция B_c представляет собой индукцию, которая остается в предварительно намагниченом до насыщения материале после снятия внешнего поля.

Коэрцитивная сила H_c представляет собой напряженность поля, которую необходимо приложить к предварительно намагниченому до насыщения материалу, чтобы получить индукцию, равную нулю.

При дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля, направленного противоположно первоначальному, вновь будет достигнуто состояние насыщения – B_m . Если теперь уменьшить ток, направленный противоположно первоначальному до нуля, а затем, изменив еще раз его направление, т. е. сделав прежним, увеличивать вновь, то на графике $B = f(H)$ получим замкнутую кривую, которая называется **петлей гистерезиса (запаздывания)**. Причинами гистерезиса могут быть необратимые процессы смещения границ доменов. Участок *ob* (рис. 1.5) характеристики намагничивания называют **основной кривой намагничивания**. Процесс перемагничивания связан с затратами энергии из-за внутреннего трения доменов друг о друга при изменении их ориентации и сопровождается выделением теплоты. Площадь петли гистерезиса характеризует затраты энергии в течение одного цикла перемагничивания. Если ферромагнетик поместить в магнитное поле, создаваемое переменным током, то он будет циклически перемагничиваться с частотой переменного тока. Основными характеристиками петли гистерезиса являются остаточная индукция B_c , коэрцитивная сила H_c и площадь петли, характеризующая потери на гистерезис за один цикл перемагничивания.

Величина коэрцитивной силы H_c зависит от свойств ферромагнетика. Ферромагнетики с малой коэрцитивной силой H_c называют **магнитомягкими**, они имеют узкую петлю гистерезиса, это материалы с $H_c < 4000$ А/м. Их применяют в статорах и роторах электродвигателей и генераторов тока, для изготовления сердечников трансформаторов. Ферромагнетики с большой коэрцитивной силой ($H_c > 4000$ А/м) имеют широкую петлю гистерезиса. Их называют **магнитотвердыми**, они перемагничиваются с трудом. Термины «магнитомягкий» и «магнитотвердый» не относятся к характеристике механических свойств материала.

Сравнивая петли гистерезиса обеих групп материалов, можно отметить, что для них форма петли, индукция насыщения B_m и остаточная индукция B_c примерно одинаковы, а разница в коэрцитивной силе достигает очень большой величины. Так для промышленных магнитных материалов наименьшая $H_c \approx 0,4$ А/м, а для магнитотвердых – наибольшая $H_c \approx 800$ кА/м, т. е. магнитомягкие материалы имеют узкую петлю гистерезиса с небольшой коэрцитивной силой, а магнитотвердые – широкую петлю с большой коэрцитивной силой.

Магнитомягкие материалы могут намагничиваться до насыщения даже в слабых полях. У них большая магнитная проницаемость и малые потери на перемагничивание. Это технически чистое железо с содержанием углерода до 0,04 %, электротехнические кремнистые стали ($Si \leq 4,8$ %) и пермаллой – сплавы железа с никелем (45 Н; 50 Н) и железа с никелем и кобальтом.

Магнитотвердые материалы применяют для изготовления постоянных магнитов, для записи информации. Это сплавы Fe – Ni – Al, легированные медью и кобальтом.

При определенной температуре, называемой точкой Кюри, ферромагнетики теряют свои магнитные свойства и выше ее приобретают парамагнитное состояние. Для железа точка Кюри равна 770 °С, для никеля – 360 °С.

1.5. Понятие об электромагнитной силе. Закон Ампера. Правило левой руки

Действие магнитного поля на находящийся в нем прямолинейный проводник с током экспериментально исследовал А. Ампер. Он установил, что если по металлическому проводнику, помещенному в магнитное поле, протекает электрический ток I , то на него действует сила, и если проводник может свободно двигаться, то под действием этой электромагнитной силы $F_{эм}$, проводник будет двигаться. Ампер установил, что модуль силы, с которой магнитное поле действует на проводник с током, можно рассчитать по формуле

$$F_{эм} = B\ell I \sin \alpha,$$

где B – индукция магнитного поля, ℓ – длина проводника в магнитном поле, I – сила тока, α – угол между направлением вектора магнитной индукции B и направлением тока I в проводнике. Позже эта сила была названа силой Ампера, а сама формула – законом Ампера. Направление силы Ампера определяется по правилу левой руки. Если ладонь левой руки повернуть так, чтобы четыре вытянутых пальца совпали с направлением тока, а линии магнитной индукции поля входили в ладонь, то отставленный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник (рис. 1.6).

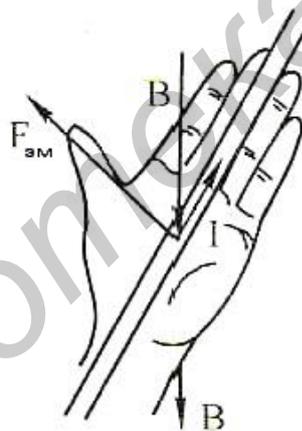


Рис. 1.6

У большинства электрических машин и аппаратов проводники расположены практически перпендикулярно направлению вектора магнитной индукции B и электромагнитная сила $F_{эм}$ будет максимальна, т. е.

$$F_{эм} = B\ell I. \quad (1.13)$$

При перемещении проводника с током I длиной ℓ на расстояние h в однородном магнитном поле с индукцией B совершается работа $A = F_{эм} \cdot h$. Возникшая при равномерном движении проводника электромагнитная сила $F_{эм}$ равна преодолеваемой внешней силе F_c сопротивления, т. е. $F_{эм} = F_c$. Тогда выражение $F_c \cdot h$ можно представить как механическую работу по преодолению внешних сил F_c сопротивления. Машины, преобразующие энергию электрического

тока в механическую, работают в режиме электродвигателей. Рассмотрим схему работы двигателей постоянного тока.

Если в качестве проводника поместить в магнитное поле один виток обмотки якоря, т. е. рамку с током (рис. 1.7), то на нее в соответствии с законом Ампера будут действовать две равные параллельные и противоположно направленные силы $F_{эм}$, т. е. пара сил, создающая вращательный момент T . Концы этого витка соединены с простейшим коллектором в виде двух изолированных друг от друга полуколец, к которым с помощью щеток Щ₁ и Щ₂ подводится напряжение от сети постоянного тока.

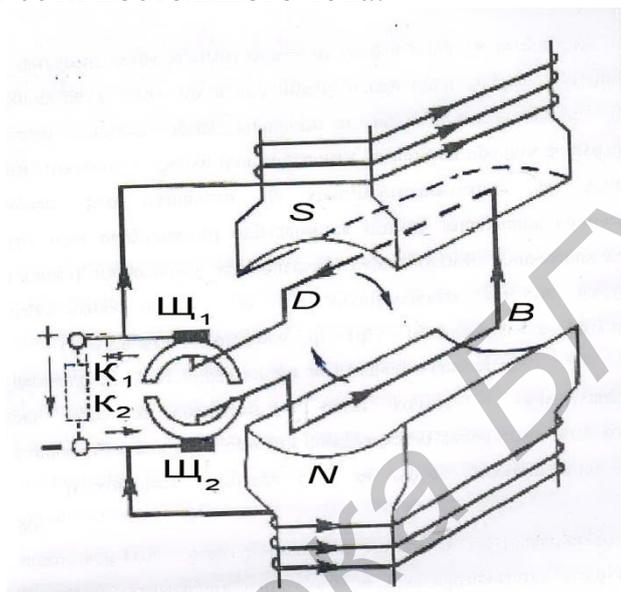


Рис. 1.7

Если рамка имеет геометрическую ось вращения в виде вала, изолированного от витка и полуколец, то под действием пары сил виток начинает поворачиваться и поворачивает полукольца коллектора. Когда плоскость витка оказывается перпендикулярной линиям магнитной индукции, вращающий момент обращается в нуль. Однако это положение виток проскакивает по инерции и с этого момента каждое из полуколец, повернувшись вместе с рамкой, начинает соприкасаться уже с другой щеткой. В результате направление тока в обмотке изменяется на противоположное при сохранении неизменным направление вращательного момента.

1.6. Явление электромагнитной индукции

Так как электрический ток создает в пространстве вокруг проводника с током магнитное поле, то очевидно, что и магнитное поле может при определенных условиях создавать электрический ток.

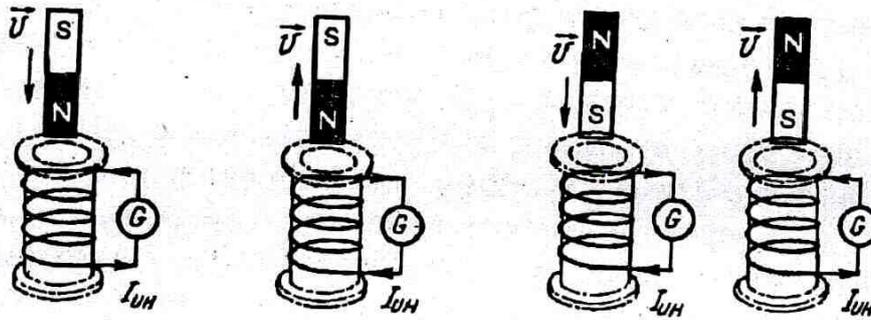


Рис. 1.8

В 1831 г. Фарадей провел серию опытов и экспериментально установил (рис. 1.8), что при движении постоянного магнита относительно катушки, которая была подключена к гальванометру, в катушке возникал ток, т. е. стрелка гальванометра отклонялась. Направление тока изменялось при изменении направления движения магнита. Это же явление наблюдалось, если магнит был неподвижен, а двигалась катушка.

Ток в цепи возникал только при изменении магнитного потока, который пронизывал витки катушки, подключенной к гальванометру, причем направления тока при увеличении и уменьшении магнитного потока были разными. Известно, что для существования тока в замкнутой электрической цепи должен быть источник ЭДС. В опытах Фарадея источником появления ЭДС являлось переменное магнитное поле. Эту ЭДС называют электродвижущей силой индукции. Если цепь замкнута, ЭДС индукции создает индукционный ток, т. е. катодный ток является вторичным эффектом. При движении проводника в магнитном поле или при изменении магнитного потока, пронизывающего проводник, в последнем наводится (индуцируется) ЭДС. Если этот проводник замкнут, в нем возникает электрический ток.

Явление возникновения ЭДС в контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего его, называют электромагнитной индукцией. Электрические токи, возникающие в проводниках под действием изменяющихся магнитных полей, в которых находятся эти проводники, называются индукционными, а причина, вызывающая появление индукционных токов, – электродвижущей силой индукции.

ЭДС индукции равна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего ограниченную проводником поверхность, т. е.

$$E = - \Delta\Phi/\Delta t . \quad (1.14)$$

ЭДС индукции возникает не только в неподвижном проводящем контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур, но и при движении проводника в постоянном магнитном поле (рис. 1.9). Установлено, что величина ЭДС индукции, возникающей в проводнике, движущемся в магнитном поле, прямо пропорциональна индукции B магнитного поля, длине ℓ активной части проводника, т. е. части, которая находится в магнитном поле, скорости движения v проводника и синусу угла между направлением магнитной индукции поля и направлением движения проводника.

$$E = B\ell v \sin \alpha, \quad (1.15)$$

где α – угол между направлением индукции магнитного поля и скоростью движения проводника.

Для определения направления индуцированной ЭДС в проводнике, движущемся в магнитном поле, служит правило правой руки (рис. 1.9).

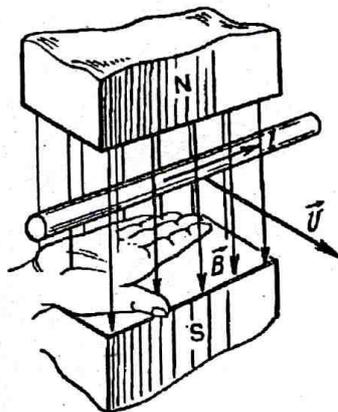


Рис. 1.9

Если ладонь правой руки повернуть навстречу и перпендикулярно магнитному потоку, а вытянутый большой палец отставить по направлению движения проводника, то концы остальных четырех пальцев укажут направление индуцированной ЭДС.

Максимальное значение индуцированной ЭДС при $\alpha = 90^\circ$ равно $E = B\ell v$. Несмотря на разные причины возникновения ЭДС индукции в неподвижном контуре, находящемся в изменяющемся магнитном поле, и в проводнике, движущемся в постоянном магнитном поле, зависимости $E = -\Delta\Phi/\Delta t$ и $E = B\ell v$ являются эквивалентными. Скорость движения проводника можно представить как $v = \Delta h/\Delta t$, где Δh – перемещение проводника за время Δt . Тогда выражение $\Delta h\ell$ можно представить как площадь ΔS магнитного потока, пересекаемого проводником; произведение $B \cdot \Delta S$ равно изменению магнитного потока $\Delta\Phi$, пересекаемого проводником за время Δt , т. е. $E = B\ell v = B\ell\Delta h/\Delta t = B\Delta S/\Delta t = \Delta\Phi/\Delta t$. Причиной возникновения ЭДС индукции в неподвижном контуре, находящемся в изменяющемся магнитном поле, и в проводнике, движущемся в постоянном магнитном поле, является изменение магнитного потока, пронизывающего проводник, т. е. $E = -\Delta\Phi/\Delta t$, при этом не важно, чем вызвано изменение магнитного потока.

Исследовав явление электромагнитной индукции, русский физик Ленц в 1833 г. сформулировал правило определения направления индуцированной ЭДС, или индукционного тока. Индуцированная в контуре ЭДС и индукционный ток при изменении магнитного потока контура всегда имеют такое направление, при котором они препятствуют причине их возникновения, т. е. препятствуют изменению магнитного потока. Отрицательный знак в выражении (1.14)

свидетельствует о том, что ЭДС, индуцированная в контуре, стремится вызвать токи, препятствующие изменению магнитного потока; т. е. при возрастании магнитного потока индукционный ток создает магнитное поле, направленное против внешнего поля; если же магнитный поток уменьшается, то индукционный ток создает магнитное поле одинакового направления с внешним, т. е. стремится сохранить внешнее магнитное поле.

1.7. Преобразование механической энергии в электрическую

Пусть в магнитном поле с индукцией B проводник длиной ℓ перемещается под действием внешней силы F со скоростью v . Тогда в соответствии с явлением электромагнитной индукции в проводнике возникает ЭДС индукции

$$E = B\ell v, \quad (1.16)$$

под действием которой в цепи появляется ток I . В соответствии с законом Ома для всей цепи можно записать

$$E = IR + IR_n, \quad (1.17)$$

где R , R_n – соответственно сопротивление нагрузки и проводников цепи.

Очевидно, на проводник с током I , находящийся в магнитном поле, начинает действовать электромагнитная сила $F_{\text{эм}} = BI\ell$, а в сопротивлениях нагрузки и проводников расходуется энергия. Умножив уравнение (1.17) на I , получим $EI = I^2R + I^2R_n$ или с учетом (1.16)

$$B\ell vI = I^2R + I^2R_n. \quad (1.18)$$

При неизменной скорости проводника внешняя сила F , перемещающая проводник, равна электромагнитной силе, т. е. $B\ell I = F_{\text{эм}} = F$. Тогда выражение (1.18), можно представить как

$$Fv = I^2R + I^2R_n, \quad (1.19)$$

где Fv – мощность приложенных к проводнику внешних сил, т. е. $P_{\text{мех}}$; I^2R – электрическая мощность, потребляемая нагрузкой, т. е. $P_{\text{эн}}$; I^2R_n – электрическая мощность потерь в проводниках цепи, т. е. $P_{\text{эл}}$,

а выражение (1.19) представим как преобразование видов энергии

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{эн}} + P_{\text{эл}}. \quad (1.20)$$

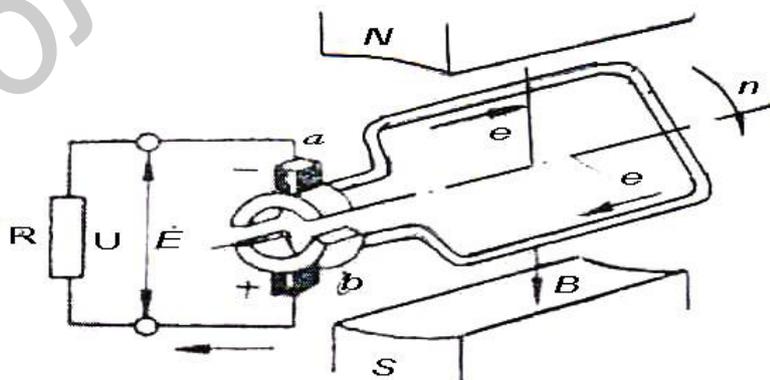


Рис. 1.10

Преобразование механической энергии при перемещении проводника в магнитном поле в электрическую энергию используется в машинах – электрических генераторах. Рассмотрим принципиальную схему генераторов постоянного тока (рис. 1.10). В магнитном поле, создаваемом полюсами N и S , вращается один виток обмотки якоря. Концы витка соединены с простейшим коллектором в виде двух изолированных друг от друга полуколец, к которым прилегают щетки, соединенные с нагрузкой.

Если виток вращается с постоянной скоростью в однородном магнитном поле, то в нем будет наводиться переменная ЭДС и переменный ток. Нагрузка R через щетки присоединена к полукольцам, которые осуществляют преобразование переменного тока в витке в пульсирующий постоянный ток внешней цепи генератора путем переключения контакта полукольца с одной щетки на другую в момент прохождения витком горизонтального положения.

1.8. Понятие о собственной индуктивности и самоиндукции

Известно, что магнитный поток пропорционален магнитной индукции (1.8), а она пропорциональна току (1.7), т. е. магнитный поток пропорционален току. **Коэффициент пропорциональности между магнитным потоком Φ и током I называется индуктивностью L контура, т. е.**

$$\Phi = LI. \quad (1.21)$$

Потокосцепление соленоида, как и сумма потоков всех его витков $\Psi = w\Phi$, пропорционально возбуждающему его току, т. е.

$$\Psi = LI, \quad (1.22)$$

где L – индуктивность катушки.

Индуктивность зависит от размеров, формы, числа витков контура с током и магнитных свойств среды, в которой находится контур. Если размеры, форма соленоида и магнитные свойства среды не меняются, то $L = \text{const}$. Тогда индуктивность цилиндрической однослойной катушки (соленоида)

$$L = \mu_a w^2 S / \ell, \quad (1.23)$$

где w – число витков; S – площадь поперечного сечения соленоида; ℓ – длина соленоида; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость материала сердечника соленоида.

Для катушек индуктивность сильно возрастает с числом витков, при наличии стального сердечника индуктивность катушки больше, чем без сердечника, и возрастает с увеличением магнитной проницаемости сердечника. Для цилиндрической катушки без ферромагнитного сердечника она равна

$$L = \mu_0 w^2 S / \ell.$$

За единицу индуктивности в системе СИ принят генри (Гн). 1 Гн – индуктивность контура, на который при силе тока в контуре 1 А действует магнитный поток в 1 Вб.

Так как индуктивность в генри – значительная величина, то на практике пользуются производными величинами, миллигенри ($1 \text{ мГн} = 10^{-3} \text{ Гн}$), микрогенри ($1 \text{ мкГн} = 10^{-6} \text{ Гн}$).

Если в контуре течет переменный ток, то в этом контуре за счет создаваемого переменного магнитного потока возникает ЭДС индукции, которая мо-

жет возникать и за счет изменения индуктивности контура. Обычно индуктивность контура постоянна, и магнитный поток может меняться только за счет изменения силы тока.

Явление возникновения ЭДС в электрической цепи при изменении силы собственного тока называется самоиндукцией, а возникающая ЭДС называется ЭДС самоиндукции. Для соленоида

$$E = -\Delta\Psi/\Delta t = -w\Delta\Phi/\Delta t = -L\Delta I/\Delta t, \quad (1.24)$$

ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна скорости изменения тока, а собственная индуктивность или коэффициент самоиндукции L характеризует способность проводника возбуждать ЭДС самоиндукции при изменении силы тока в нем. Из выражения (1.24) следует, что индуктивность в 1 Гн представляет собой индуктивность такой цепи, в которой при равномерном изменении тока на 1 А/с возникает ЭДС самоиндукции в 1 В. ЭДС и ток самоиндукции всегда направлены противоположно причине их возникновения, т. е. при уменьшении собственного тока ток самоиндукции совпадает по направлению с основным током, при увеличении основного тока ток самоиндукции направлен против основного тока. Индуктивность является аналогом массы, так как **чем больше индуктивность, тем труднее изменить из-за самоиндукции силу основного тока в контуре.** Поэтому при замыкании цепи с элементом типа «соленоид» сила тока в результате самоиндукции достигает максимального значения не сразу, а постепенно нарастая. При размыкании цепи возникает индукционный ток и им совершается работа за счет исчезнувшего магнитного поля, проявляющаяся в виде нагрева проводников, искры на контактах. Особенно важно значение индуктивности в цепях переменного тока, в которых вследствие непрерывного изменения тока при значительной величине индуктивности постоянно возникает ЭДС самоиндукции, оказывающая в большинстве случаев неблагоприятное влияние.

1.9. Взаимоиндукция и вихревые токи

Если два проводника расположены поблизости один от другого, и в одном из них протекает изменяющийся по величине ток, то в другом проводнике появится индуктированная ЭДС. **Явление возникновения ЭДС в катушке под действием изменения силы тока в соседней катушке, расположенной рядом, называется взаимной индукцией, а возникающая ЭДС называется ЭДС взаимной индукции.**

Взаимоиндукция двух катушек зависит от размеров, формы, числа витков и взаимного расположения катушек, а также от магнитной проницаемости среды.

ЭДС взаимной индукции E_2 во второй катушке от изменения силы тока I_1 в первой и наоборот – будут соответственно равны

$$E_2 = -M\Delta I_1/\Delta t \quad \text{или} \quad E_1 = -M\Delta I_2/\Delta t, \quad (1.25)$$

где M – коэффициент **взаимной индуктивности**, который, как и коэффициент индуктивности L , измеряется в генри (Гн). Взаимной индуктивностью M в 1 Гн

обладают две цепи в том случае, если в одной из них возникает ЭДС в 1 В при равномерном изменении тока в 1 А в секунду в другой цепи.

Как видно из формулы (1.25), ЭДС взаимной индукции пропорциональна взаимной индуктивности катушек и скорости изменения тока.

Существует следующая зависимость между взаимной индуктивностью двух катушек и их индуктивностями:

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}, \quad (1.26)$$

k – коэффициент магнитной связи, зависящий от взаимного расположения катушек ($k = 0 \dots 1$), и практически он всегда меньше единицы из-за магнитных потоков рассеяния, при которых часть линий магнитной индукции первой катушки не образует магнитной связи со второй катушкой и наоборот. Явление взаимной индукции используется для трансформации электроэнергии в цепях переменного тока различных электрических аппаратов и приборов.

Индукционные токи возникают не только в изолированных проводниках, но и в металлических массах при изменении пронизывающего их магнитного потока. Их называют вихревыми токами (токами Фуко). Возникновение ЭДС индукции обусловлено созданием индукционного электрического поля, источником которого является изменяющееся магнитное поле. Источниками электрического поля могут быть или электрические заряды, или переменные магнитные поля. В первом случае линии вектора напряженности электрического поля начинаются и заканчиваются на зарядах, а во втором – они оказываются замкнутыми сами на себя. Линии напряженности индукционного электрического поля замкнуты, поэтому его называют вихревым, а токи называют вихревыми токами. Вихревое электрическое поле возникает в любой точке пространства, если в этой точке имеется изменяющееся магнитное поле. Энергия, расходуемая на создание возникающих вихревых токов, переходит в тепло, оказывает размагничивающее действие на магнитоприводы, увеличивает общие потери энергии, снижает коэффициент полезного действия установки.

Потери на вихревые токи зависят не только от магнитных, но также от электрических свойств материала (удельного электрического сопротивления) и формы сердечника. Для листового образца **удельные потери** на вихревые токи в Вт/кг определяют из выражения

$$P_v = 1,64d^2 f^2 B_{\max}^2 / (\gamma \rho), \quad (1.27)$$

где B_{\max} – амплитуда магнитной индукции Тл; f – частота переменного тока, Гц; d – толщина листа, м; γ – плотность, кг/м³; ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м.

При малых ρ с повышением частоты перематывания могут недопустимо возрасти потери на перематывание за счет вихревых токов. С целью уменьшения потерь от вихревых токов сердечники роторов электродвигателей, трансформаторов и других устройств выполняют из специальных сортов электротехнической стали с добавками кремния, имеющей повышенное удельное электросопротивление, и их выполняют не сплошными, а набранными из тонких листов (толщиной 0,2 – 0,8 мм), изолированных друг от друга лаком, мика-

нитом, промасленной бумагой, при этом плоскость пластин сердечников должна быть параллельна направлению магнитного потока. Чтобы уменьшить вихревые токи в проводах, их изготавливают в виде жгута из отдельных жил, изолированных друг от друга. Металлические ферромагнитные материалы применяют в диапазоне частот до нескольких десятков килогерц. На повышенных и высоких частотах (до сотен мегагерц) используют ферриты, удельное электрическое сопротивление которых в миллиарды раз превышает сопротивление металлических ферромагнетиков. Свойства ферритов в постоянных и низкочастотных магнитных полях ниже свойств металлических магнитных материалов.

Полные потери при перемагничивании ферромагнитных тел равны сумме потерь на вихревые токи и гистерезис.

2. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Общие сведения об электрических машинах

Принцип действия любой электрической машины основан на двух законах: законе или явлении электромагнитной индукции и законе взаимодействия проводника с током с магнитным полем.

Механическое вращение проводника в магнитном поле приводит к индуцированию в нем переменной ЭДС, направление которой определяется по правилу правой руки. Подключение к такому витку внешней цепи обуславливает появление в ней тока, т. е. происходит преобразование механической энергии вращения в электрическую энергию выхода, что используется в генераторах. Их устанавливают на электрических станциях и различных транспортных средствах, где они приводятся в действие от двигателей внутреннего сгорания. Генераторы используются в качестве источников питания в устройствах автоматики, измерительной технике, установках связи и т. п.

Если проводник с током, выполненный в виде рамки, поместить в магнитное поле, на него будет действовать вращающий момент, что используется в двигателях. Двигатели создают механический вращающий момент T на валу, который используется для привода различных технологических и транспортных машин. В современных системах автоматического управления их используют в качестве исполнительных, регулирующих и программирующих устройств.

Электрические машины обратимы, т. е. одна и та же машина может работать и как генератор, и как двигатель. Следует учитывать назначение машины, так как генератор и двигатель отличаются расчетными и конструктивными особенностями. Поэтому использование двигателя в качестве генератора или генератора в качестве двигателя приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик машин, снижению КПД.

Электрические машины небольшой мощности – до 600 Вт – называют микромашинами. В зависимости от назначения электрические машины подразделяют на следующие группы:

– **силовые двигатели**, приводящие во вращение различные механизмы технических устройств, приборов и т. п.;

– **управляемые (исполнительные) микродвигатели**, преобразующие подводимый к ним электрический сигнал в требуемое механическое перемещение вала, т. е. отработывающие определенные команды.

Кроме вышеназванных машин, широко используются в автоматических устройствах **информационные микромашины**, к которым относят:

– тахогенераторы, преобразующие механическое вращение вала в электрический сигнал – напряжение, пропорциональное скорости вращения вала;

– поворотные или вращающиеся трансформаторы, дающие на выходе напряжение, пропорциональное той или иной функции угла поворота ротора, например, синусу или косинусу этого угла или самому углу;

– машины синхронной связи (сельсины, магнесины), осуществляющие синхронный и синфазный поворот или вращение нескольких механически не связанных между собой валов.

По роду тока электрические машины делят на машины постоянного и переменного тока. Электрические машины постоянного тока находят широкое применение в разных областях техники. Основное достоинство двигателей постоянного тока – возможность плавного регулирования частоты вращения и получения больших пусковых моментов. Их применяют в качестве тяговых на электротранспорте, в авто- и авиатранспорте, в системах автоматического регулирования, где они используются не только для привода исполнительных механизмов, но и как датчики частоты вращения подвижных частей регулируемой системы.

Генераторы постоянного тока используют в системах электропитания специального (радиотехнического) оборудования, для зарядки аккумуляторов, для питания электролитических ванн, в качестве основных источников питания на транспортных установках (автомобилях, самолетах, пассажирских вагонах, тепловозах).

В системах автоматического управления машины постоянного тока широко используют в качестве исполнительных двигателей и тахогенераторов.

Электрические машины должны иметь высокую надежность работы, хорошие энергетические показатели, минимальные габаритные и установочные размеры, массу и стоимость; они должны быть простыми по конструкции, не сложными в изготовлении и удобными в обслуживании и эксплуатации.

Электрические микромашины должны дополнительно обеспечивать: высокую точность преобразования входного сигнала в выходной, например, скорость вращения в выходное напряжение в тахогенераторах или управляющее напряжение в скорость вращения в исполнительных двигателях; высокое быстродействие; широкий диапазон регулирования; стабильность выходных характеристик при изменении условий эксплуатации, например, температуры окружающей среды; линейность характеристик при изменении управляющего сигнала и нагрузок.

Общие недостатки машин постоянного тока – их конструктивная и эксплуатационная сложность, связанная с подводом электрической энергии к вра-

шающейся части машин, необходимость предварительного преобразования переменного тока в постоянный.

2.2. Устройство, принцип работы двигателей постоянного тока

Подвижную (вращающуюся) часть двигателя называют ротором, неподвижную – статором. Часть, в которой индуцируется ЭДС, принято называть якорем, а часть, в которой создается магнитное поле возбуждения – индуктором. В двигателях постоянного тока статор служит индуктором, а ротор – якорем.

Статор машин постоянного тока является основой конструкции. Он выполняет две функции: во-первых, является магнитопроводом, по которому проходит магнитный поток возбуждения; и во-вторых, является основной конструктивной деталью, в которой размещаются и к которой крепятся остальные детали. Статор изготавливают из стали.

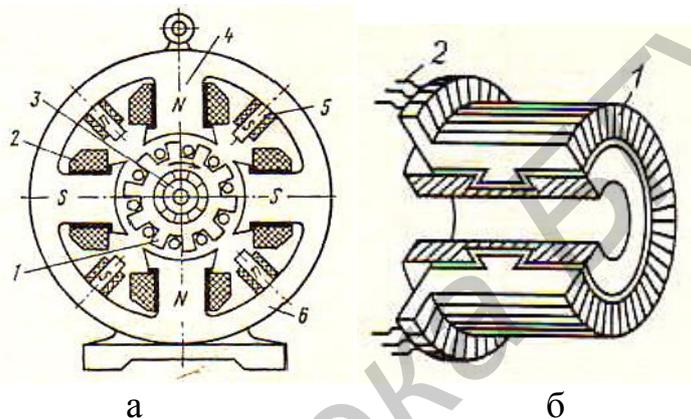


Рис. 2.1

Поперечный разрез четырехполюсного двигателя постоянного тока представлен на рис. 2.1, а. Изнутри к статору б для возбуждения магнитного потока крепятся главные магнитные полюсы 4. Полюс состоит из сердечника, полюсного наконечника и проводников катушки 2. При прохождении по катушкам постоянного тока в полюсах индуцируется магнитный поток возбуждения.

Состоят полюса из листов электротехнической стали толщиной 0,2 – 0,8 мм, между которыми для уменьшения потерь на вихревые токи наносится изоляция в виде лака или миканита. В двигателях небольшой мощности магнитное поле на статоре может создаваться постоянными магнитами. Между полюсным наконечником и ротором (якорем) имеется воздушный зазор, исключающий трение якоря о статор. Магнитная индукция в воздушном зазоре постоянна вдоль поверхности якоря.

Подвижная часть двигателя состоит: из **зубчатого сердечника** 1, представляющего цилиндр, набранный из изолированных друг от друга пластин из электротехнической стали; **обмотки**, уложенной в продольных пазах сердечника и насаженного на вал 3 полого цилиндра – **коллектора** (рис. 2.1, б), собранного из клинообразных медных пластин (ламель) 1, изолированных миканитом 2 друг от друга и от вала 3. Пластины коллектора проводниками соединены с витками обмотки якоря. Вращающаяся обмотка соединяется с внешней элек-

трической сетью скользящим контактом между коллектором и щетками, которые служат для подвода тока. Щетки к коллектору прижимаются плоскими или винтовыми пружинами, ток к щеткам подводится гибким кабелем.

Машины постоянного тока обычно имеют принудительное воздушное охлаждение с помощью вентилятора, расположенного на валу якоря.

Электрические цепи якоря и обмотки возбуждения магнитного потока присоединены к источнику электрической энергии. Если обмотку якоря и катушек главных полюсов подключить к сети, то в соответствии с законом Ампера на проводники обмотки якоря, находящиеся в магнитном поле возбуждения, действуют электромагнитные силы. Эти силы создают вращающий момент якоря, который используют для привода различных машин.

Витки обмотки якоря при его вращении периодически замыкаются накоротко щетками, причем ток $I_{\text{я}}$ в витках меняет свое направление на противоположное. Это явление, называемое коммутацией, может сопровождаться сильным искрением под щетками, особенно при больших токах. В момент коммутации в короткозамкнутой секции обмотки под влиянием собственного магнитного поля наводится ЭДС самоиндукции. Она вызывает дополнительный ток, который создает неравномерное распределение плотности тока по контактной поверхности щеток, что и является основной причиной искрения коллектора под щеткой. Для улучшения работы коллектора и получения безыскровой коммутации к статору между главными полюсами в двигателях с мощностью свыше 1 кВт крепятся дополнительные полюсы 5 меньших по сравнению с главными полюсами размеров, катушки которых включены последовательно с обмоткой якоря.

Мощность, потребляемая двигателем, равна

$$P_{\text{эл}} = U \cdot I_{\text{я}} \text{ (Вт)}, \quad (2.1)$$

где U – напряжение подводимой сети, измеряемое в В; $I_{\text{я}}$ – ток в витках якоря, измеряемый в А.

Мощность на валу электродвигателя в ваттах определяют по формуле

$$P = T \cdot \omega = T \cdot \pi n / 30, \text{ Вт}, \quad (2.2)$$

где T – вращательный момент якоря измеряемый в Н·м; ω – угловая скорость якоря измеряемая в рад/с или n – угловая скорость, измеряемая в оборотах/мин.

2.3. Пуск, регулирование скорости и реверс двигателей постоянного тока

Схематически двигатель можно представить в виде, изображенном на рис. 2.2.

Для двигателей постоянного тока могут быть применены три способа пуска: прямой, при котором обмотка якоря подключается непосредственно к сети; реостатный, при котором в цепь якоря включается реостат для ограничения тока; путем плавного повышения напряжения, которое подается на обмотку якоря.

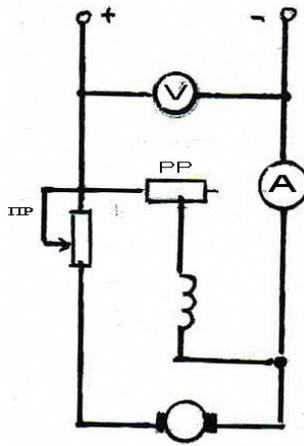


Рис. 2.2

Как отмечалось ранее, принцип работы двигателя основан на взаимодействии проводников обмотки якоря с постоянным магнитным полем электромагнитов статора. При включении в сеть с напряжением U в обмотках якоря с сопротивлением $R_{\text{я}}$ установится пусковой ток $I_{\text{п}}$, который вследствие малости сопротивления якоря будет очень большим, превышая номинальную величину в 8 ... 10 раз. От такого тока могут пострадать не только обмотка якоря, но также коллектор и щетки. По этой причине **прямой пуск применяют для двигателей малой мощности** (до нескольких сотен Вт), в которых сопротивление обмотки якоря относительно велико. При прямом пуске таких двигателей $I_{\text{п}} = (4 - 6)I_{\text{ном}}$.

Наибольшее распространение получил реостатный пуск. Пусковой ток можно ограничить путем последовательного включения в цепь якоря пускового реостата ПР. В этом случае пусковой ток равен

$$I_{\text{п}} = U / (R_{\text{я}} + R_{\text{п}}), \quad (2.3)$$

где $R_{\text{п}}$ – сопротивление пускового реостата, которое подбирают таким, чтобы пусковой ток не превышал номинальный более чем в 1,2...1,5 раза. При реостатном пуске возникают значительные потери энергии в пусковом реостате. Этот недостаток можно устранить, если пуск двигателя осуществлять путем плавного повышения напряжения, подаваемого на его обмотку. Но для этого необходимо иметь отдельный источник постоянного тока с регулируемым напряжением (генератор или управляемый выпрямитель).

Якорь в результате взаимодействия его обмотки с током $I_{\text{я}}$ с магнитным полем главных магнитных полюсов начнет вращаться. В результате движения проводников якоря относительно магнитного поля в них будет индуцироваться ЭДС, которая будет направлена против приложенного к цепи якоря напряжения, **противоЭДС E** . Величина этой ЭДС пропорциональна скорости изменения магнитного потока, т. е. числу оборотов якоря и величине магнитного потока Φ , создаваемого обмотками главных магнитных полюсов, т. е.

$$E = -\Delta\Phi/\Delta t = c_1 n \Phi, \quad (2.4)$$

где c_1 – постоянная двигателя, учитывающая особенности его конструкции; n – число оборотов якоря в минуту; Φ – магнитный поток возбужденного магнитного поля.

ПротивоЭДС меньше приложенного к двигателю напряжения на величину падения напряжения в якоре, т. е. $E = U - I_{\text{я}}R_{\text{я}}$ или с учетом формулы (2.4) равна

$$c_1 n \Phi = U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (2.5)$$

где $I_{\text{я}}$ – ток в проводниках якоря; $R_{\text{я}}$ – сопротивление витков якоря.

Определим скорость вращения якоря из выражения (2.5):

$$n = (U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}) / (c_1 \Phi). \quad (2.6)$$

Скорость якоря можно менять при постоянном напряжении U сети путем изменения сопротивления цепи якоря или путем изменения магнитного потока возбуждения. Так как сопротивление $R_{\text{я}}$ обмотки якоря очень мало, в реальных двигателях это сотые или тысячные доли ома, поэтому возможное падение напряжение в витках якоря минимально, им можно пренебречь, а зависимость (2.6) можно представить как

$$n \approx U / (c_1 \Phi). \quad (2.7)$$

Существуют два способа плавного изменения скорости вращения двигателя: уменьшение скорости вращения путем уменьшения подводимого напряжения; увеличение скорости вращения путем уменьшения магнитного потока $\Phi = LI_{\text{в}}$, т. е. уменьшения тока возбуждения $I_{\text{в}}$. Второй способ регулирования скорости вращения связан с меньшими потерями энергии; ток возбуждения $I_{\text{в}}$ в десятки раз меньше тока якоря $I_{\text{я}}$ ($I_{\text{в}} \ll I_{\text{я}}$), а потери энергии пропорциональны квадрату тока. Но при необходимости можно использовать одновременно оба способа регулирования скорости вращения.

Возможность плавного и экономичного регулирования скорости вращения двигателей постоянного тока в широких пределах – важное их достоинство.

Выражения (2.6), (2.7) показывают, что по мере уменьшения магнитного потока возбуждения скорость двигателя неограниченно возрастает. Поэтому опасен обрыв в цепи возбуждения двигателя, при котором магнитный поток уменьшается до потока остаточного намагничивания, а двигатель идет в «разнос». Режим «разноса» – аварийный, особенно у ненагруженного двигателя.

При подаче напряжения на обмотки якоря и магнитных полюсов возникает электромагнитный вращающий момент. Величина его определяется взаимодействием магнитного потока Φ и тока якоря $I_{\text{я}}$, т. е.

$$T = c_2 I_{\text{я}} \Phi, \quad (2.8)$$

где c_2 – постоянная, учитывающая особенности конструкции двигателя.

При необходимости изменения направления вращения якоря, реверсирования двигателя, необходимо изменить направление тока в одной из цепей двигателя – в цепи возбуждения или в цепи якоря. При одновременном изменении направления тока в обеих цепях двигателя направление вращательного момента

якоря не изменится. Несмотря на то, что ток I_B возбуждения меньше тока якоря I_A и возможные потери энергии при его изменении будут меньше, реверсирование двигателей проводят с помощью переключателей в цепи якоря, так как при переключении тока в цепи возбуждения из-за большого числа витков и большой индуктивности обмоток катушек возбуждения магнитного потока процесс установления магнитного потока нового направления сильно замедляется, и этим замедляется процесс реверса.

Рассмотрим, как влияет изменение механической нагрузки на валу двигателя на величину потребляемой двигателем электрической мощности (2.1). Обмотка якоря двигателя вращается в магнитном поле возбуждения. В соответствии с законом электромагнитной индукции в обмотке якоря возникает ЭДС, которая направлена навстречу приложенному напряжению сети противоЭДС. Она меньше приложенного к двигателю напряжения на величину падения напряжения в якоре, т. е. $E = U - I_A R_A$. Именно противоЭДС является параметром, регулирующим потребление электрической энергии из сети, так как при постоянном напряжении в сети ток в якоре определяется как

$$I_A = \frac{U - E}{R_A} = \frac{U - c_1 n \Phi}{R_A}. \quad (2.9)$$

Ток в якоре при неизменном напряжении зависит от скорости вращения вала двигателя. ПротивоЭДС (2.4) прямо пропорциональна скорости изменению магнитного потока, пронизывающего витки обмотки якоря, т. е. с уменьшением скорости вращения якоря уменьшается и противоЭДС. Если механическая нагрузка отсутствует (двигатель работает вхолостую), скорость вращения достигает максимального значения и противоЭДС почти полностью компенсирует напряжение сети. Тогда через обмотку якоря проходит минимальный ток, и соответственно электрическая мощность, потребляемая двигателем из сети, минимальна.

При подключении механической нагрузки скорость вращения якоря уменьшается, т. е. уменьшается и противоЭДС, а ток и электрическая мощность, потребляемые двигателем из сети, возрастут.

2.4. Понятие о механических характеристиках электродвигателей

Правильный выбор электродвигателя обеспечивает производительную и экономичную работу оборудования как при установившихся, так и при переходных режимах работы: во время пуска, приема и сброса нагрузки, торможения исполнительного звена. При постоянной, установившейся скорости вращения вала двигателя электромагнитный момент, развиваемый двигателем, всегда равен моменту нагрузки. При изменении тормозного момента нагрузки и сохранении величины подводимого напряжения ($U = \text{const}$; $\Phi = \text{const}$) двигатель, обладая свойством саморегулирования, возвращается в состояние устойчивого равновесия, при котором электромагнитный момент, развиваемый двигателем, становится равным моменту нагрузки. Например, при увеличении нагрузки на валу двигателя равновесие моментов нарушается и скорость вращения уменьшается. Но это вызовет уменьшение противоЭДС и, следовательно (2.9), увели-

чение $I_{\text{я}}$. Увеличение тока в якоре увеличивает вращающий момент (2.8) до тех пор, пока не наступит равновесие моментов при несколько пониженной скорости вращения двигателя. Соответственно при уменьшении нагрузки равенство развиваемого двигателем и тормозного моментов наступает при несколько повышенной скорости. Протекание переходного режима работы определяется прежде всего характером зависимости скорости вращения n двигателя от развиваемого им момента T , который обычно равен моменту нагрузки, т. е. видом механической характеристики двигателя, видом зависимости $n = f(T)$ при $U = \text{const}$; $\Phi = \text{const}$. Механические характеристики являются одним из основных критериев при выборе электродвигателя. Они показывают степень изменения скорости двигателя при изменении момента нагрузки. Критерием для оценки механических характеристик является их жесткость или крутизна, определяемая как

$$\beta = (\Delta n/n_{\text{ном}})/(\Delta T/T_{\text{ном}}),$$

где $n_{\text{ном}}$, $T_{\text{ном}}$ – соответственно номинальная скорость вращения и номинальный вращательный момент двигателя; Δn – изменение скорости при изменении ΔT нагрузки на валу двигателя.

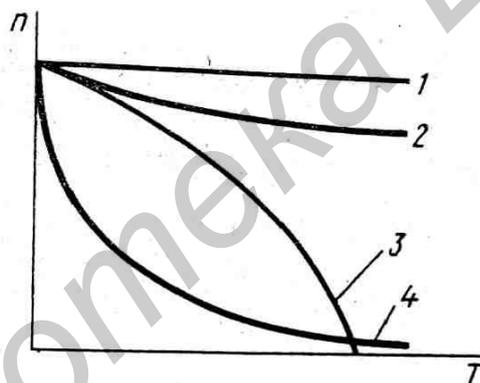


Рис. 2.3

Механические характеристики различных двигателей можно разбить (рис. 2.3) на следующие виды: 1 – абсолютно жесткая характеристика, например для синхронных двигателей; 2 – жесткая характеристика со сравнительно небольшим падением скорости при возрастании момента (с крутизной до 10 %); 3,4 – мягкая характеристика с большим падением скорости при увеличении момента нагрузки.

Различают естественные и искусственные механические характеристики. Естественной называют зависимость $n = f(T)$ при номинальных параметрах питающей сети, нормальной схеме включения и отсутствии добавочных сопротивлений в цепях двигателя. Если естественная характеристика не удовлетворяет предъявляемым требованиям, используют искусственные, получаемые путем изменения схем включения обмоток электродвигателя, введения добавочных сопротивлений и изменения приложенного напряжения. Часто это делают для

изменения скорости вращения при пуске, торможении. Особенности механических характеристик двигателей постоянного тока связаны с различиями в способах возбуждения их главного магнитного потока.

2.5. Схемы включения обмоток возбуждения двигателей постоянного тока

Механические характеристики двигателей постоянного тока зависят от способа включения цепи возбуждения магнитного потока по отношению к цепи якоря. Соединение этих цепей может быть параллельным, последовательным, смешанным и независимым друг от друга.

Двигатели постоянного тока с параллельным и независимым возбуждением

Схема включения двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением представлена на рис. 2.2.

Рассмотрим основные уравнения электродвигателя. Напряжение U , подводимое к цепи якоря, больше ЭДС индукции E на величину падения напряжения в цепи якоря $I_{\text{я}}R_{\text{я}}$, т. е.

$$U = E + I_{\text{я}}R_{\text{я}}, \quad (2.10)$$

где $I_{\text{я}}$ – ток в цепи якоря; $R_{\text{я}}$ – сопротивление обмотки якоря.

Известно из (2.4), что ЭДС индукции равна $E = c_1 n \Phi$, а вращающий момент, развиваемый двигателем (2.8), $T = c_2 I_{\text{я}} \Phi$, где c_1, c_2 – постоянные, учитывающие особенности конструкции. Из формулы (2.8) выразим $I_{\text{я}} = T / (c_2 \Phi)$.

Подставив значения E и $I_{\text{я}}$ в уравнение (2.10), получим

$$n = \frac{U}{c_1 \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{c_1 c_2 \Phi^2} T. \quad (2.11)$$

При отсутствии тормозного момента на валу частота вращения n_0 максимальна и равна $n_0 = U / c_1 \Phi$, т. е. является скоростью холостого хода. С увеличением момента нагрузки частота вращения уменьшается по линейному закону

$$n = n_0 - kT. \quad (2.12)$$

где $k = R_{\text{я}} / (c_1 c_2 \Phi^2)$ – постоянный коэффициент.

Механическая характеристика двигателей с независимым возбуждением аналогична характеристике двигателей с параллельным возбуждением, т. к. у них ток возбуждения также не зависит от тока якоря.

При неизменных U и Φ скорость вращения двигателя при значительном изменении тормозного момента изменяется от n_0 до $n_{\text{ном}}$ незначительно (на 3 – 6 %), т. е. двигатели параллельного и независимого возбуждения имеют жесткую характеристику, которая соответствует зависимости 2, представленной на рис. 2.3.

Двигатели с последовательным возбуждением

Схема включения представлена на рис. 2.4, а. Обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря, ток якоря является одновременно и током возбуждения ($I_{\text{я}} = I_{\text{в}}$), поэтому обмотка возбуждения выполнена проводом большого сечения.

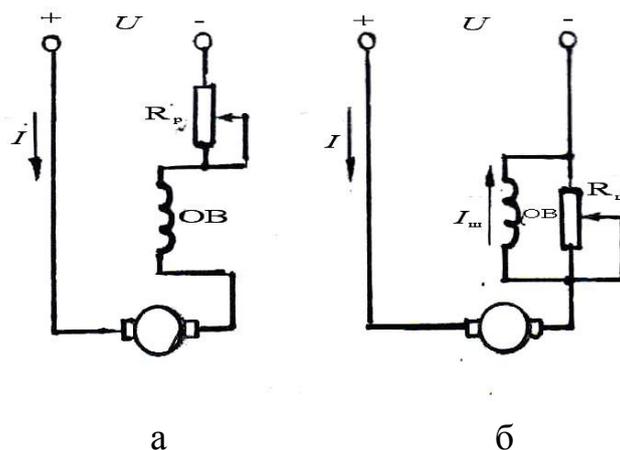


Рис. 2.4

Магнитный поток пропорционален создаваемому его току, т. е. в данном случае $\Phi = LI_{я}$, где $L = \text{const}$ – индуктивность катушек главных полюсов.

$$\text{Тогда} \quad T = c_2 I_{я} \Phi = c_2 L I_{я}^2 = k^* I_{я}^2, \quad (2.13)$$

где $k^* = c_2 L = \text{const}$.

Вращающий момент двигателя с последовательным возбуждением пропорционален квадрату тока, что позволяет ему развивать большой пусковой момент.

Выразим магнитный поток через вращающий момент. Известно, что $T = c_2 I_{я} \Phi$, с учетом того, что $I_{я} = \Phi/L$, получим $T = \frac{c_2}{L} \Phi^2$, откуда

$$\Phi = k_1 \sqrt{T}, \quad (2.14)$$

где $k_1 = \sqrt{L/c_2}$.

Подставим формулу (2.14) в приближенное выражение для частоты вращения двигателя:

$$n \approx \frac{U}{c_1 \Phi} = \frac{U}{c_1 k_1 \sqrt{T}}. \quad (2.15)$$

Как видно, скорость вращения двигателя сильно зависит от момента нагрузки и соответствует зависимости 4 на рис. 2.3, т. е. двигатель с последовательным возбуждением имеет мягкую механическую характеристику. Значительное уменьшение нагрузки может привести к опасному для двигателя увеличению скорости вращения. Поэтому такие двигатели не следует запускать вхолостую или с малой нагрузкой, что может привести к «разносу», их нельзя применять для приводов, работающих в режиме холостого хода или при небольшой нагрузке (транспортёры). Квадратичная зависимость развиваемого момента от тока (2.13) позволяет развивать большой пусковой момент, так как пусковой ток всегда больше номинального. Двигатели с последовательным возбуждением широко используются на электротранспорте в качестве тяговых, они позволяют резко набирать скорость после остановки, их используют в качестве стартеров для запуска двигателей в авто- и авиатранспорте. Скорость вращения двигателей с последовательным возбуждением можно регулировать либо изменением подводимого напряжения (рис. 2.4, а), либо изменением маг-

нитного потока возбуждения за счет шунтирования обмотки возбуждения (рис. 2.4, б). Второй способ более экономичен.

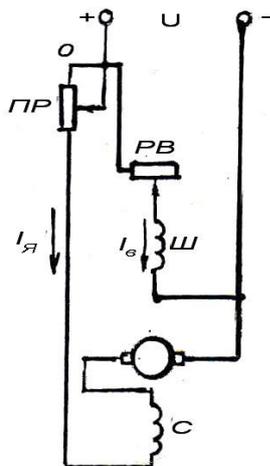


Рис. 2.5

Резко выраженная зависимость скорости вращения двигателя от нагрузки и вероятность опасного увеличения скорости при запуске вхолостую ограничивают применение таких двигателей. Указанных недостатков лишены **двигатели со смешанным возбуждением** (рис. 2.5). На каждом полюсном сердечнике расположены две обмотки – параллельно и последовательно подключенные к цепи якоря. Параллельно подключенная обмотка Ш является основной и возбуждает главный магнитный поток. Вторая обмотка С лишь дополнительно воздействует на этот магнитный поток. Обмотки можно включать так, чтобы магнитные потоки складывались (согласное включение) или вычитались (встречное включение).

Формулы для определения скорости и развиваемого момента имеют соответственно следующий вид:

$$n = \frac{U - I_{я}R_{я}}{c_1(\Phi_{\text{пар}} \pm \Phi_{\text{пос}})}, \quad (2.16)$$

$$T = c_2 I_{я} (\Phi_{\text{пар}} \pm \Phi_{\text{пос}}), \quad (2.17)$$

где $\Phi_{\text{пар}}$, $\Phi_{\text{пос}}$ – магнитные потоки, создаваемые обмотками соответственно с параллельным и последовательным подключением к цепи якоря; знак «+» используют при согласном включении; знак «-» – при встречном.

В зависимости от соотношения магнитных потоков обеих обмоток механические характеристики таких двигателей являются промежуточными между характеристиками двигателей с параллельным и последовательным возбуждением. Более жесткую механическую характеристику имеют двигатели при встречном включении (рис. 2.6) – кривая 1.

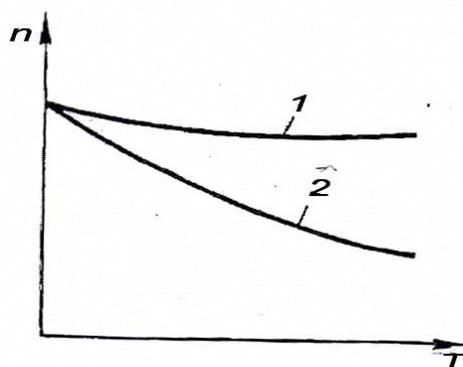


Рис. 2.6

Наличие параллельно подключенной к цепи якоря обмотки возбуждения исключает возможность опасного роста скорости вращения при запуске двигателя вхолостую. Последовательная обмотка возбуждения обеспечивает большой пусковой момент $T_{п}$, а параллельная – позволяет включить двигатель на холостом ходу и сохранять скорость вращения более постоянной при изменении нагрузки. Регулирование частоты вращения двигателей смешанного возбуждения осуществляют (рис. 2.5) регулировочным реостатом РВ в цепи параллельно подключенной обмотки.

Двигатели смешанного возбуждения применяют в качестве тяговых и крановых двигателей.

2.6. Исполнительные микродвигатели постоянного тока

Исполнительные двигатели работают в переходном режиме; для них характерны частые пуски, остановки и реверсы. В качестве исполнительных двигателей постоянного тока используют двигатели с независимым включением обмотки возбуждения или с возбуждением от постоянных магнитов. От двигателей общего назначения они отличаются тем, что имеют шихтованные якорь, станину и полюса. В зависимости от конструкции якоря микродвигатели постоянного тока подразделяют на двигатели с якорем обычного исполнения, полым якорем, беспазовым (гладким) якорем, а также с дисковым и цилиндрическим якорем с печатной обмоткой.

В микродвигателях с якорем обычного исполнения магнитный поток создается обмоткой возбуждения, расположенной на полюсах, или постоянными магнитами. В первом случае магнитную систему выполняют полностью шихтованной, причем корпус и полюсы изготавливают в виде одного пакета, собранного из штампованных листов требуемого профиля. Во втором случае на статоре располагают массивный постоянный магнит цилиндрической формы или несколько магнитов, выполненных в виде полюсных сердечников. Обмотку якоря укладывают в пазах сердечника якоря и присоединяют к коллектору, как и в двигателях обычного исполнения.

В микродвигателях с полым якорем магнитный поток создается обмоткой возбуждения или постоянными магнитами. Якорь представляет собой по-

лый стакан, расположенный между полюсами и неподвижным ферромагнитным сердечником, надетым на втулку подшипникового щита. Вместо сердечника внутри якоря может быть неподвижно установлен комплект постоянных магнитов цилиндрической формы. Обмотку якоря укладывают на цилиндрический каркас и заливают эпоксидной смолой, концы витков обмотки соединяют с пластинами коллектора. После полимеризации эпоксидной смолы якорь с коллектором представляет собой монолитную конструкцию.

Момент инерции полого якоря мал, что увеличивает быстродействие двигателя. Секции обмотки якоря окружены не ферромагнитным материалом, а воздухом и имеют меньшую индуктивность, что существенно улучшает условия коммутации двигателя и увеличивает срок службы щеток.

Воздушный зазор между полюсами и якорем больше, чем у двигателей обычного исполнения, поэтому требуется большая магнитодвижущая сила обмотки возбуждения, что приводит к увеличению массы, габаритных размеров двигателя и потерь мощности в обмотке возбуждения.

В микродвигателях с беспазовым (гладким) якорем обмотку якоря укладывают не в пазах, а на гладкой наружной поверхности якоря. Ее выполняют в два слоя и заливают эпоксидной смолой с ферромагнитным наполнителем. Лучшие условия коммутации позволяют значительно увеличить длину якоря и уменьшить его диаметр. Микродвигатели этого типа имеют более высокое быстродействие вследствие меньшего момента инерции якоря.

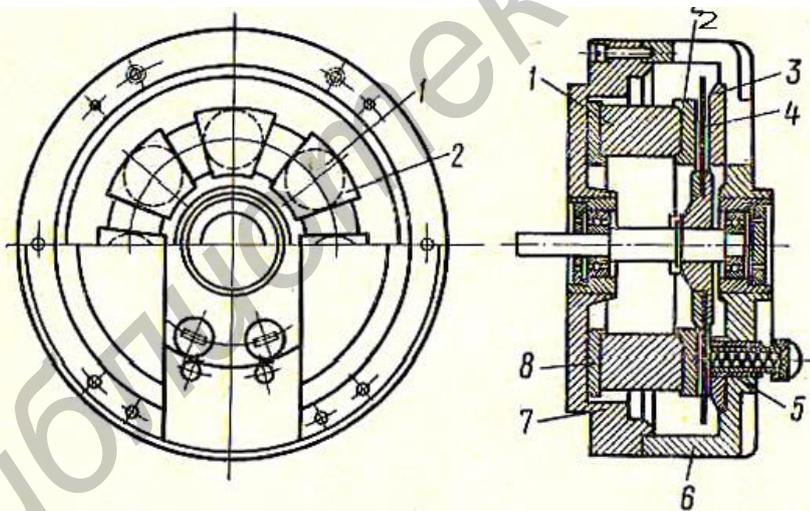


Рис. 2.7

Микродвигатели с печатной обмоткой якоря выполняют с дисковым и цилиндрическим якорем. Двигатели с **дисковым якорем** (рис. 2.7) имеют плоскую печатную обмотку якоря, нанесенную на тонкий диск из немагнитного материала (керамики, текстолита и т. п.).

Возбуждение осуществляется постоянными магнитами 2, выполненными в виде кольцевых сегментов. Создаваемый ими магнитный поток проходит в осевом направлении через дисковый якорь 4 с обмоткой, зазоры и замыкается

по двум кольцам 3 и 8, изготовленным из магнитомягкой стали. Постоянные магниты могут быть расположены по одну сторону диска или симметрично относительно диска.

Печатную обмотку наносят на якорь электрохимическим способом. Роль коллектора выполняют части проводников, расположенные на одной из сторон якоря, по которым скользят щетки. Для повышения надежности на валу якоря устанавливают коллектор, с которым соединяют концы секций обмотки.

Микродвигатели с печатными обмотками имеют следующие достоинства: высокое быстродействие из-за малого момента инерции; технологичность конструкции, исключая необходимость намотки и пайки обмоток, что снижает стоимость и повышает надежность машины. К недостаткам нужно отнести меньший срок службы из-за износа проводников обмотки при трении щеток.

Микродвигатель с цилиндрическим якорем и печатной обмоткой выполнен так же, как и микродвигатель с полым якорем, а отличается от него только способом выполнения обмотки якоря при сохранении аналогичных свойств двигателя. На обе стороны полого якоря электрохимическим способом наносят печатную обмотку, концы которой выводят к коллектору. По своим свойствам такие двигатели аналогичны двигателям с полым якорем.

Различают два способа управления исполнительными двигателями в зависимости от того, на какую обмотку при необходимости вращения вала двигателя подается управляющий сигнал: якорное и полюсное. Двигатели с постоянными магнитами используют только якорное управление.

В двигателях с якорным управлением напряжение управления U_y подается на обмотку якоря, а обмотка главных полюсов присоединена к сети постоянного тока с неизменным напряжением возбуждения. Когда напряжение $U_y = 0$, ток в обмотке якоря и вращающий момент равны нулю, т. е. самоход двигателя исключается. Изменяя напряжения U_y , можно регулировать скорость вращения.

В двигателях с полюсным управлением напряжение управления U_y подается на обмотку главных полюсов, а обмотка якоря постоянно включена на напряжение сети. Чтобы ограничить ток якоря при скорости $n = 0$, в его цепь часто включают дополнительный резистор. Регулирование скорости вращения осуществляют изменением напряжения управления, т. е. изменением магнитного потока двигателя ($\Phi = LI_y$). Во избежание самохода к валу двигателя должен быть приложен тормозной момент, превышающий электромагнитный момент, возникающий из-за остаточного потока (остаточной индукции) при $U_y = 0$.

Разновидностью якорного управления является **импульсное управление** исполнительным двигателем с помощью тока определенной длительности и частоты путем периодической подачи импульсов напряжения определенной частоты. Длительности управляющих импульсов выбирают на порядок меньше электрической постоянной обмотки, равной отношению ее индуктивности к сопротивлению. При импульсном управлении в режиме непрерывных токов якоря наблюдаются колебания скорости вращения двигателя за счет возрастания ее в период подачи тока и уменьшения ее в период пауз. Увеличив частоту подачи

импульсов, можно уменьшить колебания скорости вращения двигателя. Если длительность импульса равна периоду их следования, то двигатель все время включен и его скорость максимальна.

Из исполнительных двигателей постоянного тока наилучшими свойствами обладает двигатель с якорным управлением. Для него характерна высокая линейность механических и регулировочных характеристик, возможность быстрого разгона двигателя. Основным недостатком двигателя с якорным управлением является сравнительно большая мощность управления.

Для двигателя с полюсным управлением характерна небольшая мощность управления, но все другие свойства этого двигателя значительно хуже, чем для двигателя с якорным управлением. Поэтому в современных автоматических устройствах применяют главным образом исполнительные двигатели с якорным управлением.

Конструктивные особенности современных коллекторных микродвигателей: полый тонкостенный якорь и постоянный магнит возбуждения на основе композиции «ниодим-железо-бор». Их технико-эксплуатационными особенностями являются низкое напряжение питания (от 1 до 12 В); низкое напряжение трогания (от 0.1 до 0.2 В); малые габаритные размеры (диаметры 10 – 20 мм) и масса (12 – 75 гр); малое значение потребляемого тока (0.03 – 0.3 А); высокое быстродействие – не более 8 мс.

3. СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

3.1. Однофазный переменный ток и его параметры

До конца XIX века использовались только источники постоянного тока – химические элементы и генераторы, не позволяющие получить высокое напряжение. Проблема передачи электрической энергии (для уменьшения потерь при передаче используют высокое напряжение) на большие расстояния была решена только при использовании переменного тока и трансформаторов.

Преимущества переменного тока по сравнению с постоянным:

- возможность легко изменить его напряжение при помощи трансформаторов, что позволяет экономично передавать электроэнергию на большие расстояния;
- генераторы и двигатели переменного тока значительно проще, надежнее, дешевле генераторов и двигателей постоянного тока;
- возможность получения источников электрической энергии большой мощности на один агрегат (до 1500 МВт);
- переменный ток можно легко преобразовать в постоянный.

В технике **переменным** называют ток, который **периодически** меняет и величину, и направление, т. е. значение и величина которого повторяется через равные промежутки времени.

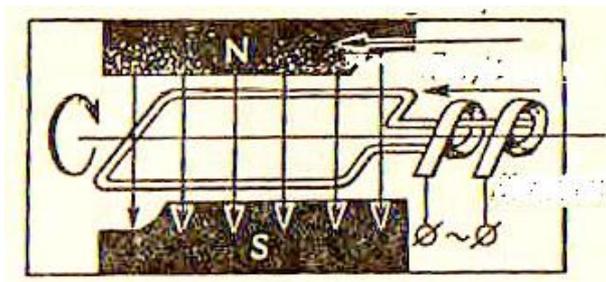


Рис. 3.1

Рассмотрим принцип получения переменного тока. Пусть в однородном магнитном поле постоянного магнита с индукцией B (рис. 3.1) равномерно вращается с угловой скоростью ω проводник в виде рамки. Концы рамки соединены с контактными кольцами, которые вращаются вместе с проводником. С внешней цепью кольца и рамка соединяются через неподвижные скользящие контакты (щетki). Магнитный поток, пронизывающий рамку площадью S , равен

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad (3.1)$$

где α – угол между нормалью к рамке и вектором магнитной индукции B поля.

При вращении рамки с постоянной угловой скоростью ω угол поворота равен $\alpha = \omega t$. Тогда формула (3.1) примет вид

$$\Phi = BS \cos \omega t. \quad (3.2)$$

Так как магнитный поток, пересекающий рамку проводника, меняется, то согласно явлению электромагнитной индукции в рамке будет наводиться ЭДС.

$$e = -d\Phi/dt = BS\omega \sin \omega t = E_m \sin \omega t, \quad (3.3)$$

где $E_m = BS\omega$ – максимальное (амплитудное) значение ЭДС индукции.

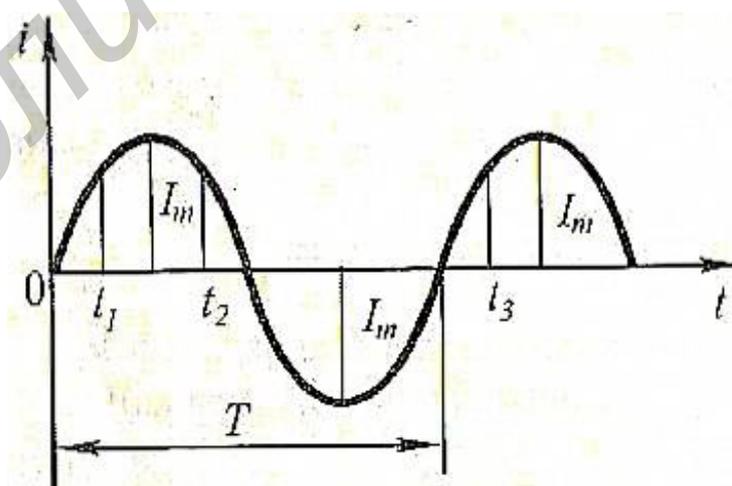


Рис. 3.2

ЭДС в рамке меняется по синусоидальному закону. Если к щеткам подключить внешнюю электрическую цепь (нагрузку), то через нее пройдет ток, который будет также меняться по синусоидальному закону (рис. 3.2).

$$i = I_m \sin \omega t, \quad (3.4)$$

где i – значение переменного тока в любой момент времени, называемое мгновенным значением переменного тока, I_m – наибольшее положительное или отрицательное значение переменного тока.

Напряжение на зажимах подключенной к щеткам цепи будет равно ЭДС индукции, т. е. оно тоже будет меняться по синусоидальному закону. Значение ЭДС, тока, напряжения в данный момент времени называют **мгновенным значением**. Время, в течение которого происходит полное изменение (колебание) тока в проводнике, называют **периодом T** . Величина, обратная периоду $f = 1/T$, определяет число полных колебаний тока за 1 секунду и называется частотой. Частота измеряется в герцах (Гц). При частоте 1 Гц происходит одно полное колебание тока за одну секунду. Стандартной частотой переменного тока в странах СНГ является частота 50 Гц, в США, Японии принята частота переменного тока 60 Гц. При низкой частоте увеличиваются габариты электрических машин, наблюдается мигание осветительных приборов; при высокой частоте увеличиваются потери электрической энергии в сердечниках электрических машин и трансформаторов.

Угловая скорость вращения ω рамки измеряется в рад/с. При наличии одной пары полюсов магнитного поля угловая скорость равна $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$. На практике для получения нужной частоты тока при относительно малой скорости вращения ротора генераторы тока имеют несколько пар p полюсов. Тогда одному периоду вращения рамки соответствуют p периодов переменного тока и угловая скорость вращения рамки будет равна

$$\omega = 2\pi/pT = 2\pi f/p, (\text{рад/с}),$$

где p – число пар полюсов магнитного поля.

На практике скорость вращения n задают в оборотах за минуту. С учетом, что в одном обороте 2π радиан, а минута равна 60 с, угловая скорость вращения равна $n = 60\omega/2\pi = 60f/p$ (об/мин).

Переменный ток, как и постоянный, оказывает тепловое, магнитное, механическое и химическое воздействия. Мгновенные и амплитудные значения тока для оценки воздействий не удобны, а средние значения за период равны нулю. Поэтому вводят понятия **действующих (эффективных) значений переменного тока и напряжения**. Они основаны на тепловом действии тока, не зависящем от его направления.

Действующими значениями переменного тока и напряжения называют соответствующие параметры такого постоянного тока, при котором в данном проводнике за данный промежуток времени выделяется столько же теплоты, что и при переменном токе.

Найдем соотношение между действующим и амплитудным значениями тока за период T из равенства количества теплоты, выделяемой в резистивном элементе сопротивлением R при действии постоянного и переменного тока:

$$I^2 RT = \int_0^T i^2 R dt,$$

откуда находим искомое действующее значение синусоидального тока:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}.$$

Действующее значение синусоидального тока определяется как среднее квадратическое за период T и с учетом (3.4) равно

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = I_m \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt}.$$

Так как $\int_0^T dt = T$, а $\int_0^T \cos 2\omega t dt = 0$,

то $I = I_m / \sqrt{2} = 0,707 I_m$, (3.5)

т. е. действующее значение синусоидального тока меньше его амплитуды в $\sqrt{2}$ раз. Такое же соотношение справедливо для действующих значений напряжений и ЭДС синусоидального тока, т. е. $U = U_m / \sqrt{2}$; $E = E_m / \sqrt{2}$. Действующие значения обозначаются латинскими прописными буквами без индексов.

В действующих значениях измеряемых величин проградуированы электроизмерительные приборы переменного тока. При расчете изоляции необходимо учитывать, что дважды в течение периода мгновенное значение синусоидального напряжения в $\sqrt{2}$ раз больше действующего, т. е. изоляция в установке переменного тока находится в менее благоприятных условиях, чем изоляция в аналогичных установках постоянного тока.

При расчете электрических машин, выпрямителей используют **средние** значения переменного тока. Среднее значение переменного тока (ЭДС, напряжения) определяют за половину периода, так как среднее значение за период равно нулю. Для переменного тока $I_{cp} = 2I_m / \pi = 0,637 I_m$. Аналогично определяют средние значения синусоидальных переменных ЭДС, напряжения.

Переменный ток в отличие от постоянного оценивается двумя величинами — амплитудой и фазой. Фаза переменного тока выражается через угол, стоящий под знаком синуса или косинуса, т. е. величиной ωt . На рис. 3.2 ток в моменты времени t_1 и t_2 имеет одинаковые значения, но отличается по фазе, так как в момент времени t_1 он увеличивается, а при t_2 — уменьшается. В моменты времени t_1 и t_3 ток одинаков, но отличается по времени на период, т. е. отличается по фазе. Фаза определяет значение переменных тока, ЭДС, напряжения в любой момент времени. Если в начальный момент времени ($t = 0$) переменный

ток не равнялся нулю, а имел какое-то положительное значение, то его формула (3.4) запишется в виде

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi),$$

где фазой называют угол $(\omega t + \varphi)$.

Тогда при $t = 0$ фазой является угол φ , который называется начальной фазой.

Обычно практическое значение имеет не сама фаза, а их разность, называемая сдвигом фаз. Сдвиг фаз – несовпадение во времени процесса изменения двух периодически изменяющихся с одинаковой частотой величин (для переменного тока – напряжение и сила тока). При сдвиге фаз они достигают нулевых и максимальных значений в различные моменты времени.

Например, если переменный ток выражается формулой

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_1),$$

а напряжение

$$v = U_m \sin(\omega t + \varphi_2),$$

то сдвиг фаз между током и напряжением равен $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$. Временной сдвиг рассчитывают по формуле $\Delta t = \Delta\varphi/\omega = \Delta\varphi T/2\pi$.

Угол $\Delta\varphi = \omega\Delta t$ переводят в радианы. Находят (рис. 3.3, б) по величине Δt между ближайшими максимумами одного знака. Опережающим по фазе будем считать тот параметр, максимум которого расположен левее, при условии, что $\Delta\varphi < \pi$.

Так, при наличии в цепи переменного тока катушки индуктивности сила тока и его напряжение не совпадают по фазе, ток отстает от напряжения на угол $\pi/2$. Сдвиг фаз имеет место и при наличии в цепи переменного тока емкости, когда ток опережает напряжение на угол $\pi/2$.

В реальных электрических цепях магнитные и электрические поля распределены вдоль цепи неравномерно. Те элементы цепи (резисторы), где происходит преобразование электромагнитной энергии в тепловую, называются активными сопротивлениями. Элементы цепи с резко выраженными магнитными (индуктивные катушки) и электрическими полями (конденсаторы) называют реактивными сопротивлениями. В индуктивных и емкостных элементах происходит периодическое аккумулирование энергии в магнитных и электрических полях, а затем энергия возвращается во внешнюю относительно этих элементов цепь.

Понятие полной мощности применяют для оценки предельной мощности электрических машин. Полная мощность измеряется в вольт-амперах и равна

$$S = UI \text{ (ВА)}. \quad (3.6)$$

Полная мощность S содержит в себе как активную, так и реактивную составляющие. Эта мощность, которая потребляется от источника электроэнергии. Активная и реактивная составляющие полной мощности определяются характером нагрузки.

Активная мощность P связана с той электрической энергией, которая может быть преобразована в другие виды энергии (световую, тепловую, механическую, химическую и др.), она измеряется в ваттах.

$$P = UI \cos \varphi \text{ (Вт)}, \quad (3.7)$$

где $\cos \varphi$ – коэффициент мощности, который показывает какая часть из полной мощности составляет активная мощность (φ – угол сдвига фаз между фазами тока и напряжения).

Реактивная мощность Q связана с обменом электрической энергии между источником и потребителями с реактивным сопротивлением, она измеряется в вольт-амперах реактивных (ВАр)

$$Q = UI \sin \varphi \text{ (ВАр)}. \quad (3.8)$$

Полную мощность можно выразить как $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ (ВА). При $P = 0$ вся полная мощность становится реактивной, при $Q = 0$ – активной. Активная мощность зависит от тока, напряжения и $\cos \varphi$. Коэффициент мощности $\cos \varphi$ имеет большое практическое значение. Увеличение $\cos \varphi$ дает возможность полнее использовать номинальную мощность генератора и другого оборудования (трансформаторов, двигателей). Увеличение $\cos \varphi$ ведет к повышению КПД установки, уменьшению капитальных и эксплуатационных расходов.

Около 60 % всей вырабатываемой электроэнергии используется электродвигателями. Поэтому повышение коэффициента мощности энергосистемы в основном достигается повышением $\cos \varphi$ электродвигателей, для чего необходим правильный подбор двигателя по мощности, т. е. номинальная мощность двигателя должна соответствовать мощности механической нагрузки. Недопустима работа двигателя с недогрузкой, вхолостую. Например, значение $\cos \varphi$ для наиболее широко используемых на практике асинхронных двигателей колеблется в пределах 0,1 – 0,3 при холостом ходе и 0,8 – 0,85 при номинальной нагрузке.

3.2. Трехфазная система переменного тока

Трехфазной системой переменного тока называется совокупность трех однофазных переменных токов одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых относительно друг друга на $1/3$ периода T .

Источником энергии в трехфазной системе служит трехфазный генератор. Схема простейшего трехфазного генератора изображена на рис. 3.3, а.

В статоре расположены три одинаковые обмотки, сдвинутые в пространстве одна относительно другой на угол 120° . Их называют фазными обмотками генератора. Одни выводы фазных обмоток – начало фаз генератора обозначаются буквами A, B, C , другие – концы фаз генератора, обозначаются буквами X, Y, Z . Фазы трехфазного генератора называются фазами A, B, C .

Ротор трехфазного генератора представляет собой электромагнит, возбуждаемый постоянным током. Форма магнита такова, что магнитный поток, пронизывающий каждую катушку, изменяется по косинусоидальному закону. При вращении ротора с угловой скоростью ω в фазных обмотках статора будут

индуцироваться ЭДС индукции e_A, e_B, e_C со сдвигом фаз: $e_A = E_m \sin \omega t$; $e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$; $e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ)$. Одному обороту двухполюсного ротора соответствует один период синусоидальной ЭДС, индуцированной в проводах обмотки статора. Мгновенные значения ЭДС трехфазного генератора представляются в виде трех синусоид, смещенных одна относительно другой на $1/3$ периода T (рис. 3.3, б). Последовательность в чередовании фаз не может быть случайной, так как она определяет последовательность изменения фазных ЭДС во времени. Обозначения выбирают так, чтобы ЭДС фазы A достигала максимума на $1/3$ периода раньше фазы B и на $2/3$ периода раньше фазы C .

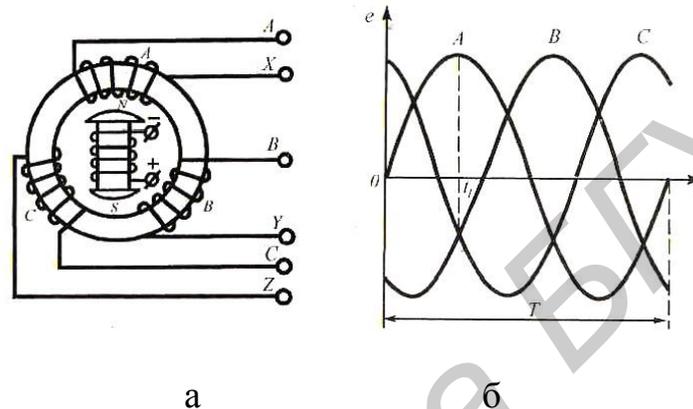


Рис. 3.3

Если к каждой из обмоток статора подсоединить нагрузку, то в образовавшихся цепях появляется синусоидальный ток. **Каждая фаза генератора является источником электроэнергии и может быть самостоятельно подключена на нагрузку.**

На электрических схемах трехфазный генератор принято изображать в виде трех обмоток, расположенных под углом 120° друг к другу, а трехфазный потребитель – в виде трех сопротивлений, расположенных аналогично (рис. 3.4). Для каждой фазы генератора подключается нагрузка. Нагрузка фаз называется **симметричной**, если в каждую из них включены приемники, имеющие равные по величине и одинаковые по характеру (одинаковые емкости и индуктивности) сопротивления. Для получения трехфазной системы необходимо определенным способом соединить фазы генератора и фазы потребителя. Трехфазный генератор, соединенный проводами с трехфазным потребителем, образует **трехфазную цепь**.

Возможны различные способы соединения обмоток генератора с нагрузкой. На рис. 3.4 показана несвязанная трехфазная цепь, в которой каждая обмотка генератора питает свою фазную нагрузку. Такую цепь, требующую шести соединительных проводов, практически не применяют. В целях экономии соединительных проводов обмотки трехфазного генератора соединяют **звездой** или **треугольником**. При этом число соединительных проводов от генератора к нагрузке уменьшается до трех или четырех.

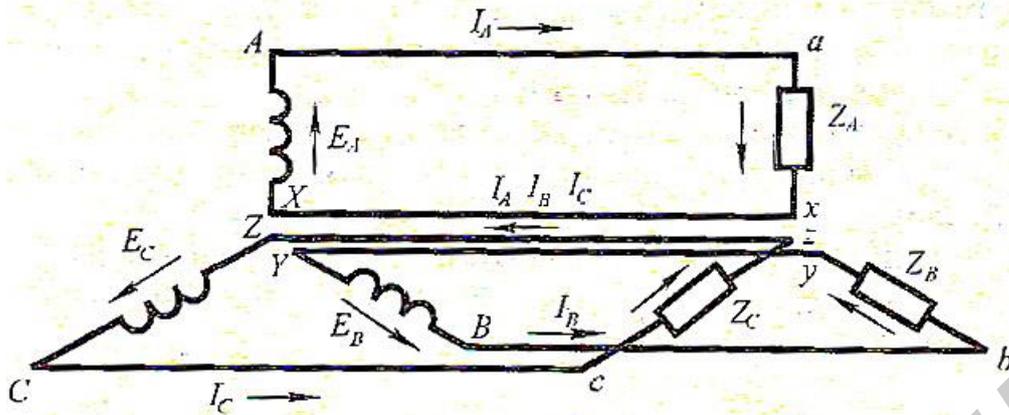


Рис. 3.4

При соединении звездой (рис. 3.5) концы фазных обмоток объединяют в одну точку, которую называют **нулевой точкой** генератора и обозначают буквой *O*. Начала фазных обмоток обозначают буквами *A*, *B*, *C*. Соединения звездой обозначаются значком *Y*.

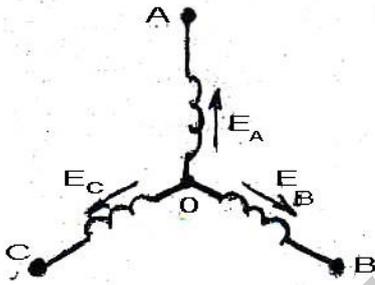


Рис. 3.5

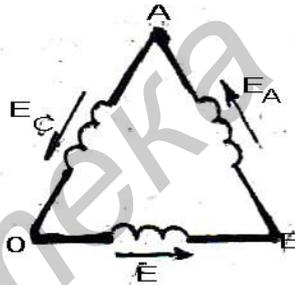


Рис. 3.6

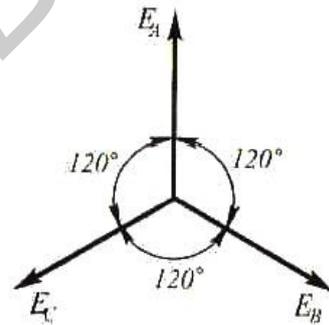


Рис. 3.7

При соединении треугольником (рис. 3.6) конец первой обмотки генератора соединяют с началом второй, конец второй – с началом третьей, конец третьей – с началом первой. К точкам *A*, *B*, *C* подсоединяют провода соединительной линии. Соединение треугольником обозначается знаком Δ .

На векторной диаграмме (рис. 3.7) ЭДС генератора можно представить в виде трехлучевой звезды, у которой углы между лучами равны 120° . Так как геометрическая сумма ЭДС E_A, E_B и E_C равна нулю, отметим, что при отсутствии нагрузки ток в обмотках генератора при таких соединениях отсутствует. Алгебраическая сумма мгновенных значений ЭДС трех фаз генератора в любой момент времени равна нулю: $e_A + e_B + e_C = 0$. Например, для момента времени $t_1 = T/4$ (рис. 3.3, б):

$$e_A = E_m \sin 0,5\pi = E_m; \\ e_B = -E_m \sin 30^\circ = -0,5 E_m; e_C = -E_m \sin 150^\circ = -0,5 E_m.$$

Рассмотрим подключение обмоток генератора и фазных нагрузок по схеме «звезда» (рис. 3.8).

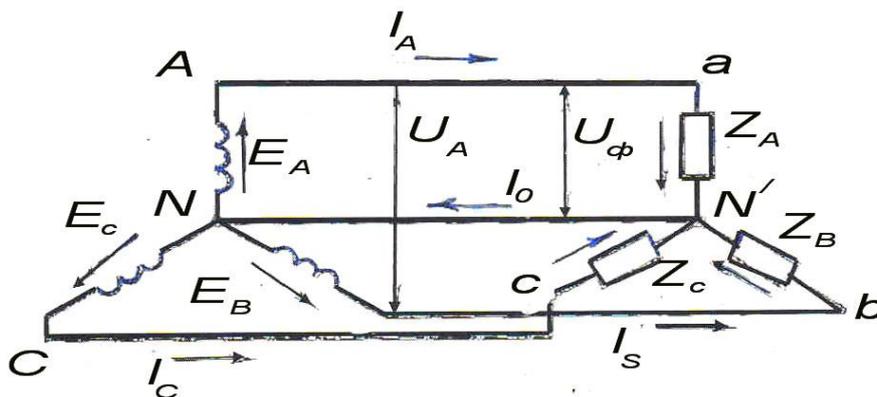


Рис. 3.8

Провода, соединяющие начала фаз генератора с приемником, называются линейными проводами. Ток, проходящий по ним, называется **линейным**, а ток, проходящий по фазной нагрузке – **фазным током**. При соединении «звездой» линейный ток равен фазному $I_{л} = I_{ф}$. Провод, соединяющий нулевую точку генератора O с нулевой точкой фазных нагрузок O' , называется нулевым.

Разность потенциалов между началом и концом фаз генератора, между началом и концом фазных нагрузок или между линейным и нулевым проводами называется **фазным напряжением**. Разность потенциалов между началами фаз генератора, между началами фазных нагрузок или между линейными проводами называется **линейным напряжением**, при соединении звездой $U_{л} = \sqrt{3} U_{ф}$.

Нулевой провод при симметричной, т. е. одинаковой для всех фаз, нагрузке не нужен. В случае несимметричной нагрузки отсутствие нулевого провода приведет к перераспределению фазных напряжений, в результате чего некоторые из них станут выше номинального, а некоторые – ниже, что недопустимо. Приемники чувствительны к отклонениям напряжения. Например, срок службы ламп накаливания при повышении напряжения на 5 % уменьшается в 2 раза. Поэтому ограничивают допустимые колебания напряжения для осветительной сети в пределах $\pm 2\%$, а для силовой – $\pm 5\%$. Если же при несимметричной нагрузке подключить нулевой провод, то все фазные напряжения будут равны номинальному, а по нулевому проводу будет протекать некоторый ток. **Нулевой провод обеспечивает при несимметричной нагрузке симметрию фазных напряжений.** Соединение «звездой» без нулевого провода применяют при подключении обмоток трехфазных двигателей, а подключение с нулевым проводом – при электрификации жилых домов, где невозможно добиться симметрии нагрузок. К домам подводят три фазы и нулевой провод. К каждой квартире подводят нулевой провод и одну из фаз. Установка предохранителей в нулевом проводе на распределительных щитах категорически запрещена, так как при его перегорании фазные напряжения могут стать неравными номинальным с вытекающими последствиями. **Обмотки генераторов соединяются обычно по схеме «звезда».** Если обмотку генератора соединить треугольни-

ком, то при несимметричности системы или при несинусоидальном изменении фазных ЭДС в обмотках генератора будет циркулировать ток.

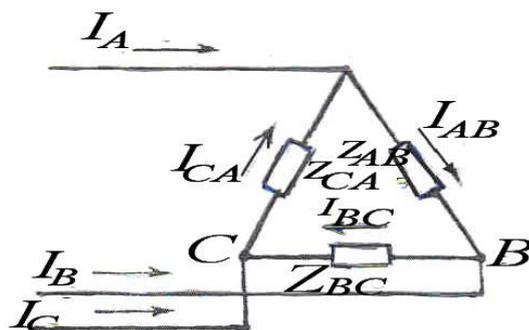


Рис. 3.9

При соединении нагрузок «треугольником» (рис. 3.9) фазные нагрузки подключаются под линейные напряжения, т.е. между линейными проводами. Поэтому при соединении нагрузок «треугольником» фазное напряжение равно линейному $U_{\Delta} = U_{\phi}$. Линейный ток при соединении нагрузки «треугольником» больше фазного в $\sqrt{3}$ раз, т. е. $I_{\Delta} = \sqrt{3} I_{\phi}$. В трехфазных цепях способ включения нагрузки «звездой» или «треугольником» не зависит от способа включения генератора, питающего сеть. Двигатели и трансформаторы могут в одинаковой мере соединяться по схемам «звезда» и «треугольник». Например, если фазная обмотка двигателя рассчитана на напряжение 220 В, то в сеть с линейным напряжением 380 В он включается по схеме «звезда», а в сеть с линейным напряжением 220 В – по схеме «треугольника».

Активная мощность трехфазной цепи при несимметричной нагрузке фаз равна **арифметической сумме** активных мощностей отдельных фаз $P = P_A + P_B + P_C$. Реактивная мощность равна **алгебраической сумме** реактивных мощностей отдельных фаз, так как реактивная мощность индуктивной нагрузки берется со знаком плюс, а емкостной – со знаком минус.

При симметричной нагрузке трехфазной цепи активные мощности фаз равны между собой, тогда активная мощность трехфазного приемника при симметричной нагрузке выразится формулой

$$P = 3P_{\phi} = 3I_{\phi}U_{\phi} \cos \varphi \text{ Вт.}$$

На практике много проще измерить линейные, а не фазные значения токов и напряжений. Выразив фазные значения тока и напряжения через линейные значения, получим общую для соединений звездой и треугольником формулу мощности трехфазного приемника при симметричной нагрузке:

$$P = \sqrt{3} I_{\Delta} U_{\Delta} \cos \varphi \text{ Вт,} \quad (3.9)$$

где φ – угол сдвига фаз между фазными током и напряжением.

Аналогично запишутся формулы реактивной и полной мощности трехфазной сети

$$Q = \sqrt{3} I_{\text{л}} U_{\text{л}} \sin \varphi \text{ ВАр.} \quad (3.10)$$

$$S = \sqrt{3} I_{\text{л}} U_{\text{л}} \text{ ВА.} \quad (3.11)$$

Отметим, что при неизменном линейном напряжении линейный ток при соединении нагрузки по схеме «треугольником» в три раза больше линейного тока при соединении по схеме «звезда». Поэтому мощность трехфазной цепи при соединении нагрузки по схеме «треугольник» в три раза больше, чем при соединении нагрузки по схеме «звезда».

Трехфазные системы переменного тока по сравнению с однофазными имеют следующие достоинства: питание трехфазным током позволяет получить значительную экономию материала проводов по сравнению с тремя однофазными линиями; при прочих равных условиях трехфазный генератор дешевле, легче и экономичнее, чем три однофазных генератора такой же мощности, это относится и к трансформаторам, и к двигателям; простой, надежный, дешевый двигатель трехфазного переменного тока.

4. ТРАНСФОРМАТОРЫ

4.1. Назначение и принцип действия трансформаторов

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты. С помощью повышающего трансформатора увеличивается напряжение, с помощью понижающего – уменьшается.

Трансформаторы используют в системах передачи и распределения электрической энергии (электрическая энергия при передаче от электрических станций к потребителю преобразуется в трансформаторах 3–5 раз); в устройствах, выпрямляющих переменный ток или преобразующих его из постоянного в переменный (инверторах) для обеспечения стандартного выходного напряжения; для питания сварочных аппаратов, электропечей и других потребителей особого назначения; в устройствах связи, автоматики и телемеханики для питания цепей радио- и телевизионной аппаратуры, разделения электрических цепей разных элементов этих устройств; в измерительных устройствах для включения в цепи высокого напряжения или в цепи, по которым проходят большие токи, в других областях.

В соответствии с назначением различают силовые, специальные и измерительные трансформаторы. По числу фаз трансформаторы делятся на одно- и трехфазные. Трансформаторы, используемые в технике связи, радио, подразделяют на низко- и высокочастотные, их выполняют двух-, трех- и многообмоточными. Расчетные мощности трансформаторов различны – от долей вольт-

ампер до десятков тысяч киловольт-ампер; рабочие частоты – от единиц герц до сотен килогерц.

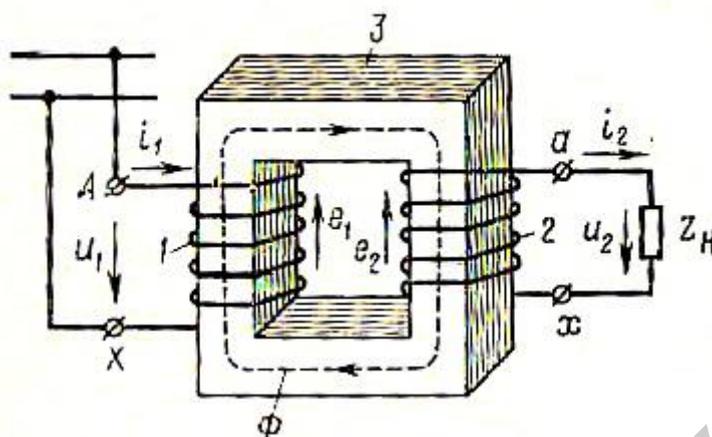


Рис. 4.1

Трансформаторы не имеют движущихся частей и скользящих контактных соединений, их КПД достигает 98–99 %. КПД трансформатора, определяемое как отношение мощности на выходе P_2 к мощности на входе P_1 , зависит от нагрузки. Рассчитывают трансформаторы так, что максимум КПД достигается при нагрузке, равной примерно половине номинального значения.

Однофазный трансформатор (рис. 4.1) представляет собой замкнутый магнитопровод, на котором расположены две или несколько электрически изолированных друг от друга обмоток. Для уменьшения потерь на вихревые токи и гистерезис магнитопровод собирают из тонких листов из магнитомягкого материала, изолированных друг от друга теплостойким лаком. Применение ферромагнитного материала позволяет усилить электромагнитную связь между обмотками, уменьшить магнитное сопротивление магнитопровода. В маломощных высокочастотных трансформаторах, используемых в радиотехнических схемах, магнитопроводом может быть воздушная среда. Обмотки трансформатора изготавливают из медного провода и располагают на одном и том же или на разных стержнях, рядом или одну под другой. К стержню непосредственно примыкает обмотка низкого напряжения, а поверх нее размещается обмотка высокого напряжения, при этом уменьшается рассеивание магнитного потока. Обмотка, соединенная с источником питания U_1 , называется первичной, число ее витков w_1 . Обмотка, к которой присоединяют сопротивление нагрузки Z_H , называют вторичной, ее число витков w_2 . При подключении к сети в первичной обмотке возникает переменный ток i_1 , который создает переменный магнитный поток Φ , замыкающийся по магнитопроводу и пронизывающий обе обмотки. Поток Φ индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС e_1 и e_2 , пропорциональные (согласно закону электромагнитной индукции) скорости изменения потока $d\Phi/dt$ и числам витков w_1 и w_2 соответствующей обмотки. Мгновенные значения ЭДС, индуцируемые в каждой обмотке,

$$e_1 = d\Psi_1/dt = w_1 d\Phi/dt; e_2 = d\Psi_2/dt = w_2 d\Phi/dt,$$

где Ψ_1, Ψ_2 – потокосцепление соответствующих обмоток.

Отношение мгновенных и действующих ЭДС в обмотках определяется выражением

$$e_1/e_2 = E_1/E_2 = w_1/w_2. \quad (4.1)$$

Если пренебречь падениями напряжения в обмотках трансформатора, которые обычно не превышают 3–5 % от номинальных значений напряжений U_1 и U_2 и считать $E_1 \approx U_1$ и $E_2 \approx U_2$, то получим

$$U_1/U_2 \approx w_1/w_2. \quad (4.2)$$

Подбирая соответствующим образом числа витков обмоток при заданном напряжении U_1 , можно получить требуемое напряжение U_2 . Если необходимо повысить вторичное напряжение, то число витков w_2 берут больше числа витков w_1 , такой трансформатор называют повышающим. Если требуется уменьшить напряжение U_2 , то число витков w_2 берут меньшим w_1 , такой трансформатор называют понижающим.

Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения или отношение чисел витков соответствующих обмоток трансформатора называют коэффициентом трансформации, который всегда больше единицы:

$$k = w_B/w_H. \quad (4.3)$$

В трехобмоточных и многообмоточных трансформаторах устройств радиоэлектроники и автоматики различают три и более изолированных друг от друга обмотки, что позволяет при питании одной из них получать два и более различных напряжения.

В трансформаторе преобразуются только напряжения и токи. Мощность остается приблизительно постоянной из-за малых потерь. Следовательно,

$$U_2/U_1 \approx I_1/I_2 \approx w_2/w_1. \quad (4.4)$$

При увеличении вторичного напряжения трансформатора в k раз по сравнению с первичным ток I_2 во вторичной обмотке соответственно уменьшается в k раз.

Трансформатор может работать только в цепях переменного тока. Если первичную обмотку подключить к источнику постоянного тока, то в его магнитопроводе образуется постоянный магнитный поток. В обмотках не индуцируется ЭДС и не передается электрическая энергия из первичной цепи во вторичную. Такой режим опасен для трансформатора, так как из-за отсутствия противоЭДС E_1 ток в первичной обмотке $I_1 = U_1/R_1$ очень большой.

4.2. Режимы работы трансформатора

Режим работы трансформатора, при котором его вторичная обмотка разомкнута, называют режимом холостого хода (трансформатор работает без нагрузки). В таком режиме трансформатор превращается в катушку (рис. 4.2) с магнитопроводом, к обмотке которой с числом витков w подведено синусоидальное напряжение $U = U_m \sin \omega t$. Переменный ток в витках катушки, подключенной к синусоидальному напряжению, возбуждает переменный магнитный поток Φ , который индуцирует в витках ЭДС самоиндукции $E = wd\Phi/dt$, где

w – число витков катушки. Если пренебречь активным сопротивлением витков и потерями на гистерезис и вихревые токи, то приложенное к катушке напряжение будет уравновешиваться только ЭДС самоиндукции, т. е. $U_m \sin \omega t = E_m \sin \omega t$, где U_m, E_m – соответственно амплитудные значения напряжения и

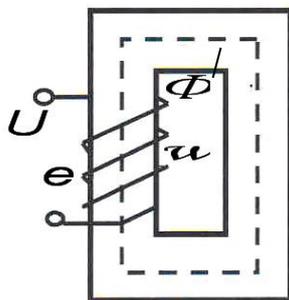


Рис. 4.2

ЭДС самоиндукции; $\omega = 2\pi f$ – частота переменного тока за 2π секунд. Тогда $E_m \sin \omega t = wd\Phi/dt$, откуда

$$d\Phi = E_m \sin \omega t \cdot dt/w. \quad (4.5)$$

Проинтегрировав левую и правую часть выражения (4.5), получим $\Phi = \frac{E_m}{\omega \cdot w} \cos \omega t + C$. Постоянная интегрирования $C = 0$, так как синусоидальная ЭДС не может создать постоянную составляющую магнитного потока. Тогда

$$\Phi = \frac{E_m}{\omega \cdot w} \cos \omega t = \Phi_m \cos \omega t, \quad (4.6)$$

где $\Phi_m = E_m/(\omega w)$ – амплитудное значение переменного магнитного потока в магнитопроводе катушки. Так как при режиме холостого хода ЭДС практически равна напряжению, то значение магнитного потока определяется напряжением первичной обмотки, числом ее витков и частотой. Соответственно из (4.6)

$$E_m = \omega w \Phi_m. \quad (4.7)$$

Подставив в выражение (4.7) $\omega = 2\pi f$ и $E_m = \sqrt{2} E$, получим уравнение связи между магнитным потоком и действующим значением возбуждаемой этим потоком ЭДС:

$$E = 4,44 f w \Phi_m, \quad (4.8)$$

где f – частота переменного тока.

Выражение (4.8), называемое формулой трансформаторной ЭДС, играет важную роль в теории электрических устройств переменного тока.

Если цепь вторичной обмотки трансформатора разомкнута, то напряжение на зажимах обмотки равно ее ЭДС: $U_2 = E_2$, а напряжение источника питания почти полностью уравновешивается ЭДС первичной обмотки $U_1 \approx E_1$. Следовательно, $k = E_2/E_1 \approx U_2/U_1$, т. е. коэффициент трансформации может

быть определен экспериментально в режиме холостого хода путем подключения вольтметра к клеммам первичной и незамкнутой вторичной обмоток трансформатора.

Режим работы трансформатора, при котором во вторичную обмотку включена нагрузка, называют рабочим. Во вторичной обмотке появится ток I_2 , создающий магнитный поток Φ_2 , который в соответствии с правилом Ленца направлен противоположно магнитному потоку, создаваемому напряжением первичной обмотки. В результате суммарный магнитный поток уменьшится, а это приведет к уменьшению ЭДС E_1 в первичной обмотке. При этом нарушится равновесие $U_1 = E_1$, что ведет к увеличению тока I_1 . Ток в первичной обмотке будет возрастать до тех пор, пока не восстановится равенство $U_1 = E_1$, при котором суммарный магнитный поток восстановится до первоначальной величины.

При увеличении сопротивления вторичной обмотки уменьшаются ток I_2 и магнитный поток Φ_2 , что приводит к возрастанию суммарного магнитного потока и к возрастанию E_1 . В результате нарушается равновесие между приложенным напряжением U_1 и E_1 . Это приведет к уменьшению тока I_1 до такого значения, при котором суммарный магнитный поток примет первоначальную величину.

Постоянство магнитного потока при переходе от режима холостого хода к режиму нагрузки является важным свойством трансформатора, которое позволяет автоматически регулировать значение тока в первичной обмотке I_1 при изменении тока нагрузки I_2 (способность саморегулирования).

С увеличением нагрузки трансформатора увеличиваются токи I_2 и I_1 , т. е. растет и мощность, поступающая из сети. При уменьшении нагрузки уменьшается вторичный ток, и первичный ток должен уменьшиться, т. е. уменьшится мощность, поступающая из сети.

4.3. Трехфазные трансформаторы

Для преобразования напряжения трехфазной системы можно использовать три однофазных трансформатора, которые могут быть соединены либо «звездой», либо «треугольником». На практике применяют обычно трехфазные трансформаторы, выполненные на одном трехстержневом магнитопроводе (рис. 4.3).

На каждый стержень (сердечник) магнитопровода навивают по две обмотки: низкого напряжения, а поверх нее – высокого напряжения. Обмотки соединяют «звездой» или «треугольником». Наиболее часто применяют соедине-

ние звездой. Соединение обмоток трансформатора треугольником применяют при симметричной нагрузке фаз.

Применяют также комбинированное включение: первичная обмотка соединяется «звездой», а вторичная – «треугольником» или наоборот. При соединении звездой (рис. 4.3) концы обмоток соединяются вместе, а начала подключаются в сеть. При соединении треугольником конец первой обмотки соединяются с началом второй, конец второй с началом третьей, конец третьей с началом первой обмотки, а узлы (места) соединений обмоток фаз подключаются в сеть или к нагрузке. Выводы высокого напряжения обозначают буквами A, B, C , выводы низкого напряжения – буквами a, b, c .

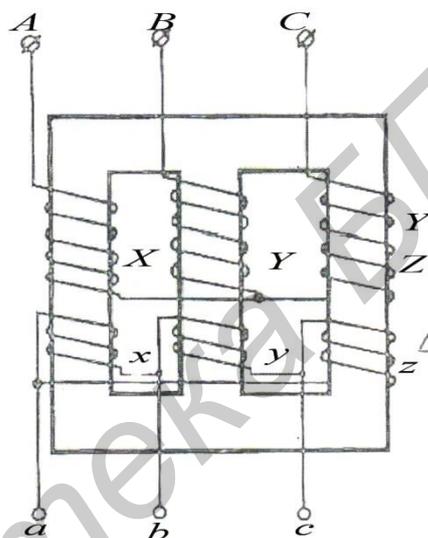


Рис. 4.3

Особенностью трехфазного трансформатора является зависимость **коэффициента трансформации линейного напряжения** от способа соединения обмоток. Обозначим отношение чисел витков обмоток одной фазы буквой «к». Оно соответствует коэффициенту трансформации однофазного трансформатора и равна отношению фазных напряжений $k = w_2/w_1 = U_{\phi 2}/U_{\phi 1}$. Тогда коэффициент трансформации линейных напряжений «с» равен:

– при соединении обмоток по схеме «звезда–звезда»

$$c = U_{л2}/U_{л1} = \sqrt{3} U_{\phi 2}/(\sqrt{3} U_{\phi 1}) = k;$$

– при соединении обмоток по схеме «звезда–треугольник»

$$c = U_{л2}/U_{л1} = \sqrt{3} U_{\phi 2}/U_{\phi 1} = \sqrt{3} k;$$

– при соединении обмоток по схеме «треугольник–звезда»

$$c = U_{л2}/U_{л1} = U_{\phi 2}/(\sqrt{3} U_{\phi 1}) = k/\sqrt{3}.$$

Выбирая схему соединения обмоток без изменения числа витков трехфазного трансформатора, можно в $\sqrt{3}$ раза увеличить или уменьшить коэффициент трансформации.

4.4. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы используют для подключения электроизмерительных приборов в цепи переменного тока высокого напряжения. Их применяют и для подключения к цепям высокого напряжения обмоток реле, обеспечивающих защиту электрических установок от аварийных режимов. При этом измерительные приборы оказываются изолированными от цепей высокого напряжения, что обеспечивает безопасность работы обслуживающего персонала. Измерительные трансформаторы позволяют измерять большие токи и напряжения с помощью приборов, рассчитанных для измерения малых токов и напряжений.

Различают измерительные трансформаторы напряжения и трансформаторы тока. Первые служат для включения вольтметров и других приборов, реагирующих на значение напряжения. Вторые служат для включения амперметров и токовых катушек приборов. Рассчитаны измерительные трансформаторы для работы со стандартными приборами (амперметрами на 5 А, вольтметрами на 100 В).

Трансформатор напряжения выполняют в виде двухобмоточного понижающего трансформатора (рис. 4.4). Для обеспечения безопасности работы обслуживающего персонала вторичную обмотку тщательно изолируют от первичной и заземляют.

Трансформатор тока выполняют в виде двухобмоточного повышающего трансформатора (рис. 4.5, а) или в виде проходного трансформатора, у которого первичной обмоткой служит изолированный провод или изолированный медный стержень (рис. 4.5, б) внутри магнитопровода. Трансформатор тока нельзя включать в линию без подсоединенного к нему измерительного прибора. При разомкнутой вторичной цепи магнитный поток в сердечнике резко возрастает, на концах оборванной цепи появится большая ЭДС, опасная для оператора; потери в сердечнике резко возрастут, трансформатор перегреется и выйдет из строя. **Размыкание цепи вторичной обмотки трансформатора тока недопустимо.** Для повышения безопасности обслуживающего персонала кожух измерительного трансформатора должен быть тщательно заземлен.

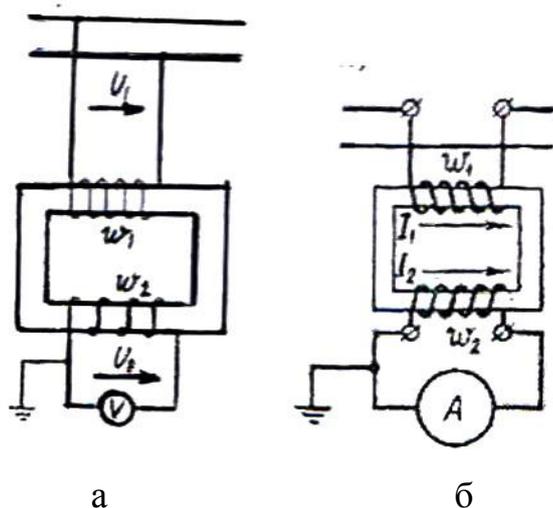


Рис. 4.4

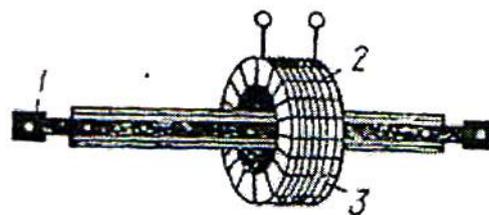


Рис. 4.5

5. ДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

5.1. Устройство и принцип работы асинхронных трехфазных двигателей

Двигатель имеет две основные части: неподвижную – статор и вращающуюся – ротор. Статор состоит из корпуса, который должен обладать достаточной механической прочностью и выполняется из немагнитных материалов: алюминиевых сплавов, чугуна. Конструкция корпуса двигателя предусматривает его крепление к фундаменту или к станине производственного оборудования. В корпус 1 (рис. 5.1, а), впрессовывают сердечник 2 статора, представляющий собой полый цилиндр, (рис. 5.1, б), на внутренней поверхности которого имеются продольные пазы.

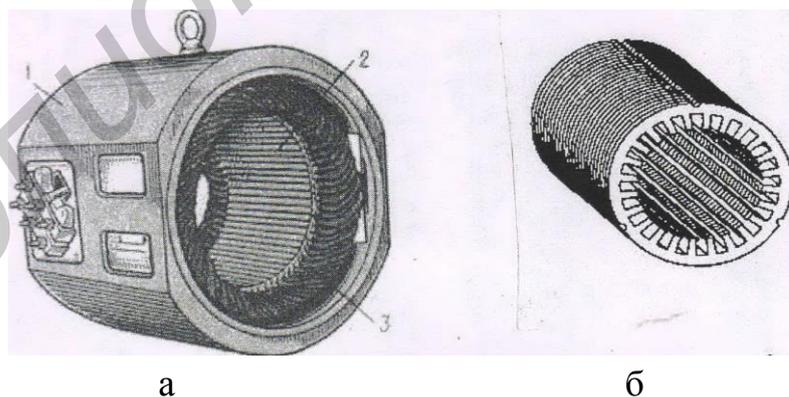


Рис. 5.1

Сердечник изготавливается из ферромагнитного материала – специальной электромагнитной стали. Для уменьшения потерь от вихревых токов сердечник собирают из отдельных листов толщиной от 0,2 до 1,0 мм, изолированных друг от друга лаком. В пазы сердечника укладывается трехфазная обмотка 3 статора из изолированного медного провода. Обмотка в простейшем случае состоит из

трех отдельных частей (катушек), сдвинутых относительно друг друга на 120° . Начала и концы фаз выведены на клеммник (рис. 5.2, а), закрепленный на корпусе двигателя. Начала фаз обозначаются буквами c_1, c_2, c_3 , концы – c_4, c_5, c_6 . Обмотка статора может быть соединена по схеме «звезда» (рис. 5.2, б) или по схеме «треугольник» (рис. 5.2, в). Выбор схемы соединения обмотки статора зависит от линейного напряжения сети и паспортных данных двигателя. В паспорте трехфазного двигателя задаются линейные напряжения сети и схема соединения обмотки статора. Например, 380/220, Y/ Δ . Данный двигатель можно включать в сеть с $U_{л} = 380$ В по схеме «звезда» или в сеть с $U_{л} = 220$ В – по схеме «треугольник». Зажимы клеммника c_1, c_2, c_3 всегда подключаются к сети. При соединении звездой концы фаз c_4, c_5, c_6 соединяются вместе, при соединении «треугольником» зажимы на клеммнике соединяются вертикально $c_1 - c_6$; $c_2 - c_4$ и $c_3 - c_5$.

При подключении к сети в обмотках фаз будет создаваться магнитный поток. Результирующий магнитный поток последовательно совпадает по направлению с осью той из фазных обмоток, ток в которой достиг максимального значения, т. е. он вращается в направлении последовательности фаз трехфазной системы. Назначение обмоток статора – создавать вращающееся магнитное поле.

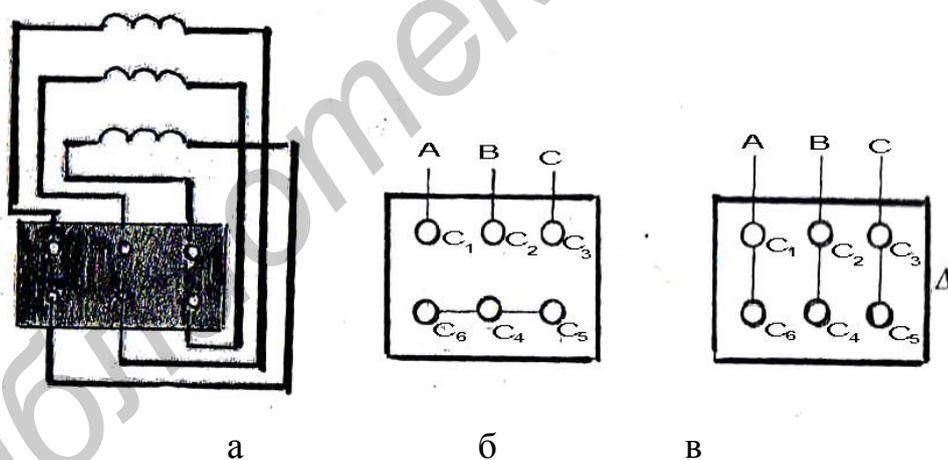


Рис. 5.2

Сердечник ротора в виде цилиндра набирают из тонких пластин электро-технической стали, изолированных друг от друга лаком. На внешней стороне сердечника имеются продольные пазы, в которые закладывается обмотка ротора. Обмотка роторов бывает двух типов: короткозамкнутая и фазная.

Обмотка короткозамкнутого ротора выполняется в виде цилиндрической клетки из медных или алюминиевых стержней (рис. 5.3, а), которые без изоляции вставляются в пазы сердечника ротора.

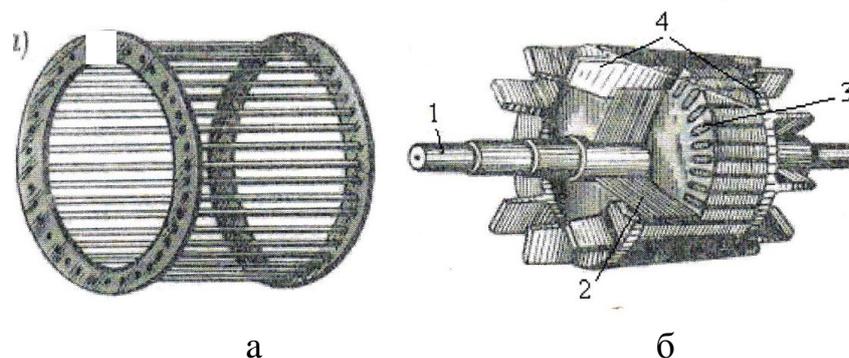


Рис. 5.3

Торцевые концы стержней замыкаются накоротко кольцами из того же материала, что и стержни (беличье колесо). Часто короткозамкнутая обмотка изготавливается путем заливки пазов сердечника ротора расплавленным алюминием. Такая обмотка всегда замкнута накоротко и включение сопротивления в нее невозможно. Двигатели с короткозамкнутым ротором не имеют подвижных контактов и надежны в эксплуатации. Серьезный недостаток двигателя с короткозамкнутым ротором – ограниченный пусковой момент из-за сильно закороченного ротора, поэтому была предложена конструкция двигателя с фазным ротором.

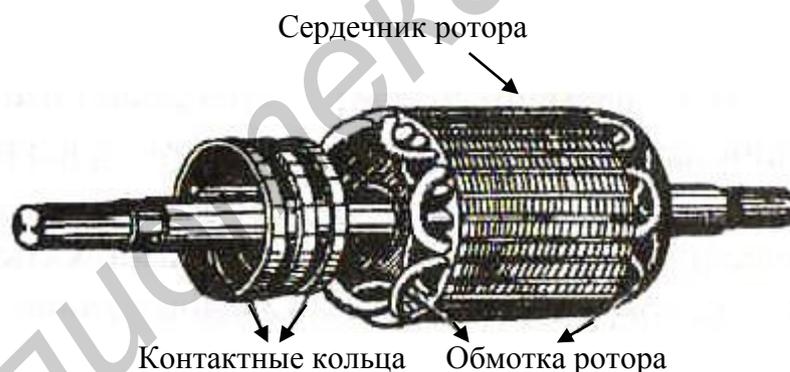


Рис. 5.4

Обмотка фазного ротора выполняется изолированным проводом. Обмотка выполняется трехфазной, аналогично обмотке статора с тем же числом пар полюсов. Витки обмотки закладываются в пазы сердечника ротора и соединяются по схеме «звезда», а свободные концы обмотки соединяются с тремя медными контактными кольцами (рис. 5.4), укрепленными на валу ротора. Кольца изолированы друг от друга и от вала и вращаются вместе с валом. При вращении поверхности колец скользят по металлографитовым щеткам, которые установлены в неподвижных щеткодержателях и прижимаются к кольцам пружинами. Через кольца и щетки обмотка ротора замыкается на трехфазный реостат. Дви-

гатели с фазным ротором (рис. 5.5) обладают лучшими пусковыми и регулировочными свойствами.

Вал ротора, изготовленный из стали, вращается в подшипниках качения. Для увеличения теплоотдачи ротор может снабжаться крыльчаткой (рис. 5.3, б).

Условное обозначение асинхронного двигателя с короткозамкнутым (а) и фазным (б) роторами приведено на рис. 5.6.

Между статором и ротором имеется воздушный зазор, величина которого оказывает существенное влияние на рабочие свойства двигателя. У асинхронного двигателя относительно низкий коэффициент мощности ($\cos \varphi$). Это связано с большим потреблением реактивной мощности, которая необходима для возбуждения магнитного поля. Магнитный поток в двигателе встречает на своем пути воздушный зазор между статором и ротором, который резко увеличивает магнитное сопротивление, потребляя мощность. Для повышения коэффициента мощности асинхронных двигателей воздушный зазор стремятся делать возможно меньшим, доводя его до 0,2–0,3 мм. Вращающееся магнитное поле статора индуцирует в обмотке ротора ЭДС, которая создает в замкнутой накоротко или через

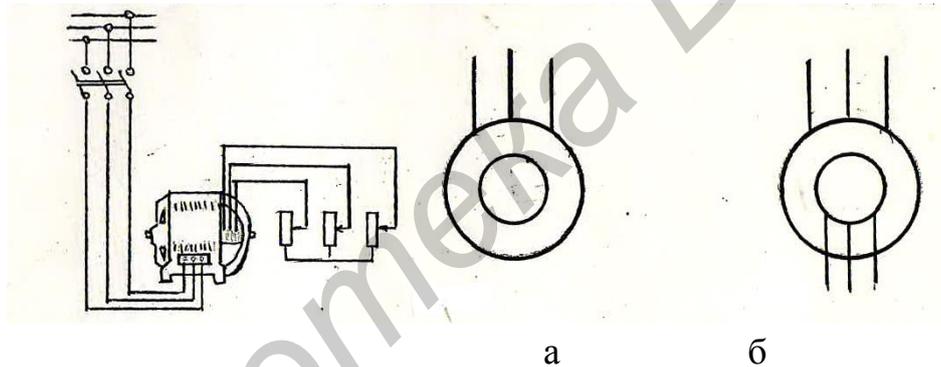


Рис. 5.5

Рис. 5.6

пусковой реостат обмотке ротора ток. Взаимодействие индуцированного тока ротора с вращающимся магнитным полем статора приводит, согласно закону Ампера, к возникновению электромагнитной силы, действующей на проводники ротора и вращающего момента, заставляющего ротор следовать за полем статора, т. е. вращаться в направлении вращения поля. Суммарное электромагнитное усилие, приложенное ко всем проводникам ротора, образует электромагнитный момент T . Если этот момент достаточно велик, то ротор приходит во вращение и при установившейся скорости вращения электромагнитный момент равен моменту нагрузки. Но скорость вращения ротора n не может быть равна скорости n_1 вращения магнитного поля статора, так как при этом не будет относительного движения поля относительно проводников ротора, и, сле-

довательно, в обмотке ротора исчезнет ток, и далее исчезнет вращающий момент.

5.2. Вращающееся магнитное поле трехфазного тока

Рассмотрим подробнее механизм создания вращающегося магнитного поля в статоре двигателя. Пусть к каждой фазе трехфазной системы подключено по одной обмотке в виде одного витка, вложенного в пазы сердечника статора. Начала обмоток обозначим буквами A , B и C , а концы – X , Y , Z соответственно (рис. 5.7).

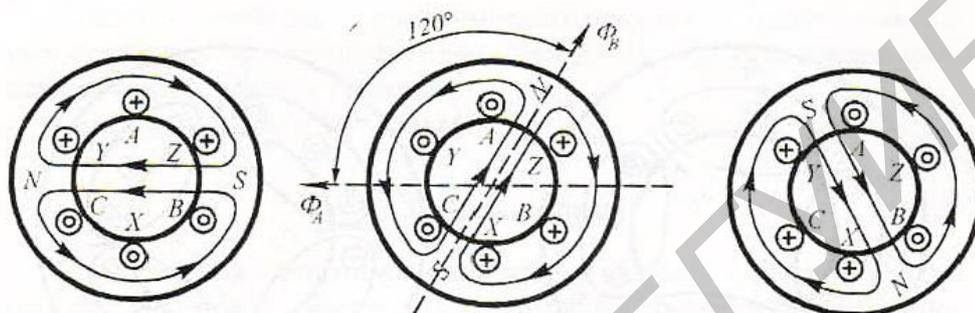


Рис. 5.7

Зависимости изменения токов от времени в фазах изображены на рис. 5.8.

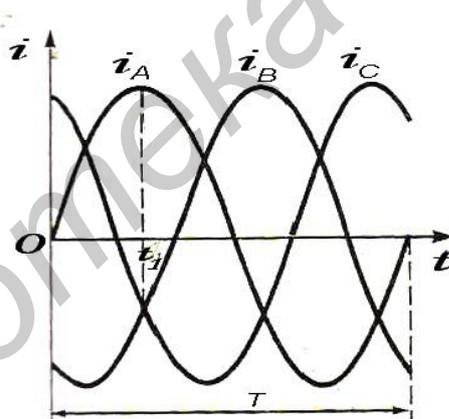


Рис. 5.8

Ток в начале обмотки будем считать направленным от нас (обозначается крестиком), если его значение положительно. Точкой обозначим направление тока к нам.

В момент времени t_1 (рис. 5.8), когда сила тока в фазе A примет максимальное положительное значение, в фазах B и C ток будет иметь отрицательное значение, т. е. в проводниках A , Y и Z токи идут «от нас», а в проводниках X , B и C – «к нам». Таким образом в трех расположенных рядом проводниках A , Y и Z , перпендикулярных плоскости чертежа, токи в момент t_1 направлены в одну сторону и создают магнитное поле, направленное по правилу буравчика по ча-

совой стрелке, а токи в проводниках X , B и C создают магнитное поле, направленное против часовой стрелки. Как видно из рис. 5.7, а, результирующее магнитное поле трехфазной системы представляется в виде двухполюсного магнитного поля.

Через $1/3$ периода в обмотке фазы B будет максимальный положительный ток, а в фазах A и C токи имеют отрицательное значение (рис. 5.8), результирующее магнитное поле (рис. 5.7, б) повернется на 120° по ходу часовой стрелки. Еще через $1/3$ периода максимум положительного тока окажется в фазе C , а в фазах A и B токи будут иметь отрицательное направление (рис. 5.8). Результирующее магнитное поле (рис. 5.7, в) повернется на 120° по ходу часовой стрелки. За целый период магнитное поле трехфазной системы совершит полный оборот. Результирующий магнитный поток последовательно совпадает по направлению с осью той из фазных обмоток, ток в которой достиг максимального значения, т. е. он вращается в направлении последовательности фаз трехфазной системы. Скорость вращения магнитного поля при наличии в каждой фазной обмотке по одной катушке равна

$$\omega_1 = 2\pi/T = 2\pi f \text{ (рад/с)} \quad \text{или} \quad n_1 = 60\omega_1/2\pi = 60f \text{ (об/мин)},$$

где f – частота переменного тока.

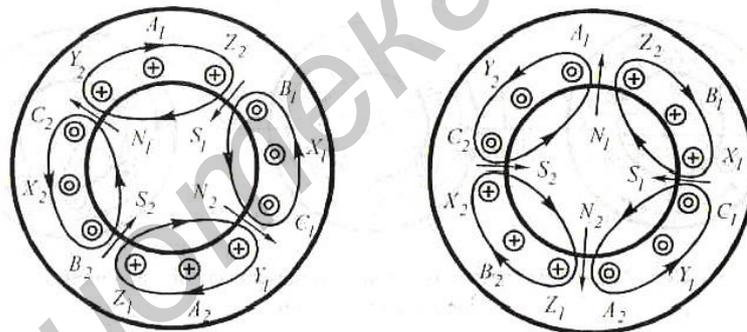


Рис. 5.9

При стандартной частоте $f = 50$ Гц магнитное поле двухполюсного двигателя совершает 3000 оборотов в минуту ($n_1 = 60f$). Уменьшение скорости магнитного поля достигается применением многополюсных обмоток статора. Если магнитное поле должно иметь p пар полюсов, то каждая фазная обмотка должна быть разделена на p равномерно распределенных в пространстве и последовательно соединенных частей. Так для создания четырехполюсного вращающегося магнитного поля общее число катушек равно 6, для шестиполюсного равно 9, т. е. в общем случае число катушек может быть любым, но кратным трем. Если в каждую фазу включить по две катушки, соединенные последовательно и сдвинутые в пространстве на 180° , получим суммарное четырехпо-

люсное магнитное поле с числом пар полюсов $p = 2$ (рис. 5.9). Результирующее магнитное поле статора за $1/3$ периода поворачивается на 60° (рис. 5.9, б), а за период T тока оно поворачивается не на 360° , а на 180° .

При многополюсной обмотке статора за один период тока вращающееся магнитное поле статора поворачивается не на 360° , а на угол $360^\circ/p$, т. е. полный оборот делает за p периодов. Скорость вращения магнитного поля равна

$$\omega_1 = 2\pi/pT = \frac{2\pi f}{p} \text{ рад/с} \quad \text{или} \quad n_1 = 60 f/p \text{ об/мин.} \quad (5.1)$$

Как видно, частота вращения магнитного поля зависит не от режима работы двигателя и нагрузки на валу, а от частоты тока и числа пар полюсов поля статора. Так как число пар полюсов может быть только целым, то скорость вращения магнитного поля при стандартной частоте тока f в 50 Гц принимает определенные значения

| | | | | | | | |
|-------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| p | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 |
| n_1 | 3000 | 1500 | 1000 | 750 | 600 | 500 | 375 |

Направление вращения магнитного поля зависит от порядка чередования фаз. Для изменения направления вращения поля достаточно поменять местами любые две фазы из трех.

5.3 Вращающий момент асинхронного двигателя

Режим работы трехфазного асинхронного двигателя определяется взаимодействием токов в обмотках статора и ротора. Ток в обмотке статора создает вращающееся со скоростью n_1 магнитное поле, которое наводит согласно закону электромагнитной индукции в обмотке ротора ЭДС и ток. В результате взаимодействия обмотки ротора с током I_2 и вращающегося магнитного поля возникает электромагнитная сила $F_{эм}$, создающая вращающий момент, заставляющий ротор вращаться по направлению вращения магнитного поля. Ротор вращается асинхронно, т. е. его скорость вращения n меньше скорости вращения n_1 магнитного поля статора. Относительная разность скоростей вращения магнитного поля статора и ротора называется скольжением:

$$S = (n_1 - n)/n_1. \quad (5.2)$$

Скольжение не может быть равным нулю, так как при одинаковых скоростях поля и ротора прекратилось бы наведение токов в роторе и, следовательно, отсутствовал бы электромагнитный вращающий момент. **Скольжение двигателя может меняться от нуля до единицы.** При этом $S = 0$ соответствует режиму идеального холостого хода, когда ротор двигателя не испытывает противодействующего момента нагрузки, $S = 1$ – моменту пуска, в режиме реального

холостого хода $S = 0,2-0,7 \%$. Магнитное поле вращается относительно ротора со скоростью, пропорциональной скольжению:

$$n_1 - n = Sn_1. \quad (5.3)$$

Вращающий момент любого электродвигателя создается в результате взаимодействия магнитного поля и проводников с током. Для двигателей постоянного тока он равен $T = c_2 I_{\text{я}} \Phi$, где c_2 , – коэффициент пропорциональности, $I_{\text{я}}$ – ток якоря, Φ – магнитный поток возбуждения. В асинхронном двигателе вращающий момент выражается аналогичной формулой. Он пропорционален результирующему магнитному потоку Φ и активной составляющей тока в обмотке ротора, так как в механическую работу может превращаться только активная мощность:

$$T = c_2 I_2 \Phi \cos \varphi_2, \quad (5.4)$$

где c_2 – постоянная, зависящая от конструктивных особенностей двигателя, φ_2 – угол сдвига фаз между током и ЭДС ротора, Φ – результирующий магнитный поток; I_2 – активная составляющая тока ротора, $\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности.

При неизменном потоке вращающего магнитного поля и конструктивных параметрах ротора величина индуцируемой в роторе ЭДС E_2 пропорциональна скорости вращения магнитного поля относительно ротора (5.3), т.е. прямо пропорциональна скольжению:

$$E_2 = S \cdot E_{2\text{H}}, \quad (5.5)$$

где $E_{2\text{H}}$ – индуцированная ЭДС ротора при неподвижном роторе.

Ток в цепи ротора на основании закона Ома равен

$$I_2 = E_2 / \sqrt{R_2^2 + X_2^2},$$

где R_2 – активное сопротивление ротора, X_2 – индуктивное сопротивление ротора.

$$\text{Но } X_2 = \omega' \cdot L_2 = S\omega_1 L_2 = SX_{2\text{H}},$$

где L_2 – индуктивность ротора; $\omega' = S\omega_1$ – угловая скорость вращения магнитного поля относительно ротора; $X_{2\text{H}}$ – индуктивное сопротивление неподвижного ротора.

Тогда ток ротора через неизменные величины и скольжение S

$$I_2 = \frac{SE_{2\text{H}}}{\sqrt{R_2^2 + (SX_{2\text{H}})^2}} = \frac{E_{2\text{H}}}{\sqrt{(R_2/S)^2 + X_{2\text{H}}^2}}. \quad (5.6)$$

Ток в обмотке неподвижного ротора при $S = 1$ имеет наибольшее значение. По мере раскручивания ротора скольжение уменьшается, и при синхронной частоте вращения $S = 0$ ток становится равным нулю. Для определения ко-

эфициента мощности, показывающего, какая часть полной мощности преобразуется в механическую работу, можно воспользоваться формулой

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_{2H})^2}}. \quad (5.7)$$

Так как I_2 , $\cos \varphi_2$ зависят от скольжения, то и развиваемый двигателем момент зависит от скольжения. Подставив в формулу (5.4) значения I_2 и $\cos \varphi_2$, получим

$$T = c_2 I_2 \Phi \cos \varphi_2 = c_2 \Phi \frac{S E_{2H}}{\sqrt{R_2^2 + (SX_{2H})^2}} \cdot \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_{2H})^2}} = c_2 \Phi \frac{E_{2H} R_2}{R_2^2 / S + SX_{2H}^2}. \quad (5.8)$$

При $S = 0$ вращающий момент исчезает, с увеличением скольжения от нуля вращающий момент увеличивается, достигает максимума при $S_{кр}$, а при дальнейшем увеличении S стремится к нулю. Задаваясь различными значениями скольжения, можно построить график зависимости $T = f(S)$, который представлен на рис. 5.10.

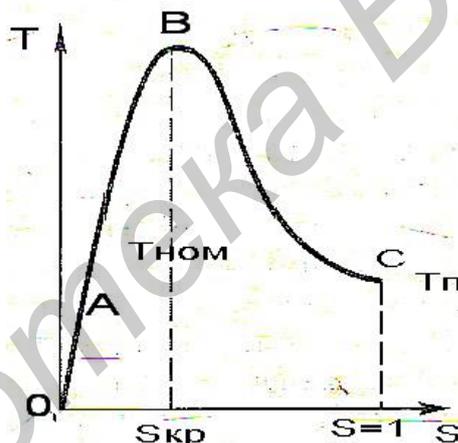


Рис. 5.10

На графике выделены три момента: номинальный вращательный момент $T_{ном}$, максимальный момент T_{max} и пусковой момент $T_{п}$. Скольжение, при котором вращательный момент максимален, называют оптимальным или критическим ($S_{кр} = 10 - 14 \%$). Двигатель рассчитывают так, чтобы максимальный момент в 23 раза превышал номинальный, а пусковой момент был не менее номинального. Небольшое значение $T_{п}$ – один из значительных недостатков асинхронного двигателя. Отношение $T_{max}/T_{ном}$ называют перегрузочной способностью λ двигателя. Зависимость $T = f(S)$ разделена на два участка: OB и BC . Участок от точки O до точки B соответствует устойчивым режимам работы асинхронного двигателя, при котором вращательный момент равен тормозному. Например, с увеличением момента нагрузки скорость вращения двигателя за-

медляется, скольжение увеличивается, и при этом растет вращающий момент. Новое положение равновесия достигается при равенстве вращательного и тормозного моментов, но двигатель при этом будет устойчиво вращаться с меньшей скоростью. Аналогично при уменьшении нагрузки на валу двигателя увеличивается скорость ротора, скольжение уменьшается, т. е. уменьшается развиваемый двигателем момент. Новое равновесие вращательного и тормозного моментов наступит при более высокой скорости вращения ротора. Под устойчивостью понимают способность двигателя восстанавливать установившуюся скорость вращения при кратковременных возмущениях путем изменения нагрузки, напряжения сети и пр.

Участок BC соответствует неустойчивым режимам работы двигателя: с увеличением момента нагрузки выше T_{\max} или $T_{\text{кр}}$ скольжение увеличивается, но вращающий момент уменьшается, и скорость двигателя уменьшается до остановки.

На участке OB $\cos \varphi_2$ изменяется незначительно и увеличение момента связано с увеличением тока в роторе, а на участке BC сила тока изменяется незначительно и уменьшение момента объясняется уменьшением $\cos \varphi_2$.

Вращающий момент достигнет максимума, когда знаменатель (5.8), т. е. выражение $(R_2^2/S + S_{2H}^2)$ достигнет минимума. Задаваясь численными значениями скольжения S , можно убедиться, что сумма имеет минимальное значение при равенстве членов этой суммы, т. е. $R_2^2/S = SX_{2H}^2$. При этом скольжение равно оптимальному, так как оно соответствует максимуму вращательного момента, т. е.

$$S = S_{\text{opt}} = R_2/X_{2H}. \quad (5.9)$$

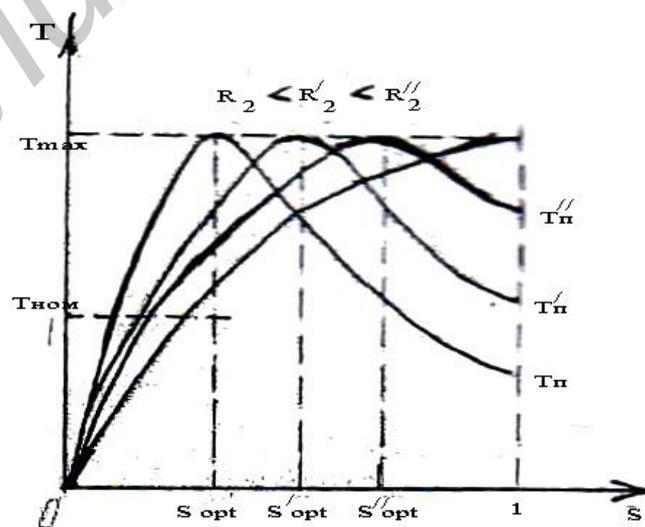


Рис. 5.11

Оптимальное (критическое) скольжение асинхронного двигателя при неизменном индуктивном сопротивлении прямо пропорционально активному сопротивлению обмотки ротора R_2 . Изменяя активное сопротивление обмотки ротора R_2 , можно менять положение максимума зависимости $T = f(S)$ (рис. 5.11). С увеличением R_2 максимум кривой $T = f(S)$ сдвигается в сторону больших значений скольжения.

Величину предельного момента T_{\max} , развиваемого двигателем, можно найти, подставив в формулу момента (5.8) значение оптимального скольжения $S_{opt} = R_2/X_{2H}$.

Тогда $T_{\max} = c_2 \Phi \frac{E_{2H}}{2X_{2H}}$, т. е. максимальный момент двигателя T_{\max} не зависит от активного сопротивления ротора.

5.4. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Под механической характеристикой понимают зависимость скорости вращения ротора от величины вращающего момента $n = f(T)$. Эту характеристику (рис. 5.12) можно построить, используя зависимость $T = f(S)$ и пересчитав скорость вращения ротора при разных значениях скольжения.

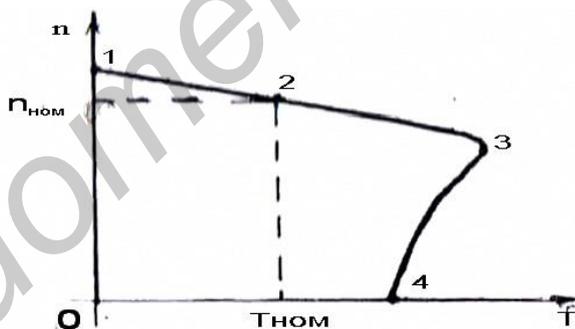


Рис. 5.12

Участок 1–3 зависимости $n = f(T)$ соответствует устойчивому режиму работы двигателя, участок 3–4 – неустойчивому. Точка 1 соответствует идеальному холостому ходу двигателя, когда $n = n_1$. Точка 2 соответствует номинальному режиму работы двигателя, ее координаты $n_{\text{ном}}$ и $T_{\text{ном}}$. Точка 3 соответствует максимальному (критическому) моменту. Точка 4 соответствует пусковому моменту двигателя $T_{\text{п}}$. Механическая характеристика имеет максимальный момент T_{\max} при $n = (0,8 \dots 0,9)n_1$, при $n = n_1$ момент $T = 0$, а при пуске $n = 0$ пусковой момент $T_{\text{п}} = (0,4-0,7) T_{\max}$.

Механическую характеристику можно рассчитать и построить по паспортным данным двигателя. Точка 1 соответствует синхронной скорости n_1 вращения двигателя. Координаты точки 2 определяют следующим образом: номинальная скорость $n_{\text{ном}}$ вращения задается в паспорте; номинальный момент рассчитывается по формуле

$$T_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}}/n_{\text{ном}} \text{ (Н}\cdot\text{м)}, \quad (5.10)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность двигателя в Вт, $n_{\text{ном}}$ – номинальная скорость вращения в об/мин. Точку 3 с координатой T_{max} рассчитывают из паспортного значения перегрузочной способности двигателя $T_{\text{max}}/T_{\text{ном}} = \lambda$, откуда $T_{\text{max}} = \lambda T_{\text{ном}}$, где λ – перегрузочная способность двигателя. Точка 4 имеет координаты $n = 0$ и $T = T_{\text{п}}$. Пусковой момент $T_{\text{п}}$ вычисляют по заданным паспортным данным $T_{\text{п}}/T_{\text{ном}} = \lambda_{\text{п}}$, откуда $T_{\text{п}} = \lambda_{\text{п}} T_{\text{ном}}$, где $\lambda_{\text{п}}$ – задаваемая в паспорте кратность пускового момента по отношению к номинальному.

Асинхронные двигатели имеют жесткую механическую характеристику, скорость вращения мало зависит от нагрузки на валу. Построенная по паспортным данным двигателя механическая характеристика называется естественной. Если изменять величину подведенного напряжения, активное сопротивление ротора или другие параметры, то можно получить механические характеристики, отличные от естественной, которые называют искусственными. На рис. 5.13 приведены механические характеристики двигателя при разной величине подведенного напряжения.

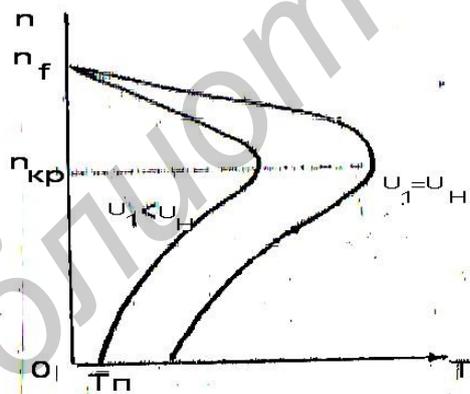


Рис. 5.13

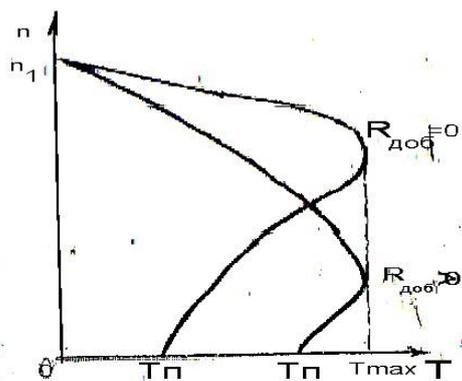


Рис. 5.14

Как следует из рис. 5.13, при понижении подведенного напряжения скорость вращения магнитного поля n_1 остается неизменной, а уменьшается критический T_{max} и пусковой $T_{\text{п}}$ моменты, т. е. снижается перегрузочная способность и ухудшаются пусковые свойства двигателя. При понижении подведенного напряжения механическая характеристика становится мягче. Скорость вращения асинхронных двигателей зависит от напряжения питания ($n \propto U$), а

вращающий момент пропорционален квадрату напряжения питания ($T \propto U^2$). Поэтому даже незначительные изменения напряжения питания приводят к заметному изменению вращающего момента и скорости вращения двигателя. Например, при снижении напряжения на 10 %, развиваемый двигателем момент снижается на 19 %.

На рис. 5.14 приведены механические характеристики двигателя при разной величине активного сопротивления ротора R_2 . При увеличении активного сопротивления обмотки ротора за счет введения реостата $R_{доб}$ в цепь фазного ротора сохраняется неизменным T_{max} , т. е. сохраняется перегрузочная способность двигателя, но происходит увеличение пускового момента. Скорость вращения в режиме идеального холостого хода остается неизменной, равной n_1 . С увеличением активного сопротивления обмотки ротора механическая характеристика становится мягче, т.е. ухудшается устойчивость работы двигателя.

5.5. Управление асинхронными трехфазными двигателями

К управлению двигателем относят пуск, изменение скорости и направления вращения (реверс). При пуске двигателя под нагрузкой необходимо, чтобы вращающий момент двигателя был больше момента нагрузки на валу, иначе двигатель не начнет вращаться. В момент включения двигателя, когда его ротор еще неподвижен и вращается медленно, магнитное поле статора пересекает обмотку ротора с наибольшей частотой. Вращающее магнитное поле статора наводит в обмотках статора и ротора ЭДС. ЭДС обмотки статора, являясь ЭДС самоиндукции, действует встречно приложенному к обмотке напряжению и ограничивает значение тока. Обмотка ротора замкнута, поэтому при пуске ток в 5–8 раз больше номинального. При пуске преследуют цели: уменьшение пускового тока и увеличение пускового момента.

Различают следующие способы пуска в ход асинхронных двигателей: прямое включение в цепь, пуск при пониженном напряжении, реостатный пуск, использование двигателей с улучшенными пусковыми свойствами.

Прямое включение в сеть допускается, если мощность двигателя не превышает 5 % от мощности трансформатора, от которого питается осветительная сеть. Это связано с бросками тока в момент пуска, что ведет к снижению напряжения.

Пуск при пониженном напряжении применяют, если из-за мощности двигателя недопустимо его прямое подключение в сеть из-за большого пускового тока. Понижение напряжения приводит к уменьшению пускового тока и уменьшению пускового момента двигателя. Если двигатель включается в сеть по схеме «треугольник», то переключение на время пуска обмотки ротора по

схеме «звезда» уменьшает линейный ток в 3 раза, при уменьшении пускового момента тоже в 3 раза. После разгона двигателя обмотку статора переключают на схему соединения треугольником. Основной недостаток этого способа пуска – невозможность пуска с нагрузкой на валу.

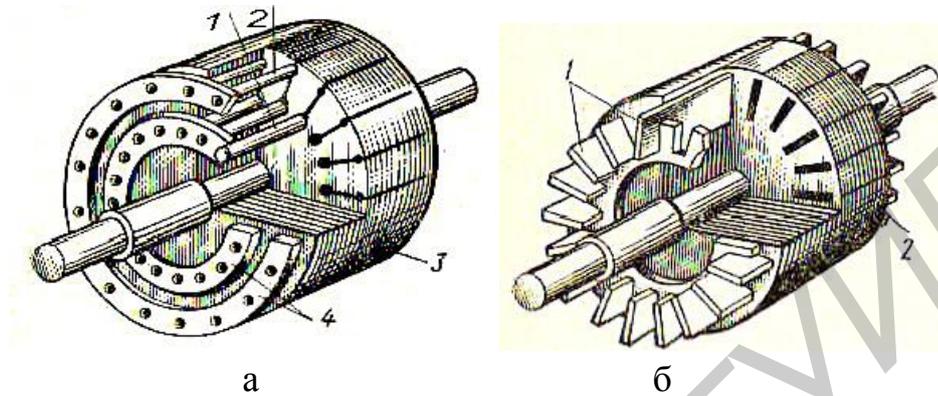


Рис. 5.15

Для двигателей с фазным ротором наличие контактных колец позволяет подключить к обмотке ротора пусковой реостат. Реостатный пуск служит для увеличения пускового момента (рис. 5.15), и одновременно происходит уменьшение пускового тока двигателя. По мере разгона двигателя пусковой реостат выводится, и после окончания пуска обмотки ротора оказываются замкнутыми накоротко.

Стремление совместить высокую надежность двигателей с короткозамкнутым ротором и большим пусковым моментом двигателей с фазным ротором привело к созданию асинхронных двигателей с улучшенными пусковыми свойствами. Различают двигатели с обмоткой в виде двойной «беличьей клетки» (рис. 5.15, а) и с глубоким пазом (рис. 5.15, б).

У двигателя с двойной «беличьей клеткой» на роторе закладываются две короткозамкнутые обмотки. Наружная обмотка выполняет роль пусковой, а внутренняя, расположенная ближе к оси ротора, является рабочей. Для получения повышенного пускового момента пусковая обмотка должна обладать большим активным сопротивлением, чем рабочая обмотка. Поэтому она выполняется из материала с повышенным удельным сопротивлением (латунь) и малым сечением проводников.

Рабочая обмотка, расположенная глубже, охватывается большим магнитным потоком и обладает большим индуктивным сопротивлением. Обе обмотки включены параллельно, поэтому ток ротора распределяется между ними обратно пропорционально их полным сопротивлениям. В момент пуска, когда частота тока в роторе максимальна, индуктивное сопротивление обмоток во много

раз больше их активных сопротивлений. Поэтому ток в рабочей обмотке из-за большого индуктивного сопротивления будет небольшим, и в создании пускового момента будет участвовать пусковая обмотка, имеющая большое активное сопротивление. После разгона роль реактивных сопротивлений в токораспределении становится незначительной, и ток проходит по рабочей обмотке с малым активным сопротивлением.

Аналогичная картина наблюдается у двигателя с глубоким пазом (рис. 5.15, б). Глубокий стержень 1 обмотки можно представить в виде нескольких проводников, расположенных по высоте паза. За счет высокой частоты тока в обмотке ротора в момент пуска происходит «вытеснение тока к поверхности проводника». За счет этого в создании пускового момента участвует только верхний слой проводников обмотки ротора. Сечение верхнего слоя значительно меньше сечения всего проводника. Поэтому при пуске обмотка ротора обладает повышенным активным сопротивлением, двигатель развивает повышенный пусковой момент. По мере разгона двигателя плотность тока по сечению проводников обмотки ротора выравнивается, сопротивление обмотки ротора снижается.

Эти двигатели имеют жесткие механические характеристики, повышенный пусковой момент и меньшую кратность пускового тока, чем двигатели с короткозамкнутым ротором обычной конструкции.

Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей.

При работе многих механизмов, приводимых во вращение асинхронными двигателями, возникает необходимость регулирования скорости вращения, которую можно выразить как

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60f(1-s)}{p} \text{ (об/мин)}, \quad (5.11)$$

где s – скольжение; f – частота подводимого тока; p – число пар полюсов обмотки статора.

Из выражения следует, что при заданной нагрузке скорость вращения ротора можно регулировать изменением скольжения, числа пар полюсов и частоты тока.

Способ регулирования скорости изменением скольжения используют для двигателей с фазным ротором с помощью регулировочного реостата в цепи ротора. Увеличение активного сопротивления ротора (рис. 5.11) не влияет на величину максимального (критического) момента, но увеличивает скольжение. При этом способе можно регулировать скорость в сторону понижения. К основным недостаткам способа относят следующие: способ неэкономичный, т. к. из-за потерь на регулировочном реостате снижается КПД; механическая харак-

теристика двигателя с увеличением активного сопротивления ротора становится мягче (рис. 5.14), т. е. снижается устойчивость работы двигателя.

При регулировании скорости вращения путем изменения числа пар полюсов используют многоскоростные двигатели, которые имеют более сложную обмотку статора, позволяющую изменять ее число пар полюсов, и короткозамкнутый ротор. Только короткозамкнутый ротор способен автоматически приобретать то же число пар полюсов, что и поле статора. Применяются двух- трех- и четырехскоростные двигатели. У двухскоростного двигателя обмотка каждой фазы состоит из двух полуобмоток. Включая их последовательно или параллельно, можно в 2 раза изменять число пар полюсов. У четырехскоростного двигателя на статоре должны размещаться две независимые обмотки с разным числом пар полюсов. Каждая из обмоток позволяет в два раза изменять число пар полюсов. Достоинства этого способа регулирования: сохранение жесткости механических характеристик, высокий КПД. Недостатки: ступенчатое регулирование, большие габариты и большая стоимость двигателя из-за усложнения конструкции.

Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей путем плавного изменения частоты f подводимого напряжения позволяет применять двигатели с короткозамкнутым ротором, при этом требуется наличие источника электрического тока переменной частоты. В качестве таких источников питания применяют статические преобразователи частоты, выполненные на полупроводниковых приборах – тиристорах. Для получения требуемой характеристики двигателя нужно менять не только частоту сети, но и величину напряжения. Например, при сохранении неизменным вращательного момента подводимое напряжение следует изменять прямо пропорционально частоте, т. е. $U/f = \text{const}$. Мощность двигателя при этом увеличивается прямо пропорционально скорости вращения.

Если требуется поддерживать режим постоянной мощности двигателя, которое пропорционально скорости вращения ротора, т. е. частоте, необходимо соблюдать условие $U_2/U_1 = \sqrt{f_2/f_1}$.

Для поддержания неизменным максимального вращательного момента следует иметь постоянный магнитный поток. Подводимое напряжение при этом должно меняться по закону $U = a + bf$, где a, b – постоянные.

Достоинства частотного способа: плавное регулирование, возможность повышать и понижать скорость вращения, сохранение жесткости механических характеристик, экономичность. Недостаток – стоимость полупроводниковых преобразователей частоты, сложность управления приводом, так как управлять

приходится двумя взаимосвязанными величинами при их нелинейных характеристиках.

Реверсирование, т. е. изменение направления вращения двигателя на противоположное осуществляют путем изменения мест любых двух фаз. Для этого используют трехполюсные переключатели или меняют местами две любые фазы на клеммовой колодке двигателя.

Трехфазные асинхронные двигатели широко используются благодаря простоте конструкции и надежности, низкой стоимости. К недостаткам асинхронных двигателей относят сложность способов регулирования скорости вращения, малый пусковой момент, *у них сравнительно низкий коэффициент мощности $\cos \varphi$* , который зависит от нагрузки.

Преимущества асинхронного двигателя особенно заметны, когда по условиям работы привода нет необходимости в плавном регулировании скорости вращения в широких пределах и в больших пусковых моментах.

Свойства трехфазных двигателей с мощностью до 600 Вт, т. е. микродвигателей мало отличаются от свойств трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором общепромышленного применения.

5.6. Однофазные асинхронные двигатели

В автоматических устройствах и электробытовых приборах, не требующих регулирования скорости вращения, используют асинхронные двигатели небольшой мощности до 600 Вт, т. е. микродвигатели.

К сети подключается однофазная обмотка статора, синусоидальный ток в которой создает пульсирующий магнитный поток. Обмотка ротора всегда короткозамкнутая, ее могут выполнить в виде полого алюминиевого цилиндра или в виде «белчьего колеса». Обмотка статора создает неподвижное в пространстве и пульсирующее во времени с частотой изменения тока магнитное поле с потоком Φ . По воздействию на ротор неподвижное пульсирующее поле эквивалентно двум полям с потоками $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi/2$, вращающимся в противоположных направлениях. При неподвижном роторе воздействие обоих полей на ротор одинаково. Они будут индуцировать в обмотке ротора токи, взаимодействие которых с магнитным полем приводит к возникновению сил, противоположно направленных в правой и левой половинах ротора, вследствие чего результирующий момент, действующий на ротор, будет равным нулю. Следовательно, при наличии одной обмотки в статоре начальный пусковой момент однофазного двигателя равен нулю, т. е. такой двигатель самостоятельно не сможет тронуться с места.

Раскрутим принудительно ротор до скорости вращения n . Вращающееся в сторону вращения ротора магнитное поле назовем прямым с прямым потоком

Φ_1 , а магнитное поле, вращающееся навстречу ротору, назовем обратным с обратным потоком Φ_2 .

Скольжение ротора относительно прямого поля обозначим $S_{\text{пр}} = (n_1 - n)/n_1$, и относительно обратного поля

$$S_{\text{обр}} = (n_1 + n)/n_1 = [n_1 + (1 - S_{\text{пр}})n_1]/n_1 = 2 - S_{\text{пр}},$$

где n_1 – скорость вращения магнитного поля.

Скорость вращающегося магнитного поля ($n_1 = \frac{60f}{p}$) пропорциональна частоте тока. Скорость ротора относительно поля в направлении прямого потока $n_1 - n = S_{\text{пр}} \cdot n_1$, а в направлении обратного потока $n_1 + n = S_{\text{обр}} \cdot n_1$. Поэтому частота тока в роторе, создаваемого прямым полем, равна $S_{\text{пр}} \cdot f$, а частота тока, создаваемого обратным полем $S_{\text{обр}} \cdot f$. Так, если частота тока в сети $f = 50$ Гц, а скольжение $S_{\text{пр}} = 0,02$, то частота индуцируемого прямым полем прямого тока $f_{\text{пр}} = S_{\text{пр}} \cdot f = 0,02 \cdot 50 = 1$ Гц, а частота индуцируемого обратным полем обратного тока $f_{\text{обр}} = (2 - S_{\text{пр}}) \cdot f = 1,98 \cdot 50 = 99$ Гц.

Индуктивное сопротивление обмотки ротора пропорционально частоте тока ($X_L = \omega L = 2\pi fL$) и для прямого тока на два порядка меньше, чем для обратного тока. Вследствие этого прямой ток и прямой вращающий момент много больше обратного тока и обратного вращающего момента. Вследствие большого индуктивного сопротивления сдвиг фаз при обратном токе будет значительно больше, а коэффициент мощности $\cos \varphi$ будет мал. Таким образом, вращение ротора будет поддерживаться вращающим моментом прямого тока.

Обычно пуск однофазных двигателей осуществляют с помощью того или иного пускового устройства. Работа этих устройств основана на создании вращающегося магнитного поля путем использования двух магнитных потоков, смещенных в пространстве на 90° и сдвинутых по фазе на $\pi/2$.

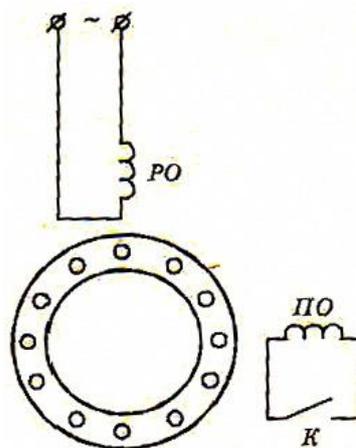


Рис. 5.16

Однофазные двигатели с пусковой обмоткой. На статоре такого двигателя кроме рабочей обмотки РО находится пусковая обмотка ПО (рис. 5.16), повернутая в пространстве относительно рабочей на 90° . В момент пуска пусковая обмотка замыкается кнопкой К, и в ней в результате трансформаторной связи возникает ток, сдвинутый по фазе относительно питающего тока почти на $\pi/2$. Эти токи создают вращающее магнитное поле, которое и разгоняет ротор. После разгона пусковая обмотка размыкается и в дальнейшем работе двигателя не участвует.

Однофазные конденсаторные двигатели. В этих двигателях рабочая и пусковая обмотки статора также смещены на статоре друг относительно друга на 90° . Во время пуска пусковую обмотку ПО подключают к сети с помощью кнопки К через конденсатор С (рис. 5.17), благодаря которому ток в пусковой обмотке отличается по фазе от тока в рабочей обмотке на $\pi/2$, чем и обеспечивается разгон ротора.

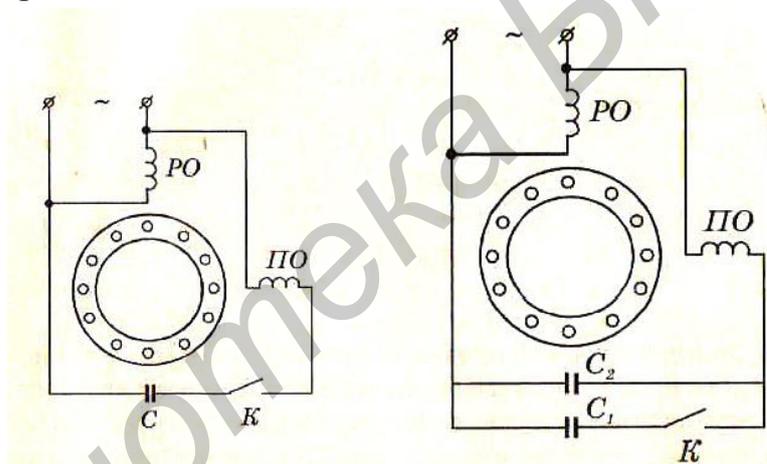


Рис. 5.17

Рис. 5.18

В некоторых двигателях используются два параллельно включенных конденсатора C_1 и C_2 – оба используются при запуске, а один из них (C_2) остается включенным и во время работы двигателя, благодаря чему обе обмотки являются рабочими (рис. 5.18). Конденсаторные двигатели имеют лучшие пусковые и рабочие характеристики по сравнению с другими однофазными двигателями, поэтому они получили наиболее широкое распространение. Недостатком конденсаторных двигателей являются большие габариты и масса конденсаторов.

Однофазные двигатели с расщепленными полюсами применяются для маломощного привода (вентиляторы и т. п.). Статор таких маломощных двигателей часто делают с явно выраженными полюсами, причем каждый полюс разрезан, а на одну его часть надето медное кольцо, играющее роль пусковой обмотки (рис. 5.19).

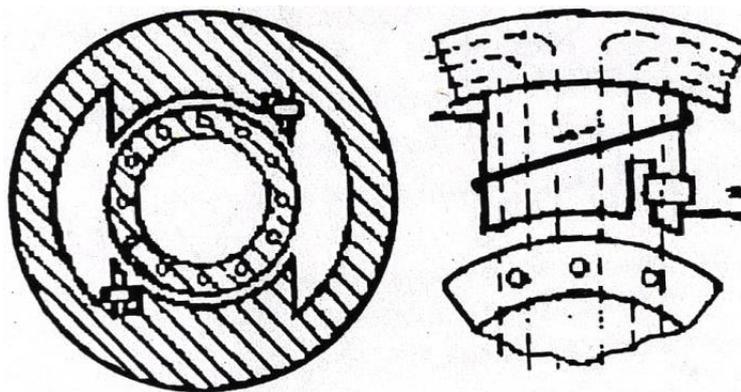


Рис. 5.19

Под действием переменного магнитного потока, создаваемого обмоткой статора, в кольце индуцируется ЭДС, отстающая по фазе от потока на $\pi/2$. Эта ЭДС создает в кольце ток. Так как сопротивление кольца практически чисто активное, ток в кольце совпадает по фазе с ЭДС и отстает от потока обмотки на $\pi/2$. Ток в кольце создает свой магнитный поток, совпадающий с ним по фазе. Под полюсом действуют два сдвинутых по фазе на $\pi/2$ магнитных потока, образуя вращающееся магнитное поле, которое увлекает за собой короткозамкнутый ротор. Двигатели с короткозамкнутым витком обладают простотой конструкции и высокой надежностью в эксплуатации, но имеют низкие $\cos \varphi$, КПД и пусковой момент.

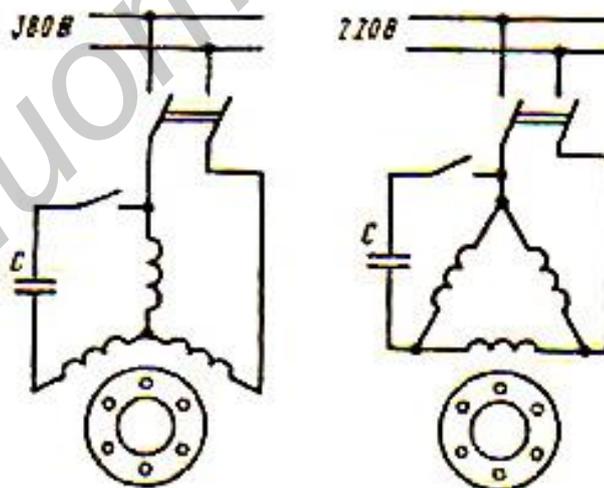


Рис. 5.20

Трехфазный асинхронный двигатель может работать в однофазной сети переменного тока. При подключении трехфазного двигателя в однофазную сеть нужно из трех фазных обмоток статора создать рабочую и пусковую обмотку. Рабочая обмотка подключается в сеть, а пусковая соединяется с конденсатором

и подключается параллельно рабочей обмотке, т. е. в цепь одной из обмоток статора включен конденсатор. Для получения вращающегося магнитного поля необходимо, чтобы магнитные потоки пусковой и рабочей обмотки были смещены в пространстве и сдвинуты по фазе. При этом необходимо, чтобы допустимое фазное напряжение двигателя было равно или близко к напряжению сети (рис. 5.20).

Для нормальной работы трехфазного асинхронного двигателя, подключенного в однофазную сеть, необходимо правильно подобрать емкость конденсаторов. При круговом вращении магнитного поля реактивная мощность конденсатора должна быть равна полной мощности двигателя:

$$P = C\omega U^2 = C2\pi fU^2.$$

Из этой формулы, при $f = 50$ Гц определим емкость конденсатора:

$$C = P \cdot 10^6 / 314U^2, \quad (5.12)$$

где P – мощность двигателя в Вт; U – напряжение сети, В; C – емкость конденсатора, мкФ.

Пусковая обмотка после пуска двигателя может быть отключена. Подключение пусковой обмотки на весь период работы двигателя улучшает его механические характеристики. Мощность трехфазного двигателя при однофазном включении зависит от $\cos \varphi$.

Однофазный двигатель не имеет пускового момента, он вращается в ту сторону, в которую приводится внешней силой. Скорость вращения однофазного двигателя при холостом ходе меньше, чем у трехфазного, из-за наличия тормозного момента, образуемого обратным магнитным полем. Из-за наличия обратного потока характеристики однофазного двигателя хуже, чем у трехфазного: меньший КПД, меньшая перегрузочная способность, мощность составляет 2/3 мощности трехфазного двигателя того же габарита.

5.7. Асинхронные исполнительные двигатели

В качестве исполнительных двигателей переменного тока служат двухфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (рис. 5.21). Они применяются в системах автоматики и управления, служат для преобразования подводимого к ним электрического сигнала в механическое перемещение вала. При заданном тормозном моменте скорость вращения двигателя должна строго соответствовать подводимому напряжению и изменяться в широком диапазоне при изменении его величины или фазы. Исполнительные двигатели являются управляемыми.

На статоре располагаются две обмотки, сдвинутые в пространстве на угол 90° . Одна из обмоток В статора, называемая обмоткой возбуждения, подключается

ется к сети переменного тока с постоянным действующим значением напряжения U_B . Ко второй обмотке Y статора, называемой обмоткой управления, подводится напряжение управления U_y от управляющего устройства УУ. Различают три основных способа управления скоростью вращения двигателя: амплитудное, фазовое и амплитудно-фазовое.

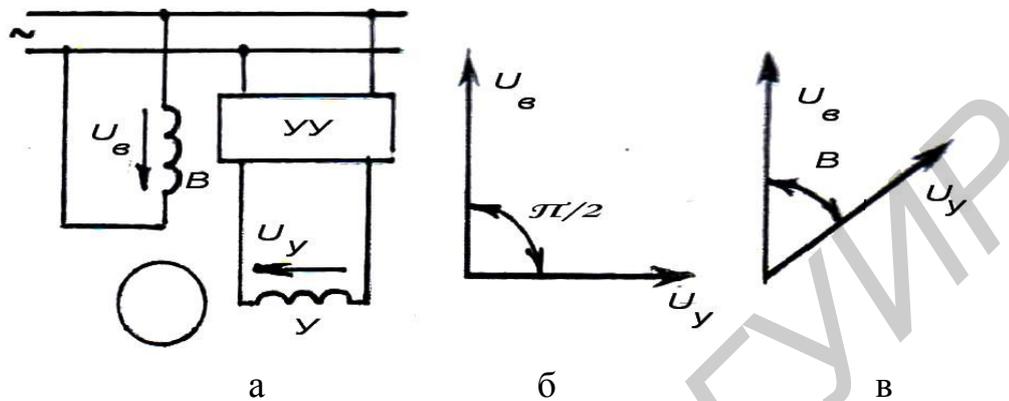


Рис. 5.21

Амплитудное управление характеризуется тем, что изменяется только амплитуда напряжения управления или пропорциональное ей действующее значение U_y этого напряжения. Векторы напряжений управления и возбуждения при всех значениях напряжения U_y образуют угол 90° (рис. 5.21, б).

Напряжение управления выражают обычно в относительных единицах как отношение U_y к напряжению возбуждения U_B , приведенному к числу витков w_y обмотки управления. Это отношение называют эффективным коэффициентом сигнала:

$$\alpha_s = kU_y/U_B,$$

где $k = w_B/w_y$ – отношение чисел витков соответственно обмоток возбуждения и управления, коэффициент трансформации.

Фазовое управление характерно тем, что напряжение управления U_y остается неизменным по величине, а регулирование частоты вращения достигается путем изменения угла сдвига фаз β между векторами напряжений возбуждения и управления (рис. 5.21, в). За коэффициент сигнала при фазовом управлении принимается синус угла сдвига фаз β между векторами U_y и U_B , т. е. $\alpha = \sin \beta$.

Амплитудно-фазовое управление характеризуется тем, что изменяется и амплитуда напряжения управления и угол сдвига фаз между напряжениями U_y и U_B , подаваемыми на обмотку статора. Для реализации этого способа могут быть применены две схемы. В одной из них напряжение возбуждения U_B оставляют постоян-

ным, а напряжение управления U_y изменяют по величине и фазе. В другой схеме в цепь обмотки возбуждения включают фазосдвигающий конденсатор (рис. 5.22), а управление двигателем осуществляют путем изменения по величине напряжения управления U_y .

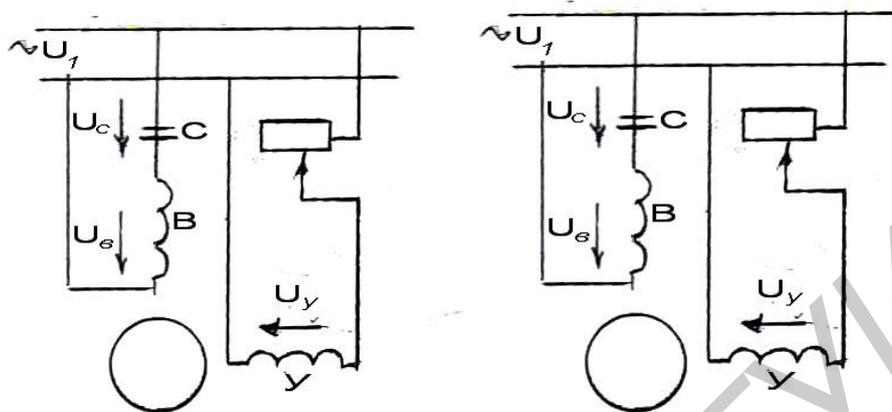


Рис. 5.22

При всех методах управления скорость вращения асинхронного двигателя изменяется за счет образования несимметричного эллиптического магнитного поля, которое можно представить в виде двух круговых вращающихся полей прямой и обратной последовательности. **Изменение напряжения на обмотке управления по величине или фазе приводит к изменению соотношений между амплитудами магнитных потоков прямой и обратной последовательностей.** При этом меняется скорость двигателя и механическая характеристика. Уменьшение скорости вращения достигают путем увеличения поля обратной последовательности, которое создает тормозной момент. При этом возрастают и потери мощности в двигателе.

Помимо общих требований (малые габариты и масса, надежность работы, высокий КПД, экономичность и т. д.) к исполнительным двигателям предъявляют и специфические требования: отсутствие самохода или управляемость при всех режимах работы, линейность механических характеристик, быстрое действие, бесшумность работы, малая мощность управления, отсутствие радиопомех и др.

Самоход может возникать в исполнительных двигателях при амплитудном управлении, когда отсутствует напряжение на обмотке управления и при фазовом управлении, когда напряжения U_y и U_B совпадают по фазе. При $U_y = 0$ двигатель можно рассматривать как однофазный. В этом случае прямое и обратное магнитные поля равны по величине, а результирующий вращательный момент $T_{рез} = T_{пр} - T_{обр}$. Но использовать такой двигатель в качестве исполни-

тельного нельзя, так как при $\alpha = 0$ он не останавливается, т. е. теряет управление. Чтобы двигатель останавливался в однофазном режиме, следует выдерживать требование $T_{\text{обр}} > T_{\text{пр}}$, т. е. условием отсутствия самохода в двигательном режиме при $1 > S > 0$, когда $n_1 > n > 0$, является выполнение неравенства

$$T_{\text{рез}} = T_{\text{пр}} - T_{\text{обр}} < 0,$$

которое выполняется при $S_{\text{кр}} \geq 1$. Обычно самоход исключается при условии, что $S_{\text{кр}} = 1,1 \dots 1,2$, что достигается применением ротора с повышенным сопротивлением. Такое высокое $S_{\text{кр}}$ хотя и снижает КПД двигателя, но надежно обеспечивает отсутствие самохода (управляемость) двигателя. Для увеличения активного сопротивления стержни ротора с обмоткой типа «белые колесо» выполняют из материала с повышенным удельным сопротивлением (латунь, фосфористая бронза и др.) и малым поперечным сечением. Конструкция такого двигателя не отличается от конструкции обычного асинхронного двигателя. Основным недостатком двигателя – большой момент инерции ротора, снижающий быстродействие двигателя. Для уменьшения момента инерции таких двигателей применяют роторы малого диаметра с отношением длины к диаметру, равным $1,6 \dots 2,4$.

Значительное распространение имеют исполнительные двигатели с полым немагнитным ротором и внешним статором, на котором расположены две обмотки, сдвинутые в пространстве на угол 90° . Ротор выполнен в виде тонкостенного полого алюминиевого цилиндра. Для уменьшения магнитного сопротивления двигателя имеется внутренний статор, набираемый из листов, как и внешний статор. При прохождении тока по обмоткам статора создается вращающееся магнитное поле и в роторе индуцируется ЭДС и вихревые токи, которые, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем, создают вращающий момент.

Сравнение способов управления двигателями позволяет сделать следующие выводы:

- линейность механических характеристик выше всего при фазовом управлении, амплитудно-фазовое управление дает наибольшее отклонение от прямой линии;
- мощность управления при амплитудном и амплитудно-фазовом управлении одинакова и пропорциональна квадрату коэффициента сигнала. При фазовом управлении мощность управления больше, чем при других методах управления;
- амплитудно-фазовое управление (конденсаторная схема рис. 5.22) осуществляется наиболее просто, так как оно не требует специальных устройств

для сдвига фаз между напряжениями управления и возбуждения. Это объясняет широкое применение данного вида управления в системах автоматики.

5.8. Синхронные двигатели

Устройство статора синхронного двигателя аналогично устройству статора асинхронного двигателя. Трехфазная распределенная обмотка статора располагается в пазах статора и питается от трехфазной сети.

Ротор представляет собой магнит, у маломощных двигателей он состоит из постоянных магнитов, у остальных – из электромагнита с числом пар полюсов, равным числу пар полюсов вращающегося магнитного поля статора. В этом случае обмотка ротора катушечная, питается постоянным током и называется обмоткой возбуждения. Вращающуюся обмотку соединяют с источником постоянного тока при помощи коллектора и щеток. Для питания обмотки возбуждения постоянным током на валу двигателя размещен возбудитель – генератор постоянного тока.

Пуск синхронного двигателя осуществляется, как и асинхронного, для этого на роторе укладывают специальную пусковую обмотку в виде «беличьей клетки» из материала с повышенным удельным сопротивлением. При включении синхронного двигателя в сеть пусковая короткозамкнутая обмотка разгоняет ротор без нагрузки. При скорости, близкой к скорости вращения магнитного поля ($\approx 95\%$ синхронной скорости), обмотку возбуждения ротора подключают к источнику постоянного тока. В одних двигателях во время пуска обмотка ротора замыкается на компенсационное сопротивление, в других – пуск проводят без отключения обмотки ротора. Взаимодействие полюсов вращающегося магнитного поля статора и полюсов ротора обеспечивает вращение ротора со скоростью вращающегося магнитного поля. Двигатель автоматически входит в синхронизм, а пусковая обмотка как бы автоматически отключается, так как при одинаковой скорости ротора и магнитного поля ЭДС в ней и соответственно ток равны нулю.

Принцип работы синхронного двигателя поясняется на рис. 5.23. Внутри магнита N_1S_1 помещен магнит NS . Если магнит N_1S_1 вращать, то он потянет за собой магнит NS . В стационарном режиме скорость вращения обоих магнитов постоянна. К валу магнита NS можно приложить нагрузку. Чем больше эта нагрузка, тем больше угол отставания оси магнита NS от оси магнита N_1S_1 . При некоторой нагрузке силы притяжения между магнитами будут преодолены, и ротор остановится.

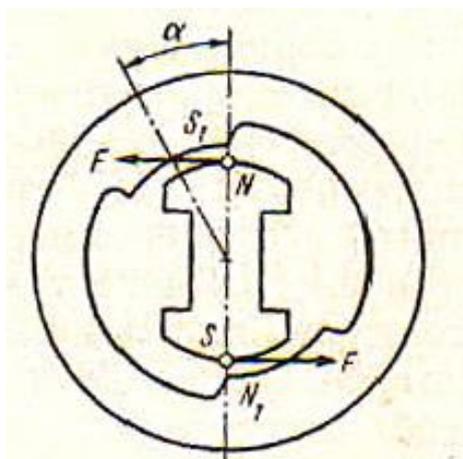


Рис. 5.23

Для остановки синхронного двигателя сначала отключают статор и лишь после этого размыкают цепь возбуждения. Несоблюдение такой последовательности приведет к чрезмерному увеличению тока в обмотке ротора, перенапряжению в обмотке статора и в разомкнутой обмотке возбуждения.

Синхронные двигатели используют в тех областях техники, где требуется постоянство скорости вращения, например, при записи и воспроизведении звука, в аппаратах связи, гироскопах, в оборудовании для шахт. Механическая характеристика синхронных двигателей абсолютно жесткая. Особенно удобны синхронные двигатели для привода роторов гироскопов. При этом скорость вращения ротора зависит только от частоты питающего тока и конструкции двигателя. Момент входа двигателя в синхронизм соответствует вращающему моменту $T_{\text{вх}} = (1,2-1,5)T_{\text{ном}}$, где $T_{\text{ном}}$ – номинальный момент двигателя. Момент нагрузки $T_{\text{вых}}$, при котором двигатель выходит из синхронизма, определяет перегрузочную способность синхронного двигателя, обычно $T_{\text{вых}} = (2,5-3,0)T_{\text{ном}}$.

Регулировать скорость вращения путем изменения числа полюсов в синхронном двигателе нецелесообразно, так как в отличие от асинхронного здесь требуется изменить число пар полюсов как на статоре, так и на роторе, что приводит к значительному изменению конструкции ротора. Поэтому для изменения скорости вращения используют лишь изменение частоты питающего напряжения.

У синхронных двигателей более сложная конструкция и более сложный пуск, чем у асинхронных; более сложный уход и обслуживание ввиду наличия коллекторного возбуждателя. Но синхронные двигатели менее чувствительны ($T = f(U)$) к колебаниям питающего напряжения, чем асинхронные, у которых $T = f(U^2)$.

5.9. Синхронные микродвигатели

Синхронные микродвигатели мощностью от долей ватта до нескольких сотен ватт широко применяют в автоматических устройствах и устройствах, где требуется поддерживать постоянную скорость вращения (в электрических часовых механизмах, в лентопротяжных механизмах, радиоаппаратуре, программных устройствах в системах звуко- и видеозаписи, в самопишущих приборах, где требуется обеспечить постоянство скорости вращения отдельных элементов системы при изменении нагрузки и напряжения питания и пр.), а также в системах синхронной связи. Синхронные микромашины применяют в качестве генераторов для получения переменного тока повышенной частоты и измерения частоты вращения (тахогенераторы).

В зависимости от особенностей электромагнитной системы синхронные микродвигатели подразделяют на двигатели с постоянными магнитами; реактивные двигатели и шаговые (импульсные) двигатели. Их выполняют без обмотки возбуждения на роторе, что значительно повышает их эксплуатационную надежность и упрощает конструкцию.

Микродвигатели с постоянными магнитами (рис. 5.24)

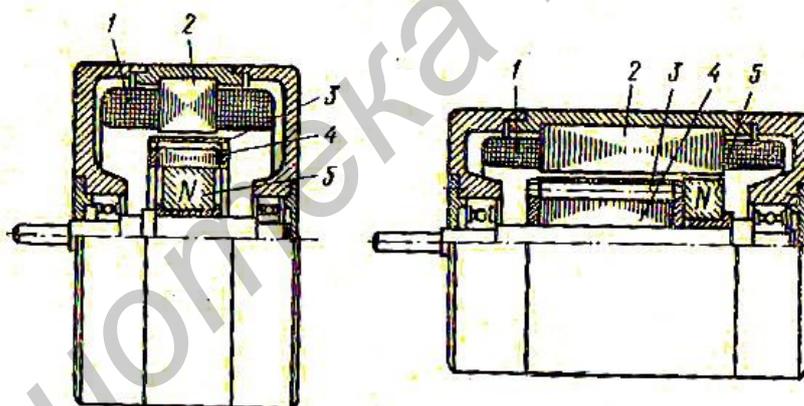


Рис. 5.24

Роль обмотки возбуждения ротора выполняет блок постоянных магнитов 5 из магнитотвердого материала, обладающего большой коэрцитивной силой (кобальтовая сталь; сплавы из алюминия, никеля, железа и кобальта). Статор 2 имеет обычную конструкцию, в его пазах размещают трех- или двухфазную обмотку 1. На роторе кроме блока постоянных магнитов устанавливают собранный из листовой стали пакет (сердечник) 4, в пазах которого размещают пусковую короткозамкнутую обмотку 3 типа «беличья клетка», которая по окончании процесса пуска выполняет роль демпфера, препятствующего качаниям ротора. Наибольшее применение получили микродвигатели двух кон-

структивных исполнений: с радиальным (рис. 5.24, а) и аксиальным (рис. 5.24, б) расположением блока постоянных магнитов 5.

В первом случае пакет выполнен в виде кольца, напрессованного на блок постоянных магнитов. Во втором случае пакет 4 ротора насаживают непосредственно на вал, а по краям его устанавливают один или два блока постоянных магнитов, выполненных в виде дисков.

Пуск синхронных микродвигателей производят непосредственным включением в сеть. Разгон двигателя осуществляется за счет асинхронно вращающего момента, возникающего в результате взаимодействия вращающего магнитного поля статора с током в пусковой обмотке. При питании двигателя от однофазной сети в цепь одной из фаз включают конденсатор, необходимый для создания вращающего магнитного поля. Характерной особенностью рассматриваемого двигателя является то, что при пуске кроме асинхронного вращающего момента возникает еще тормозной момент из-за наличия на роторе постоянных магнитов. В процессе разгона двигателя поле постоянных магнитов пересекает обмотку статора и индуцирует в ней ЭДС и соответственно ток, который, взаимодействуя с магнитным потоком ротора, создает в ней тормозящий момент.

Двигатели с постоянными магнитами по сравнению с другими синхронными микродвигателями обладают хорошими энергетическими показателями (КПД и $\cos \varphi$), повышенной устойчивостью работы в синхронном режиме и высокой стабильностью частоты вращения. Недостатком их является сравнительно высокая стоимость из-за дороговизны материалов постоянных магнитов и большая кратность пускового тока.

Реактивные микродвигатели. Реактивным называют синхронный двигатель с явно полюсным ротором без обмотки возбуждения и постоянных магнитов, у которого магнитный поток создается реактивным током, протекающим по обмотке статора. Статор реактивного двигателя имеет трех- или двухфазную обмотку с конденсатором в одной из фаз. Ротор синхронного реактивного двигателя имеет явно полюсную конструкцию и выполняется из магнитомягкого материала. Он должен обеспечивать потоку неодинаковое магнитное сопротивление по продольной и поперечной осям. Электромагнитная связь между ротором и статором осуществляется посредством общего магнитного потока, сцепленного с ними. Вращающий момент в таком двигателе возникает из-за различия магнитных проводимостей по продольной и поперечной осям. При этом явно выраженные полюса ротора стремятся ориентироваться относительно поля так, чтобы магнитное сопротивление для силовых линий поля было минимальным. При синхронной скорости вращения ось магнитного поля ротора и

ось поля статора из-за усилий, приложенных к ротору, смещаются. Вследствие этого возникают тангенциальные составляющие сил F_T взаимодействия между ротором и статором (рис. 5.25), образующие вращающий момент, поэтому ротор вращается в том же направлении и с той же скоростью вращения n_1 , что и поле статора.

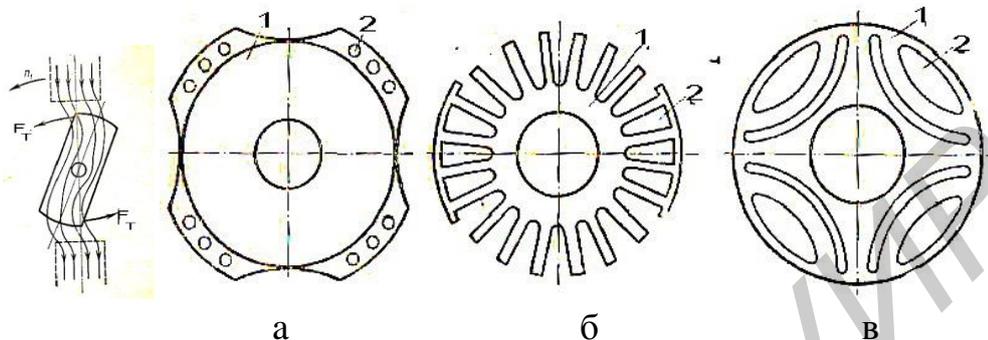


Рис. 5.25

Рис. 5.26

Ротор двигателя может иметь различное конструктивное исполнение (рис. 5.26). Его собирают из стальных листов, аналогично роторам асинхронных двигателей. Листы имеют впадины, обеспечивающие по осям различные индуктивные сопротивления. Для пуска двигателя на роторе предусмотрена короткозамкнутая обмотка типа «беличья клетка».

При использовании современных усовершенствованных конструкций ротора (рис. 5.26, б, в) пазы или вырубki в листах заливают алюминием.

Реактивные двигатели проще в конструкции, надежнее в работе и дешевле по сравнению с двигателями с обмоткой возбуждения и постоянными магнитами на роторе. Основные недостатки – небольшой пусковой момент и сравнительно низкий $\cos \varphi$, не превышающий 0.5. Последнее объясняется тем, что магнитный поток создается только за счет реактивного тока обмотки статора, величина которого из-за повышенного сопротивления магнитной цепи двигателя незначительна.

5.10. Шаговые двигатели

Шаговые двигатели (ШД) представляют собой синхронные микродвигатели, у которых питание фаз обмотки статора осуществляется путем подачи импульсов напряжения от коммутатора. Под воздействием каждого такого импульса ротор двигателя совершает угловое перемещение, называемое шагом.

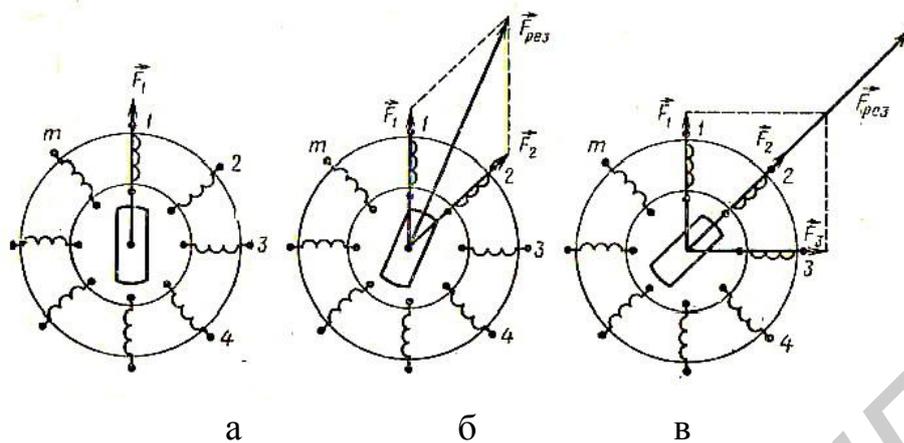


Рис. 5.27

На рис. 5.27 изображена схема m -фазного шагового двигателя без обмотки возбуждения на роторе. Если питать поочередно фазы 1, 2, 3, ..., m обмотки статора однополярными импульсами напряжения, то ротор двигателя будет скачкообразно перемещаться в положения, при которых его ось совпадет с осями фаз 1, 2, 3, и т. д. Ротор будет иметь m устойчивых состояний, соответствующих направлению вектора магнитодвижущей силы F обмотки в заданный момент времени, а шаг ротора равен $2\pi/m$ (рис. 5.27, а). Для увеличения результирующей магнитодвижущей силы $F_{рез}$, а следовательно, магнитного потока и синхронизирующего момента питание подают на две, три и большее количество фаз. Если, например, подать питание на две фазы, то положение результирующего вектора $F_{рез}$ и оси ротора совпадают с линией, проходящей между осями двух соседних фаз (рис. 5.27, б). При подаче питания одновременно на три соседние фазы ротор перемещается в положение, совпадающее с осью средней фазы (рис. 5.27, в). Если же поочередно включать то четное (две), то нечетное (одна, три) число фаз, то ротор двигателя будет иметь $2m$ устойчивых состояний и шаг, равный π/m .

В качестве шаговых двигателей применяют синхронные двигатели без пусковой обмотки на роторе: с постоянными магнитами на роторе и реактивные. Для уменьшения шага шаговые двигатели выполняют многополюсными.

Применяют шаговые двигатели для привода механизмов, имеющих старто-стопное движение, или механизмов с непрерывным движением, если управляющий сигнал задан в виде последовательности импульсов (устройства для ввода и вывода информации, счетчики, приводы станков с программным управлением и т. п.).

К основным характеристикам шаговых двигателей помимо шага относят также синхронизирующий и пусковой моменты, перегрузочную способность, статическую и динамическую ошибки шага и др.

Шаговые двигатели являются многофазными и многополюсными электрическими машинами. Управление может быть однополярным, когда напряжение на каждой фазе изменяется только по величине (от нуля до U), и разнополярным – при изменении напряжения по величине и по знаку в пределах $\pm U$. Оно может быть симметричным, если для каждого устойчивого состояния ротора (в каждом такте) возбуждается одинаковое число обмоток, и несимметричным, если четным и нечетным тактам коммутации соответствует возбуждение разного числа обмоток.

Шаговые двигатели с постоянными магнитами выполняются в виде многополюсной машины, число пар полюсов с целью уменьшения шага выбирают максимально возможным. Ротор состоит из постоянных магнитов, закрепленных на валу. Статор имеет явно выраженные полюсы, вокруг которых в полузакрытых пазах размещают катушки обмотки фаз (двух-, трех- и четырехфазных). В двигателе с двухфазной обмоткой (рис. 5.28) при последовательной подаче импульсов напряжения на катушки полюсов обмотки якоря ось магнитного потока скачкообразно перемещается на 90° .

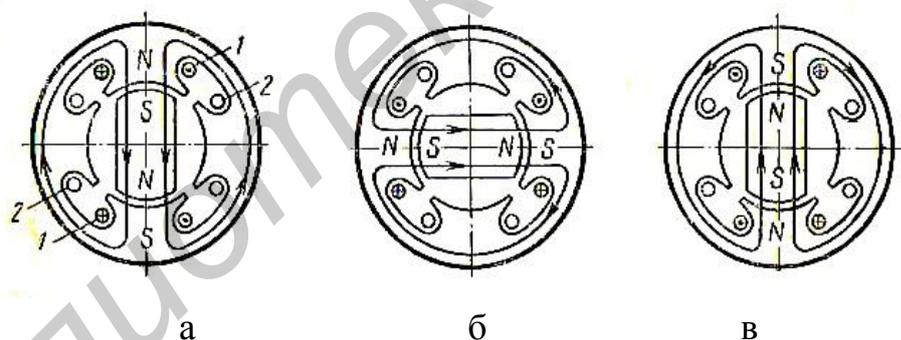


Рис. 5.28

В результате под действием синхронизирующего момента при каждом импульсе ротор поворачивается на 90° . В рассматриваемом двигателе магнитное поле может иметь четыре различных состояния, которым соответствуют различные направления тока в фазах 1 и 2 обмотки. Каждому импульсу тока соответствует определенное положение ротора двигателя. Чтобы изменить направление вращения ротора, необходимо изменить полярность включения одной из фаз статора, не меняя очередности их коммутации. Чаще шаговые двигатели имеют четырехфазную обмотку, которая в отличие от двухфазной может управляться однополярными импульсами напряжения, что значительно упрощает конструкцию электронного коммутатора.

В шаговых реактивных двигателях ротор имеет явно полюсную конструкцию и выполняется из магнитомягкого материала. На статоре располагают трехфазную сосредоточенную обмотку, фазы которой получают питание от электронного коммутатора. На рис. 5.29 схематично показаны три такта работы двигателя.

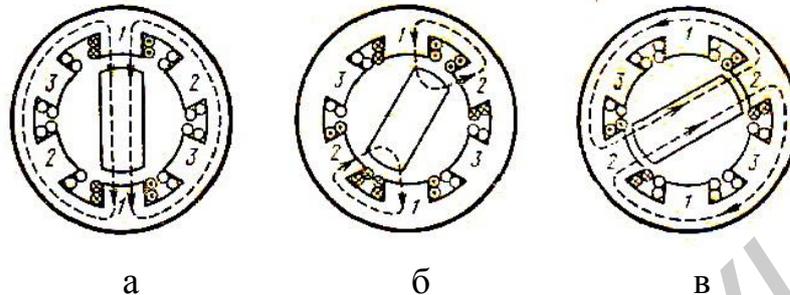


Рис. 5.29

Когда по фазе 1 проходит ток, ротор занимает положение, показанное на рис. 5.29, а. При подаче напряжения одновременно на фазы 1 и 2 ротор поворачивается в положение, представленное на рис. 5.29, б. Далее напряжение с фазы 1 снимают и ротор перемещается в положение, представленное на рис. 5.29, в. Применяют обычно шеститактную коммутацию, которая дает меньший шаг. Шаг двигателя можно уменьшить, увеличив число выступов на роторе. Например, применяя двигатель с крестообразным ротором, при рассмотренной выше последовательности подачи импульсов получают шаг, равный 15° .

Электромагнитный (синхронизирующий) момент двигателя является результатом взаимодействия потока ротора с дискретно вращающимся магнитным полем статора. Ротор стремится занять такое положение в пространстве, при котором магнитное сопротивление минимально, а оси потока статора и ротора совпадают. В качестве недостатка реактивных ШД следует отметить отсутствие синхронизирующего момента при обесточенных обмотках статора.

Однофазные шаговые двигатели отличаются простотой системы управления. На рис. 5.30, а показана схема ШД с клювообразным ротором. При обесточенной обмотке управления 1 ротор 2 фиксируется постоянными магнитами 3. При подаче управляющего импульса он поворачивается на 90° и устанавливается по оси обмоток 1. При отключении обмоток 1 он вновь поворачивается на 90° и т.д. Клювообразный ротор создает начальную асимметрию с целью избирательности вращения. Шаг поворота ротора 90° .

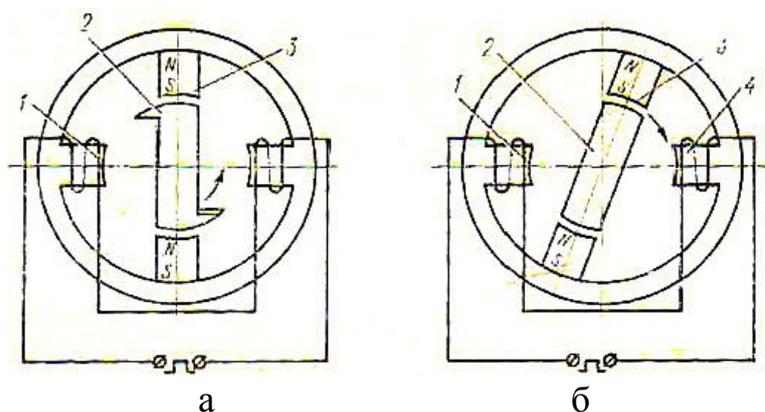


Рис. 5.30

Избирательность вращения может быть обеспечена также путем взаимного сдвига фиксирующих и управляющих полюсов статора. Эти двигатели называют ШД с инерционным выбегом ротора. Схема такого двигателя приведена на рис. 5.30, б. При подаче управляющего импульса на обмотку 1 статора ротор 2 поворачивается к полюсным наконечникам 4 по часовой стрелке. Когда ротор приходит в положение, соосное с полюсными наконечниками, его скорость максимальна. В этот момент управляющий импульс снимается и ротор движется по инерции, приходя в новое устойчивое положение под действием поля постоянных фиксирующих магнитов 3. Для уменьшения шага такие двигатели делают многополюсными.

6. ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ

6.1. Типы электроприводов и режимы их работы

Электромеханический привод (ЭМП) состоит из электродвигателя, механического преобразователя, с помощью которого движение вала электродвигателя преобразуется в нужное по виду и скорости движение исполнительного устройства и аппаратуры управления.

Механический преобразователь в общем случае может состоять из отдельных зубчатых, фрикционных, шарнирно-рычажных, кулачковых и других передач или их сочетаний, но преимущественно это многоступенчатая понижающая зубчатая передача (зубчатый редуктор). Привод присоединяется к исполнительному устройству.

Различают нерегулируемые и регулируемые ЭМП. Первые из них называют также силовыми, а вторые – управляемыми, следящими, исполнительными.

В нерегулируемых ЭМП характеристиками механического движения на выходе (скоростью или перемещением исполнительного звена, развиваемым

моментом и т. п.) во включенном состоянии не управляют. Такие ЭМП характеризуются продолжительностью работы двигателя, в зависимости от которой установлены три основных режима работы: длительный, кратковременный и повторно-кратковременный.

ЭМП длительного режима отличаются большой продолжительностью включенного состояния, редкими пусками и остановками, отсутствием реверсов или малой их частотой, большим ресурсом работы.

В ЭМП кратковременного и повторно-кратковременного режимов двигателя имеют меньшую продолжительность включенного состояния, их чаще включают, останавливают и реверсируют. Для кратковременного режима установлены стандартные длительности работы в 15, 30, 60 и 90 минут.

Режим работы называется повторно-кратковременным, когда периоды работы чередуются с отключением двигателя. При этом продолжительность одного цикла не должна превышать 10 минут, если длительность цикла превышает 10 минут, режим работы считают длительным. Повторно-кратковременный режим характеризуется величиной относительной продолжительности включения ПВ, под которой понимают отношение времени работы к продолжительности цикла. Установлены следующие значения ПВ: 15, 25, 40 и 60 %. Так как условия нагревания двигателей в каждом из перечисленных режимов различны, для каждого режима могут применяться двигатели специального назначения, выпускаемые промышленностью.

Нерегулируемый ЭПМ предназначен обычно для преодоления постоянно действующей статической нагрузки, мало отличающейся от среднего значения, а также для преодоления кратковременной динамической нагрузки при включении и останове привода. Аппаратура управления в нерегулируемых приводах позволяет дистанционно осуществлять пуск, останов, реверс привода, защиту от перегрузок.

В регулируемых ЭМП характеристиками механического движения на выходе управляют путем изменения продолжительности включенного состояния или напряжения питания двигателя. Регулируемый привод работает в условиях непрерывных изменений нагрузки, частых пусков, остановов и реверсов. Регулируемые ЭМП более насыщены аппаратурой управления: элементами управления, блокировки и сигнализации, датчиками угловой скорости и угла поворота (тахогенераторами, сельсинами, и т. п.), элементами дистанционного управления. Помимо общих требований к ЭМП: малая масса и габариты, стоимость, высокая надежность – к регулируемым ЭПМ добавляются дополнительные требования: быстродействие, малая инерционность, погрешности и стабильности характеристик.

Приложенные к звеньям привода силы можно разделить на движущие и силы сопротивления. Движущими силами или моментами сил будем называть те силы, которые стремятся ускорить движение звеньев. Это обычно силы и моменты сил, развиваемые электродвигателем. Силами сопротивления называют силы, которые стремятся замедлить движение исполнительного устройства. Их делят на силы полезного и вредного сопротивлений. Силы полезного сопротивления – это те силы, преодоление которых необходимо для выполнения требуемого технологического процесса. Силы вредных сопротивлений – силы трения, силы сопротивления окружающей среды, т. е. силы, на преодоление которых затрачивается дополнительная работа. Работу (мощность P_d) движущих сил называют затрачиваемой работой (мощностью), работу (мощность $P_{пс}$) полезных сопротивлений – полезной работой (мощностью), а работу (мощность) сил вредных сопротивлений – вредной работой (мощностью $P_{вс}$).

Время от начала до конца движения привода (рис. 6.1) называют полным временем движения. Полное время движения состоит из трех частей: времени разгона или разбега t_p , времени установившегося движения и времени выбега или остановки t_b . Время разбега характеризуется возрастанием скорости вращения вала двигателя от нулевого значения до номинального $\omega_{ном}$ ($n_{ном}$). Во время разгона мощность движущих сил P_d больше мощности сил сопротивления P_c , разность идет на приращение кинетической энергии звеньев.

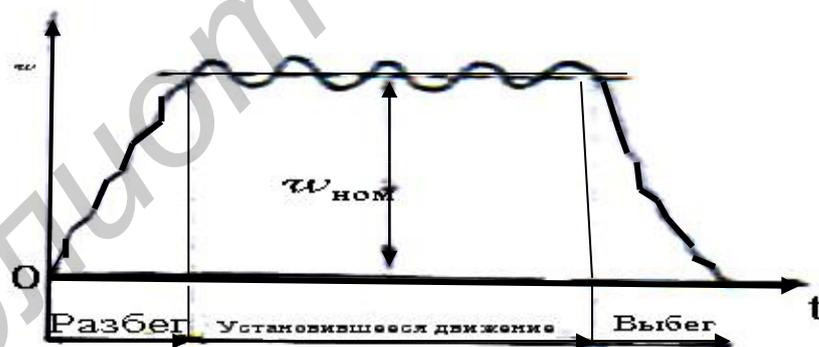


Рис. 6.1

При установившемся движении скорость двигателя меняется периодически, незначительно относительно номинального значения или может быть постоянной, а мощности движущих сил и сил сопротивления равны.

Время остановки характеризуется уменьшением скорости от номинального значения до нуля. При этом мощность движущих сил меньше мощности сил сопротивления и происходит отдача кинетической энергии, накопленной за время разгона.

Многие приводы не имеют четко разграниченных стадий движения. Полное время движения может состоять только из времени разгона и времени выбега, у них отсутствует установившийся режим движения, например, при работе подъемников грузов, реле, контакторов.

6.2. Коэффициент полезного действия приводов

С точки зрения энергетических потерь приводы оценивают и сравнивают по величине коэффициента полезного действия (КПД). КПД привода η называют отношение мощности $P_{\text{пс}}$ сил полезных сопротивлений к мощности $P_{\text{д}}$ движущих сил. Об энергетических потерях на преодоление сил вредного сопротивления судят не по абсолютному значению потерянной мощности (работы), а по ее отношению к мощности движущих сил. Эту величину называют коэффициентом потерь привода $\varphi = P_{\text{вс}}/P_{\text{д}}$. Она является показателем уровня совершенства привода. При установившемся движении $P_{\text{д}} = P_{\text{пс}} + P_{\text{вс}}$ или $1 = \eta + \varphi$. КПД для ряда механизмов, узлов привода известны и приводятся в справочной литературе. КПД привода зависит от КПД каждого составляющего узла привода и характера их расположения. Рассмотрим определение общего КПД привода при различных видах соединений входящих в него составляющих.

При **последовательном соединении** n механизмов привода (рис. 6.2, а) полезная мощность k -го механизма является мощностью движущих сил $(k+1)$ -го механизма. Частные КПД каждого механизма привода соответственно равны

$\eta_1 = P_1/P_{\text{д}}$; $\eta_2 = P_2/P_1$; ..., $\eta_n = P_n/P_{n-1}$, а общий КПД привода, состоящего из n механизмов, равен $\eta = P_n/P_{\text{д}}$.

Перемножим КПД всех составляющих привода

$$\eta_1 \cdot \eta_2 \dots \eta_n = (P_1/P_{\text{д}}) \cdot (P_2/P_1) \dots (P_n/P_{n-1}) = P_n/P_{\text{д}}$$

$$\text{т. е. } \eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \dots \eta_n. \quad (6.1)$$

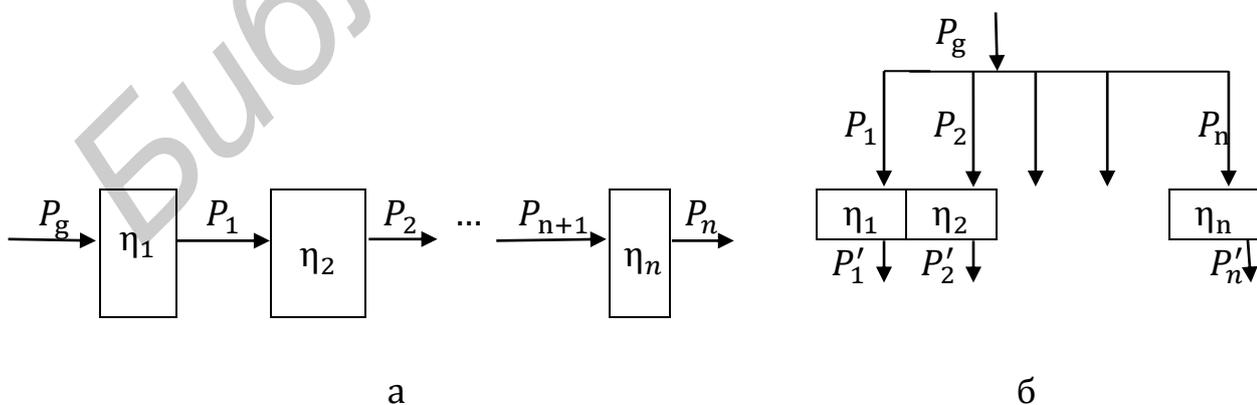


Рис. 6.2

Следовательно, общий КПД привода, состоящего из ряда последовательно соединенных составляющих узлов, равен произведению КПД составляющих, входящих в привод. С увеличением числа составляющих общий КПД привода уменьшается и всегда меньше наименьшего из КПД устройства, входящего в привод.

При **параллельном соединении** n механизмов привода (рис. 6.2, б) мощность движущих сил выражается равенством

$$P_d = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \alpha_1 P_d + \alpha_2 P_d + \dots + \alpha_n P_d,$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – коэффициенты, показывающие, какая часть мощности всех движущих сил подведена к первому, второму и последующим составляющим привода; следовательно, $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n = 1$. Мощность сил полезных сопротивлений $P_{пс}$ на выходе n механизмов соответственно равна

$$P_{пс} = \eta_1 P_1 + \eta_2 P_2 + \dots + \eta_n P_n = \alpha_1 \eta_1 P_d + \alpha_2 \eta_2 P_d + \dots + \alpha_n \eta_n P_d.$$

Тогда общий КПД привода определяется как

$$\eta = P_{пс} / P_d = \alpha_1 \eta_1 + \alpha_2 \eta_2 + \dots + \alpha_n \eta_n.$$

6.3. Выбор типа и мощности электродвигателя для электромеханического привода

Выбору наиболее рационального типа двигателя при заданных требованиях к ЭМП следует уделять особое внимание, так как качество ЭМП во многом зависит от свойств электродвигателя. При выборе типа электродвигателя учитывают следующие факторы: характер работы ЭМП (регулируемый или нерегулируемый); режим работы (длительный, кратковременный, повторно-кратковременный) и его характеристики (продолжительность включенного состояния, частота пусков, остановов, реверсов); номинальное (среднее) значение нагрузки ЭМП, т. е. момента $T_{ном}$ или силы $F_{ном}$; номинальное (среднее) значение угловой $\omega_{ном}$ или линейной скорости $V_{ном}$ исполнительного звена ЭМП; требования к механическим характеристикам; род тока (постоянный, переменный); необходимая мощность двигателя; его рабочие, пусковые и регулировочные характеристики, обеспечивающие требуемую производительность исполнительного устройства; условия эксплуатации (температура, влажность, запыленность); ресурс, стоимость, безопасность, простота обслуживания и другие факторы.

Двигатель следует использовать при тех режимах работы, на которые он рассчитан: силовые – в нерегулируемых ЭМП, а исполнительные – в регулируемых. Нежелательно применение двигателя длительного режима работы в кратковременном или повторно-кратковременном режиме и наоборот.

Применение двигателей недостаточной мощности может вызвать нарушения в работе оборудования, уменьшить его производительность, привести к аварии и отказу двигателя от перегрузок. Использование двигателей завышенной мощности приводит к неоправданному увеличению капитальных затрат, снижению качества показателей привода – уменьшению КПД и коэффициента мощности ($\cos \varphi$).

Следует также учитывать необходимость защиты окружающей среды от возможных искрообразований в двигателе (коллекторные), а также самих двигателей от попадания в них влаги, пыли, агрессивных химических веществ из окружающей среды. Наиболее широко применяют двигатели защищенного типа. Они имеют вентиляционные отверстия, которые закрыты решетками, защищающими двигатель от капель дождя, сторонних частиц, но не от пыли, и могут устанавливаться на открытом воздухе. В сырых помещениях устанавливают такие двигатели с влагостойкой изоляцией. Двигатели закрытого типа устанавливаются в запыленных помещениях при наличии в воздухе паров едких испарений и т. п. Для улучшения охлаждения к таким силовым двигателям воздухопроводом подводится и отводится охлаждаемый воздух.

Промышленностью выпускаются двигатели с повышенным пусковым моментом, с повышенным скольжением, многоскоростные, с температурной защитой и другими характеристиками.

Выбор двигателя по мощности заключается в определении номинального значения мощности на валу двигателя. Мощность двигателя определяется с учетом баланса мощностей при установившемся режиме работы:

$$P_d \cdot \eta = P_{\text{пс}}$$

или

$$P_d \cdot \eta = k T_c \cdot \omega_{\text{вых}}, \quad (6.2)$$

где P_d – минимально необходимая мощность двигателя в Вт; $P_{\text{пс}}$ – мощность полезных сил сопротивления; η – общий КПД привода; T_c – момент сил сопротивления на выходном валу привода в Н·м; $\omega_{\text{вых}}$ – угловая скорость выходного вала привода в рад/с; k – коэффициент запаса, учитывающий необходимость преодоления динамических нагрузок в момент разгона, изменения мощности двигателя из-за падений напряжения питания, возможное изменение нагрузки на исполнительном звене (принимают $k = 1,05-1,1$).

Если значение КПД привода неизвестно, его величиной первоначально задаются, а после выбора двигателя и проектирования редуктора значение КПД уточняют по формуле (6.1) с учетом результатов проектирования. После уточнения КПД привода η_y проводят проверочный расчет мощности двигателя с учетом формулы (6.2). В тех случаях, когда момент сил сопротивления не

остаётся постоянным, а меняется незначительно по некоторому определенному закону (рис. 6.3), мощность двигателя определяют пользуясь методом эквивалентного момента.

$$P_d = kT_c \cdot \omega_{\text{вых}} / \eta_y$$

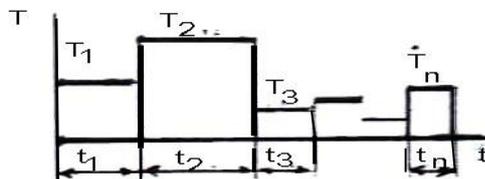


Рис. 6.3

Значение эквивалентного момента сопротивления находят из выражения

$$T_э = \sqrt{\frac{T_1^2 t_1 + T_2^2 t_2 + \dots + T_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}, \quad (6.3)$$

где $T_1, T_2 \dots T_n$ – постоянные моменты сил сопротивления соответственно во время работы $t_1, t_2, \dots t_n$.

Определив эквивалентный момент сил сопротивления, находят из выражения (6.2) необходимую мощность двигателя, заменив значение постоянного момента сил сопротивления T_c эквивалентным моментом $T_э$. Метод эквивалентного момента можно применять для асинхронных двигателей переменного тока, для двигателей постоянного тока параллельного возбуждения.

При выборе электродвигателя необходимо иметь в виду, что масса и габариты двигателей как переменного, так и постоянного тока при одинаковых мощностях уменьшаются с повышением номинальной скорости вращения.

6.4. Динамическая модель привода

На параметры движения звена влияют силы, действующие на звено и его инерционные свойства. Если звено совершает поступательное движение, взаимосвязь этих параметров следующая:

$$m dv/dt = F,$$

где m – масса звена; dv/dt – ускорение звена; F – сила, действующая на звено.

При вращательном движении звена уравнение движения имеет вид

$$J d\omega/dt = T, \quad (6.4)$$

где J – момент инерции звена относительно оси вращения; ω – угловая скорость вращения звена; $d\omega/dt$ – угловое ускорение; T – момент сил (вращательный момент), приложенный к звену.

Решая уравнение (6.4), находят закон изменения скорости (перемещения) звена от времени $\omega = f(T, J, t)$ при заданном силовом воздействии на него.

Электромеханический привод представляет собой сложную систему, звенья которой обладают инерционными свойствами и движутся под действием приложенных к ним сил или моментов сил. Определение законов движения звеньев таких систем представляет сложную задачу, решение которой упрощается для систем с одним начальным звеном. В этом случае, определив закон движения начального звена ω_1 , можно, зная передаточные отношения между звеньями с учетом их геометрии и кинематики, найти закон движения любого звена, т. е. $\omega_n = \omega_1 / i_{1n}$, где ω_n – скорость n -го звена; ω_1 – скорость начального звена; i_{1n} – передаточное отношение между начальным и n -м звеньями привода, которое определяется через конструктивные параметры звеньев (число зубьев в зубчатых механизмах, диаметры звеньев во фрикционных механизмах и т. п.).

Движение начального звена привода зависит не только от его инерционных параметров и сил, приложенных к нему. На его движение влияют инерционные свойства всех звеньев привода и силы (моменты сил), приложенные к другим звеньям. Это наводит на мысль заменить всю многозвенную систему привода моделью в виде одного начального звена, которое имело бы инерционные свойства, эквивалентные по воздействию на движение инерционным свойствам всех звеньев привода, и к которому были бы приложены силы, эквивалентные действию всех сил (моментов сил), действующих на звенья привода. При соблюдении таких условий движение модели из одного звена в любой момент времени совпадает с движением реального начального звена привода.

Инерционные и силовые параметры предлагаемой динамической модели привода в виде начального звена определяют путем приведения.

6.5. Приведение сил, действующих на звенья привода, и инерционных свойств звеньев к начальному звену

Эквивалентное приведение инерционных свойств звеньев и действующих на них сил к начальному звену возможно только при равенстве динамических мер движения всех звеньев привода и звена приведения. **Динамическими мерами движения любой механической системы являются мощность приложенных к звеньям сил (моментов сил) и кинетическая энергия звеньев системы.**

Считаем, что известны: инерционные параметры звеньев – массы m или моменты инерции J ; силы F или моменты сил T , действующие на звенья; передаточные отношения i между звеньями.

Известно, что мерой инертности звена, совершающего поступательное движение, является масса m ; вращающего звена – момент инерции J . Для звеньев типа осесимметричных тел вращения – валы, зубчатые колеса и т. п. – $J = 0,5mr^2$, где m – масса звена; r – радиальный размер звена относительно оси вращения.

В качестве звена приведения принимаем начальное звено привода – вал электродвигателя. Поэтому оно должно обладать приведенным моментом сил $T_{пр}$ и приведенным моментом инерции $J_{пр}$. Если бы звено приведения совершало поступательное движение, параметрами такого звена были бы $F_{пр}$ и $m_{пр}$.

Приведенным моментом сил $T_{пр}$ (приведенной силой $F_{пр}$) называют момент сил (силу), которые будучи приложены к звену приведения, развивают мощность, равную мощности сил и моментов сил, действующих на звенья привода, т. е.

$$P_{пр} = \sum P_i \text{ или } P_{пр} = \sum T_i \omega_i + \sum F_i v_i \cos \alpha_i, \quad (6.5)$$

где $P_{пр}$ – мощность, развиваемая звеном приведения; ω_i – угловая скорость вращения i -го звена; T_i – момент сил, приложенный к i -му звену; v_i – линейная скорость точки приложения силы F_i ; α_i – угол между направлениями векторов F_i и v_i .

Так как вал двигателя совершает вращательное движение со скоростью ω_1 , уравнение (6.5) примет вид

$$T_{пр} \omega_1 = \sum T_i \omega_i + \sum F_i v_i \cos \alpha_i,$$

откуда

$$T_{пр} = \sum T_i / i_{1i} + \sum F_i v_i \cos \alpha_i / \omega_1, \quad (6.6)$$

где $i_{1i} = \omega_1 / \omega_i$ – передаточное отношение между начальным и i -м звеньями.

Приведенным моментом инерции $J_{пр}$ (приведенной массой $m_{пр}$) называют такой момент инерции (массу), которым должно обладать звено приведения с кинетической энергией, равной сумме кинетических энергий всех звеньев привода:

$$W_{пр} = \sum_{i=1}^k W_i + \sum_{i=k+1}^n W_i, \quad (6.7)$$

где $W_{пр}$ – кинетическая энергия звена приведения; W_i – кинетическая энергия i -го звена; k – количество звеньев привода, совершающих вращательное движение; $(n-k)$ – количество звеньев привода, совершающих поступательное движение.

Выражение (6.7) при выборе в качестве звена приведения вала электродвигателя примет вид

$$J_{\text{пр}} \omega_1^2 / 2 = \sum_{i=1}^k J_i \omega_i^2 / 2 + \sum_{i=k+1}^n m_i v_i^2 / 2,$$

откуда

$$J_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^k J_i / i_{1i}^2 + \sum_{i=k+1}^n m_i v_i^2 / \omega_1^2, \quad (6.8)$$

где J_i – моменты инерции звеньев, совершающих вращательное движение; $i_{1i} = \omega_1 / \omega_i$ – передаточные отношения между начальным и i -м звеньями; m_i – массы звеньев привода, совершающих поступательное движение со скоростью v_i . Если звенья привода совершают только вращательное движение, тогда приведенный момент сил и приведенный момент инерции начального звена привода соответственно равны $T_{\text{пр}} = \sum T_i / i_{1i}$, $J_{\text{пр}} = \sum J_i / i_{1i}^2$, а уравнение движения начального звена привода – вала электродвигателя примет вид

$$J_{\text{пр}} d\omega_1 / dt = T_{\text{пр}}. \quad (6.9)$$

6.6. Определение времени переходных режимов электромеханического привода

При проектировании ЭМП часто требуется определить динамические характеристики, например, время разгона t_p двигателя до номинальной скорости $\omega_{\text{ном}}$ при включении, время выбега t_b (остановки) при отключении. При прерывистом стартстопном режиме работы устройств время разгона и выбега определяют не только быстродействие, но и производительность оборудования. Определение времени переходных режимов возможно только после выбора двигателя и при знании конкретных параметров привода, т. е. масс, моментов инерции звеньев, передаточных отношений между звеньями.

Динамические характеристики привода определяют решением дифференциального уравнения (6.9). Рассмотрим привод, нагруженный постоянным моментом сил сопротивления $T_c = \text{const}$, приложенным к исполнительному звену и с постоянным приведенным к начальному звену моментом инерции $J_{\text{пр}} = \text{const}$. Развиваемый двигателем момент зависит от скорости, т. е. $T_d = T_d(\omega_1)$. Уравнение (6.9) в этом случае имеет вид

$$J_{\text{пр}} d\omega_1 / dt = T_d(\omega_1) - T_{c \text{ пр}}, \quad (6.10)$$

где $T_{c\text{пр}} = T_c / (\eta \cdot i_p)$ – приведенный к валу двигателя момент сил T_c сопротивления; η – КПД привода; i_p – передаточное отношение между валом двигателя и звеном, к которому приложен T_c , (передаточное отношение редуктора).

Так как по условию $T_{c\text{пр}} = \text{const}$, закон изменения приведенного момента сил $T_{\text{пр}}$ в уравнении (6.10) аналогичен зависимости изменения момента, развиваемого двигателем, т.е. $T_{\text{пр}} = T_d(\omega_1) - T_{c\text{пр}} = T_{\text{пр}}(\omega_1)$. Тогда уравнение движения вала двигателя (6.9) примет вид

$$J_{\text{пр}} d\omega_1/dt = T_{\text{пр}}(\omega_1). \quad (6.11)$$

Наиболее просто уравнение (6.10) решается, если зависимость $T_d(\omega_1)$ – линейная функция (рис. 6.4), где $T_{\text{п}}$ – пусковой момент двигателя; ω_0 – скорость двигателя при идеальном холостом ходе; $T_{\text{ном}}$ – номинальный момент, развиваемый двигателем в номинальном (установившемся) режиме, при $\omega_1 = \omega_{\text{ном}}$, он равен приведенному моменту сил сопротивления, т. е. $T_{\text{ном}} = T_{c\text{пр}} = T_c / (\eta \cdot i_p)$.

Таковую зависимость имеют двигатели с жесткой механической характеристикой. Это двигатели постоянного тока с независимым и параллельным подключением обмотки возбуждения, асинхронные трех- и однофазные двигатели с короткозамкнутым ротором.

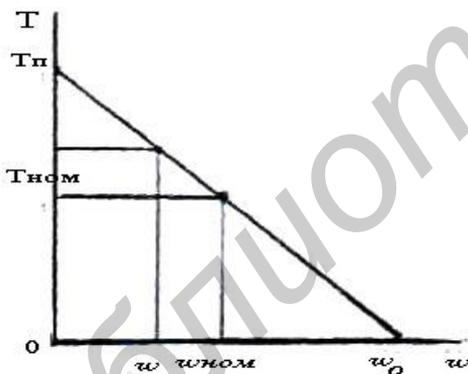


Рис. 6.4

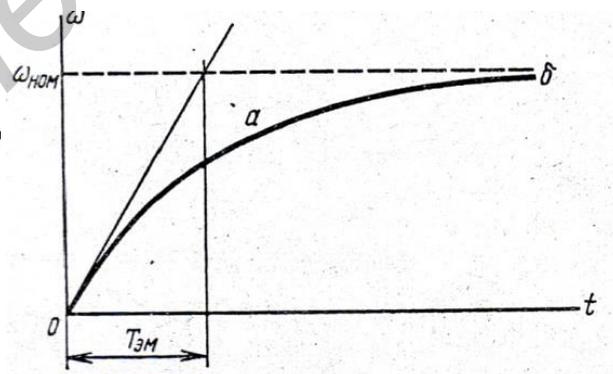


Рис. 6.5

Зависимость $T_d(\omega_1)$, представленная на рис. 6.4, близка к прямой, поэтому ее можно аппроксимировать уравнением $T_d = a - b\omega_1$, где a равно пусковому моменту $T_{\text{п}}$ при $\omega_1 = 0$, а коэффициент b характеризует крутизну спада зависимости $T_d(\omega_1)$,

$$\text{т. е. } b = (T_{\text{п}} - T_{\text{ном}}) / \omega_{\text{ном}}, \quad (6.12)$$

откуда $\omega_{\text{ном}} = (T_{\text{п}} - T_{\text{ном}}) / b$.

Для определения времени переходных режимов используем уравнение (6.11). Разделим переменные ω_1 и t и проинтегрируем, приняв $t_{\text{нач}} = 0$ и $\omega_{\text{нач}} = 0$.

$$\text{Тогда } t_p = J_{\text{пр}} \int_0^{\omega_{\text{ном}}} \frac{d\omega_1}{T_{\text{пр}}(\omega_1)} = J_{\text{пр}} \int_0^{\omega_{\text{ном}}} \frac{d\omega_1}{T_{\text{д}}(\omega_1)} = J_{\text{пр}} \int_0^{\omega_{\text{ном}}} \frac{d\omega_1}{a - b\omega_1}.$$

Решение этого уравнения при заданных начальных условиях имеет вид

$$\omega_1 = \omega_{\text{ном}}(1 - e^{t/t_{\text{эм}}})$$

и представлено на рис. 6.5.

Величина $t_{\text{эм}} = J_{\text{пр}}/b = J_{\text{пр}} \omega_{\text{ном}}/(T_{\text{п}} - T_{\text{ном}})$ называется постоянной времени электромеханического привода. Физический смысл ее в следующем. Если бы в процессе разгона суммарный приведенный момент $T_{\text{пр}}$ не уменьшался, а оставался постоянным, равным начальному $T_{\text{пр}} = T_{\text{п}} - T_{\text{ном}}$, то движение было бы равноускоренным, а угловая скорость вала двигателя достигла бы номинального (установившегося) значения через время $t_{\text{эм}}$, т. е. $t_{\text{эм}}$ – время, за которое скорость достигла бы номинальной величины, если бы она увеличивалась по линейному, а не по экспоненциальному закону.

Теоретически из-за уменьшения момента двигателя при разгоне процесс разгона продолжается бесконечно долго. Однако уже при $t = 3 t_{\text{эм}}$ отношение $\omega_1/\omega_{\text{ном}} = 0,95$ а при $t = 4 t_{\text{эм}}$ – оно равно 0,98, а при $t = 5 t_{\text{эм}}$ $\omega_1/\omega_{\text{ном}} = 0,995$, т. е. при $t = (4 - 5)t_{\text{эм}}$ процесс разгона практически закончится.

При разгоне до некоторой фиксированной угловой скорости $\omega_{\text{ф}}$ время переходного процесса определяется как

$$t = t_{\text{эм}} \ln[\omega_{\text{ном}}/(\omega_{\text{ном}} - \omega_{\text{ф}})].$$

Динамические свойства ЭМП определяет электромеханическая постоянная времени $t_{\text{эм}}$. Чем меньше $t_{\text{эм}}$, тем короче переходный процесс. Используя изложенную методику, можно решить обратную задачу – по заданным условиям движения, например, времени разгона t_p , определим, каковы должны быть инерционные (геометрические и массовые) параметры механизма. Задавая, например, значение $t_p = 4t_{\text{эм}}$, найдем, с учетом того что $t_{\text{эм}} = J_{\text{пр}} \omega_{\text{ном}}/(T_{\text{п}} - T_{\text{ном}})$, что при заданных значениях $t_p, T_{\text{п}}, T_{\text{ном}}, \omega_{\text{ном}}$ двигателя приведенный момент инерции привода должен быть равен $J_{\text{пр}} = 0,25 t_p (T_{\text{п}} - T_{\text{ном}})/\omega_{\text{ном}}$.

Так как моменты инерции вращающихся звеньев определяются их размерами и массой, управлять величиной $J_{\text{пр}}$ можно, изменяя размеры звеньев и используя при их изготовлении более легкие конструкционные материалы с меньшей удельной массой (алюминиевые сплавы, пластмассы).

В режиме останова скорость вала электродвигателя уменьшается до нуля не мгновенно при его отключении от сети. Кинетическая энергия звеньев привода затрачивается на работу по преодолению сил сопротивления. Дифференциальное уравнение движения начального звена для режима выбега имеет вид

$$J_{\text{пр}} d\omega_1/dt = -T_{\text{с пр}} = -T_{\text{с}}/(\eta i_{\text{р}}).$$

Разделим переменные t и ω_1 и проинтегрируем, приняв $t_{\text{нач}} = 0, \omega_{\text{нач}} = \omega_{\text{ном}}$, тогда

$$\int_0^{t_{\text{в}}} dt = -[(J_{\text{пр}}\eta i_{\text{р}})/T_{\text{с}}] \int_{\omega_{\text{ном}}}^0 d\omega_1,$$

откуда время останова привода равно

$$t_{\text{в}} = (J_{\text{пр}}\eta i_{\text{р}}\omega_{\text{ном}})/T_{\text{с}}. \quad (6.13)$$

6.7. Проверка выбранного электродвигателя по нагреву

Работа электродвигателя, как и любого другого механизма, сопровождается потерями части энергии, которые превращаются в теплоту. Считают, что все потери ΔP в двигателе идут на нагрев его отдельных частей:

$$\Delta P = P(1 - \eta)/\eta, \quad (6.14)$$

где P – полезная мощность на валу электродвигателя; η – КПД при данной нагрузке; $(1 - \eta)$ – коэффициент потерь.

Допустимый нагрев двигателя определяется нагревостойкостью применяемых изоляционных материалов. Чем больше нагревостойкость и лучше система охлаждения двигателя, тем меньше размеры двигателя при одинаковой мощности.

Изоляционные материалы, используемые в электрических машинах, делят на классы нагревостойкости. Допустимая температура нагрева в зависимости от класса составляет от 120 °С (класс *E*) до 180 °С (класс *H*).

Для двигателей нормируется недопустимая температура нагрева обмотки, а допустимое превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды.

Процесс нагрева отдельных частей двигателя сопровождается теплообменом. Часть тепла рассеивается в окружающую среду, причем с увеличением температуры количество тепла, отдаваемое в окружающую среду, увеличивается. При некоторой температуре тела наступает равновесие, когда количество тепла, сообщаемое телу, становится равным количеству тепла, отдаваемому им. При этом дальнейший рост температуры прекращается и она устанавливается на постоянном уровне.

В зависимости от длительности работы привода условия нагревания двигателя при длительном, кратковременном и повторно-кратковременном режимах различны, поэтому для каждого из режимов должны применяться специальные двигатели.

При длительном режиме работы с постоянной или переменной нагрузкой (вентиляторы, транспортеры и т. п.) все части электродвигателя нагреваются до установившегося нагрева. Проверка двигателя по нагреву при работе с постоянной нагрузкой сводится к проверке одного из соотношений:

$$P_{\text{ном}} \geq P_{\text{ф}} \quad \text{или} \quad T_{\text{ном}} \geq T_{\text{ф}}, \quad (6.15)$$

где $P_{\text{ном}}$, $T_{\text{ном}}$ – номинальные значения соответственно мощности, момента двигателя; $P_{\text{ф}}$, $T_{\text{ф}}$ – фактические значения мощности, момента двигателя.

При переменной нагрузке температура двигателя колеблется, но приблизительно может считаться неизменной, как и скорость вращения вала двигателя. Из имеющейся ступенчатой нагрузочной диаграммы (рис. 6.3) находят эквивалентный (среднеквадратичный) момент (6.3). Затем определяют требуемую мощность двигателя по формуле (6.2). Проверка двигателя по нагреву сводится к проверке одного из соотношений (6.15).

Выбранный двигатель проверяют также и по перегрузочной способности. Максимальный перегрузочный момент $T_{\text{мах н}}$ не должен превышать величины максимально развиваемого двигателем момента $T_{\text{мах}}$, т. е.

$$T_{\text{мах н}} \leq \lambda \cdot T_{\text{ном}}, \quad (6.16)$$

где λ – перегрузочная способность двигателя, берется из его паспорта ($\lambda = T_{\text{мах}}/T_{\text{ном}}$).

При кратковременном режиме длительность работы двигателя недостаточна для достижения установившегося перегрева, а следующая затем остановка достаточна для охлаждения двигателя до температуры окружающей среды. Если выбрать в соответствии с требованиями (6.2) и (6.3) двигатель, рассчитанный для продолжительного режима, то очевидно, что при кратковременном режиме работы перегрев не достигнет установившегося значения, т. е. двигатель будет использован не до конца по нагреву. В тепловом отношении будет полностью использован двигатель меньшей мощности, но при этом двигатель будет временно перегружаться. Необходимо, чтобы выбранный двигатель был проверен на перегрузочную способность по формуле (6.16).

Желательно применять двигатели специального назначения, отличающиеся повышенной перегрузочной способностью, они маркируются не только по номинальной мощности, но и по допустимой длительности работы. При отсутствии специальных двигателей для кратковременного режима допускают использование двигателей для повторно-кратковременного режима работы. При этом считают при рассчитанных мощностях, что длительность работы в

30 мин соответствует коэффициенту продолжительности включения $PВ = 15 \%$, длительность работы в 60 мин – $PВ = 25 \%$, длительность работы в 90 мин – $PВ = 40 \%$.

При повторно-кратковременном режиме время работы настолько мало, что двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время последующей паузы не успевает охладиться до температуры окружающей среды. Этот режим применяется в электроприводах кранов, подъемников, лифтов, холодильных установок и т.п. Если длительность цикла больше 10 мин, то двигатель выбирается для длительного режима. Для повторно-кратковременного режима целесообразно использовать специальные двигатели, обладающие значительной перегрузочной способностью и повышенным пусковым моментом $T_{п}$. Стандартным для них является $PВ = 40 \%$.

Расчет двигателя для повторно-кратковременного режима производится в следующем порядке.

По аналогии с рассматриваемыми выше режимами работы при реальной нагрузочной диаграмме проводят предварительный выбор двигателя по мощности P_p , с учетом постоянного (6.2) или переменного (6.3) момента сил сопротивления T_c . Фактическое значение $PВ_{ф}$ может отличаться от стандартного. Поэтому двигатель со стандартным $PВ_c$ развивает в повторно-кратковременном режиме другую мощность, которая может быть найдена с учетом равенства потерь мощностей при разных значениях $PВ$. Мощность выбранного двигателя при $PВ_{ф}$ должна быть

$$P = P_p \sqrt{PВ_c / PВ_{ф}}$$

Далее двигатель проверяют на перегрузочную способность $T_{maxн} \leq \lambda \cdot T_{ном}$.

7. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МИКРОМАШИНЫ

К информационным микромашинам относят тахогенераторы, преобразующие механическое вращение вала в электрический сигнал; поворотные трансформаторы, дающие на выходе напряжение, пропорциональное той или иной функции угла поворота ротора, например, синусу или косинусу этого угла и машины синхронной связи (сельсины) – осуществляющие синхронный и синфазный поворот или вращение нескольких механически не связанных между собой валов.

7.1. Тахогенераторы

Тахогенераторы, или датчики скорости – это электрические машины постоянного и переменного тока, преобразующие скорость вращения в электрический сигнал (напряжение). Выходное напряжение тахогенератора (ТГ) используется для дистанционного измерения или индикации скорости вращения исполнительных механизмов и для выработки управляющих ускоряющих и замедляющих сигналов в системах автоматического регулирования.

Основным требованием к тахогенераторам является соблюдение пропорциональности между измеряемой скоростью вращения и выходным сигналом, напряжением U , т. е.

$$U = k n,$$

где n – скорость вращения в об/мин; k – коэффициент пропорциональности.

Эта зависимость является основной, называется она выходной характеристикой тахогенератора. К остальным требованиям относят высокое быстродействие, надежность, простоту устройства, малые размеры и массу, бесшумность, отсутствие радиопомех. Наиболее полно этим требованиям соответствует асинхронный тахогенератор.

Асинхронный тахогенератор состоит из статора и ротора, его схема представлена на рис. 7.1.

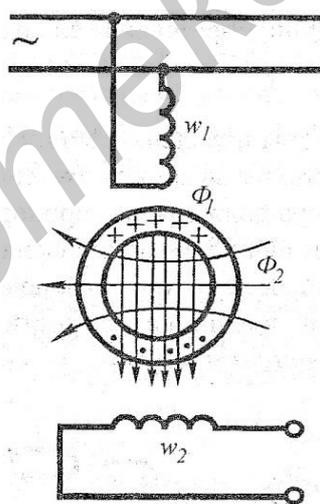


Рис. 7.1

На статоре в пазах расположены две обмотки, сдвинутые в пространстве на 90° . Одна из обмоток w_1 постоянно включена в сеть, другая обмотка w_2 присоединена к нагрузке и является выходной. Обмотка w_1 создает переменный магнитный поток Φ_1 с частотой сети f . Ротор выполнен в виде полого тонкостенного цилиндра из алюминия. Магнитный поток Φ_1 располагается в плоскости обмотки w_2 и не создает в ней ЭДС. При вращении ротора со скоростью n оборотов в минуту посторонним механизмом в нем возбуждается индукцион-

ный ток, создающий магнитный поток Φ_2 , перпендикулярный плоскости обмотки w_2 . Он возбуждает в обмотке w_2 ЭДС индукции. Так как ЭДС индукции в обмотке w_2 равна $E_2 = cn\Phi_2$, где c – коэффициент пропорциональности, а Φ_2 изменяется с постоянной частотой f магнитного потока статора, то ЭДС индукции обмотки w_2 пропорциональна скорости вращения n ротора. Частота ЭДС в выходной обмотке при любых условиях равна частоте сети f , питающей обмотку w_1 и не зависит от скорости вращения ротора. Неизменность частоты выходного напряжения является ценным свойством асинхронного генератора.

Вольтметр, подключенный к зажимам обмотки w_2 и проградуированный в единицах скорости вращения, покажет скорость вращения ротора (вала механизма).

Тахогенераторы постоянного тока по конструкции подобны соответствующим машинам постоянного тока общего применения. Применяют тахогенераторы с возбуждением от постоянных магнитов на статоре (рис. 7.2, а) и с электромагнитным возбуждением от независимого источника постоянного тока (рис. 7.2, б).

В них используют якорь обычного типа с обмоткой, а также полый или дисковый с печатной обмоткой.

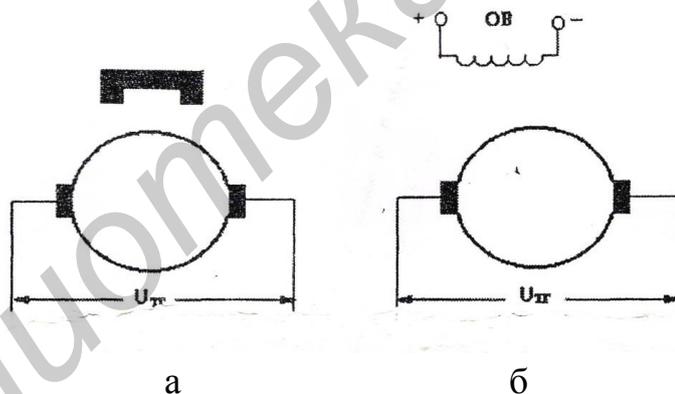


Рис. 7.2

При неизменном постоянном магнитном потоке Φ индуктируемая в обмотке ротора ЭДС пропорциональна его скорости вращения n , т.е. $E = cn\Phi$, что является основой для использования машин постоянного тока в качестве тахогенератора.

При холостом ходе, когда величина нагрузочного сопротивления $R_H = 0$ $U = E = cn\Phi$. Если нагрузочное сопротивление R_H невелико, напряжение, снимаемое на выходе,

$$U = E - I_{\text{я}}R_{\text{я}},$$

где $R_{\text{я}}$ – сопротивление цепи якоря; $I_{\text{я}}R_{\text{я}}$ – падение напряжения в цепи якоря.

Наличие тока в якорной цепи ($I_a R_a$) уменьшает крутизну ($\Delta U/\Delta n$) выходной характеристики за счет падения напряжения в якорной цепи и вызывает зону нечувствительности ТГ постоянного тока за счет падения напряжения в щеточном контакте.

Недостатками ТГ постоянного тока являются сложность конструкции, наличие скользящих контактов между коллектором и щетками, необходимость устройства фильтров для защиты от радиопомех, высокая стоимость, нестабильность выходной характеристики из-за наличия скользящего контакта.

Достоинствами ТГ постоянного тока являются малые габариты и масса при большой выходной мощности, отсутствие фазовой погрешности. В тахогенераторах с постоянными магнитами не требуется наличие вспомогательного источника электрической энергии для возбуждения.

Синхронный тахогенератор конструктивно представляет собой генератор небольшой мощности с однофазной или трехфазной обмоткой на статоре и ротором в виде постоянных магнитов с одной или несколькими парами полюсов. Схема трехфазного синхронного тахогенератора представлена на рис. 7.3.

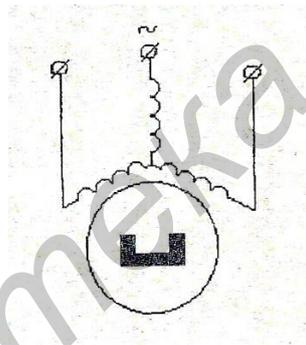


Рис. 7.3

В процессе вращения ротора в обмотке статора наводится ЭДС, действующее значение которой пропорционально скорости вращения ротора. Но частота тока и напряжения пропорциональна скорости вращения ротора. Поэтому с изменением скорости вращения ротора изменяется и частота выходного напряжения. Выражение для выходной характеристики синхронного тахогенератора при сопротивлениях выходной обмотки (обмотки статора) z_c и нагрузки z_n имеет вид

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{E}{1+z_c/z_n} = \frac{cn}{1+z_c/z_n}, \quad (7.1)$$

где n – скорость вращения ротора.

Из выражения (7.1) следует, что у синхронного тахогенератора зависимость выходного напряжения от скорости вращения нелинейна, так как с изменением скорости вращения ротора и частоты выходной ЭДС меняются реактивные сопротивления обмотки статора и нагрузки. Это основной недостаток

синхронных тахогенераторов, исключающий возможность их применения в системах автоматического управления: они не обеспечивают линейности выходной характеристики. Поэтому синхронные тахогенераторы, несмотря на простоту конструкции и отсутствие скользящих контактов, не применяют в схемах автоматических устройств.

Синхронные тахогенераторы или подключены непосредственно на вольтметр для изменения скорости вращения или приводят во вращение синхронный электродвигатель, механически связанный с указателем скорости вращения.

7.2. Вращающиеся трансформаторы

Вращающимися трансформаторами (ВТ) называют электрические микромашины переменного тока, преобразующие угол поворота ротора в напряжение, пропорциональное этому углу или некоторым его функциям.

Вращающиеся трансформаторы могут использоваться в следующих режимах:

- синусно-косинусном, когда одно выходное напряжение пропорционально синусу, второе – косинусу угла поворота ротора;
- линейном, когда выходное напряжение прямо пропорционально углу поворота ротора;
- фазовращательном, когда фаза выходного напряжения изменяется в соответствии с угловым рассогласованием между ротором и статором при неизменной амплитуде.

Для указанных целей могут использоваться одни и те же вращающиеся трансформаторы, обмотки которых включаются различными способами. ВТ применяют в автоматических и вычислительных устройствах, предназначенных для выполнения различных математических операций, в системах автоматического регулирования в качестве измерителей рассогласования, фиксирующих отклонения системы от заданного положения. Применяют ВТ в автоматических системах для преобразования механических величин в электрический сигнал в соответствии с заданной функциональной зависимостью. Конструктивно их выполняют как асинхронный двигатель с фазным ротором. На статоре и роторе размещают по две одинаковые однофазные распределенные обмотки, расположенные относительно друг друга в пространстве на 90° . Магнитопровод изготавливают из листов электротехнической стали или пермаллоя, изолированных друг от друга. Вращающийся трансформатор может работать в режиме поворота ротора или в режиме его вращения. При работе в режиме поворота ротора положение ротора относительно статора задается поворотным механизмом (ис-

полнительным двигателем с редуктором). Принципиальная схема четырехобмоточного ВТ представлена на рис. 7.4.

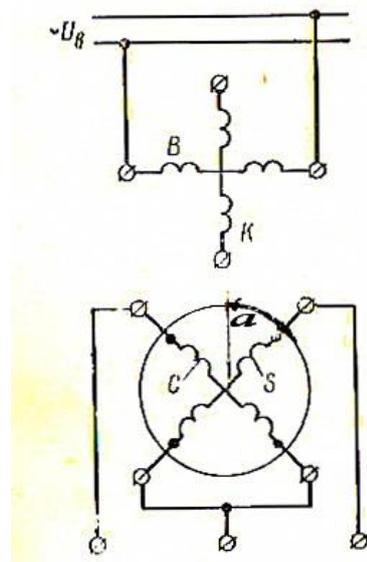


Рис. 7.4

Одну из обмоток статора – обмотку возбуждения B присоединяют к сети переменного тока, а другую – компенсационную обмотку K – подключают к некоторому сопротивлению или замыкают накоротко. Обмотки ротора S (синусная) и C (косинусная) присоединяют к контактным кольцам. Для уменьшения числа контактных колец концы двух обмоток ротора присоединяют к одному общему кольцу и через щетку подводят к общему зажиму. Начала обмоток S и C выводят через соответствующие кольца и щетки к двум другим зажимам.

При подключении обмотки возбуждения B к сети переменного тока возникает продольный магнитный поток Φ , пульсирующий во времени с частотой сети. Выпускаются ВТ на напряжения повышенной частоты (400 и 500 Гц), хотя встречаются ВТ и с номинальной частотой 50 Гц.

Конструкция трансформатора обеспечивает изменение взаимоиндуктивности между главной обмоткой статора и обмотками ротора при их повороте по закону синуса (для синусной) и косинуса (для косинусной) обмоток. Поэтому при холостом ходе ВТ в его вторичных обмотках будут наводиться ЭДС, действующее значение которых зависит от положения ротора относительно статора,

$$E_s = k_1 \Phi \sin \alpha \text{ и } E_c = k_1 \Phi \cos \alpha,$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности; α – угол поворота ротора.

Если пренебречь падением напряжения в главной обмотке статора, поток Φ можно считать пропорциональным приложенному напряжению U_B , т. е. $\Phi = k_2 U_B$, где k_2 – коэффициент пропорциональности. При холостом ходе

напряжения на синусной и косинусной обмотках равны соответствующим ЭДС. Поэтому

$$U_s = E_s = k_1 k_2 U_B \sin \alpha = k U_B \sin \alpha, \quad (7.2)$$

$$U_c = E_c = k_1 k_2 U_B \cos \alpha = k U_B \cos \alpha, \quad (7.3)$$

где k – коэффициент пропорциональности. Например, при $\alpha = 0$ поток Φ не пронизывает контуров, образованных витками обмоток S , вследствие чего ЭДС, наведенная в ней, равна нулю. В то же время при тех же условиях ЭДС в обмотке C будет иметь максимальное значение. Очевидно, что при $\alpha = 90^\circ$ максимальное значение ЭДС будет в обмотке S , а нулевое – в обмотке C .

Если в одной из роторных обмоток синусно-косинусно вращающегося трансформатора подключить нагрузочное сопротивление Z_{HS} или Z_{HC} , то ток I_{sin} , I_c , протекающий по этой обмотке, создаст магнитный поток реакции Φ_p , ось которого совпадает с осью соответствующей обмотки ротора. Этот магнитный поток можно разложить на две составляющие: по продольной оси обмотки статора и поперечной оси. Продольная составляющая магнитного порока ротора Φ_p уравнивается магнитным потоком статора, как в трансформаторах. Поперечная составляющая магнитного потока ротора остается неуравновешенной и создает пульсирующий магнитный поток, возбуждающий в обмотке ротора значительную ЭДС, зависящую от угла поворота α ротора и создает значительное отклонение зависимостей (7.2) и (7.3) выходного напряжения от угла поворота. Для устранения погрешности, обусловленной поперечным потоком, применяют компенсацию поперечного потока ротора (симметрирование трансформатора). Существует два способа симметрирования: первичное (со стороны статора) и вторичное (со стороны ротора).

При первичном симметрировании для уменьшения поперечного потока (рис. 7.5) компенсирующую обмотку K статора замыкают на какое-либо малое сопротивление Z_k или накоротко.

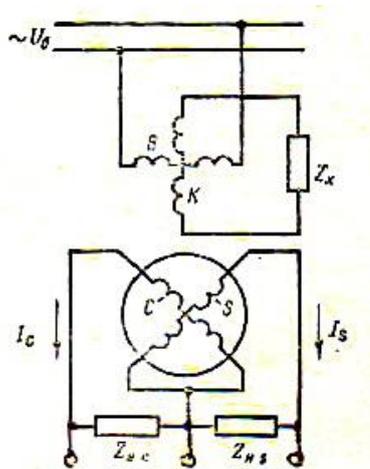


Рис. 7.5

В замкнутой компенсационной обмотке появится индукционный ток, магнитный поток которого уравновесит (скомпенсирует) поперечный магнитный поток ротора.

Можно уменьшить погрешность выходного напряжения, снимаемого с синусоидальной обмотки S , подключив к косинусной обмотке сопротивление $z_{НС}$. Полное симметрирование будет иметь место при равенстве результирующих сопротивлений обеих фаз обмотки ротора, т. е. $z_S + z_{НС} = z_C + z_{НС}$.

Для компенсации поперечной составляющей магнитного потока ротора достаточно было бы одного из способов компенсации – введение дополнительной обмотки K в статор или устройство двухобмоточного ротора. Для вращающихся трансформаторов применяют одновременно оба метода компенсации, так как на практике трудно подобрать равенство (симметричность) сопротивлений $z_{НС} = z_{НС}$.

Рассмотренные методы компенсации поперечной составляющей потока ротора позволяют использовать в качестве выходной как синусную, так и косинусную обмотки. Поэтому вращающийся трансформатор, используемый по схеме, представленной на рис. 7.5, называют синусно-косинусным.

7.3. Сельсины

Сельсинами называют электрические машины переменного тока, служащие для синхронного и синфазного поворота или вращения двух или нескольких механически не связанных между собой валов. Их используют в системах синхронной связи. Одну из машин, механически соединенную с ведущим валом, называют датчиком, а другую, соединенную с ведомым валом непосредственно или с помощью промежуточного исполнительного двигателя, приемником.

Системы синхронной связи делят на два вида: синхронного поворота на ограниченный угол и синхронного вращения. Система стремится ликвидировать рассогласование между положениями роторов датчика и приемника, которое характеризуется углом рассогласования, и свести его величину к нулю.

Различают два основных режима работы сельсинов: индикаторный и трансформаторный. При индикаторном режиме ротор сельсина-приемника соединен непосредственно с ведомым валом. Его применяют при малом значении тормозного момента на ведомом валу.

При трансформаторном режиме сигнал о наличии рассогласования между положениями роторов датчика и приемника подается через усилитель на исполнительный двигатель, который поворачивает ведомый вал и ротор сельсина-

приемника, ликвидируя рассогласование. Трансформаторный режим применяют в том случае, когда к ведомому валу приложен значительный тормозной момент, т. е. когда приходится поворачивать исполнительный механизм.

Сельсины имеют две обмотки: первичную, или обмотку возбуждения и вторичную, или обмотку синхронизации. В системах автоматики используют **однофазную** обмотку возбуждения для создания пульсирующего магнитного поля, ее размещают на статоре. Обмотка синхронизации является трехфазной, располагается на роторе. Катушки трехфазной обмотки смещены в пространстве друг относительно друга на 120^0 , но протекающие по ним токи имеют одну и ту же временную фазу. Трехфазную обмотку всегда выполняют распределенной, фазы ее соединяют в «звезду». Так как магнитное поле в сельсинах переменное, статор и ротор собирают из изолированных листов электрической стали. Сельсины обычно выполняют двухполюсными.

Принцип работы сельсина не зависит от места расположения каждой из обмоток. Иногда однофазная обмотка размещается на роторе, а трехфазная обмотка синхронизации – на статоре. В этом случае уменьшается количество контактных колец, к которым присоединяют обмотку ротора и количество скользящих контактов кольца и щеток. Сельсины позволяют при постоянном напряжении на входе получить на второй обмотке систему напряжений, амплитуда и фаза которых определяется угловым положением ротора.

Рассмотрим принцип действия и устройство однофазных двухполюсных контактных сельсинов.

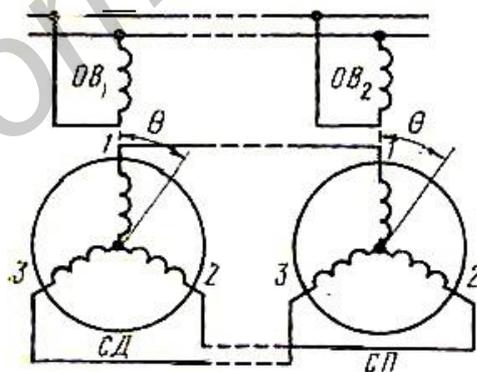


Рис. 7.6

При работе в индикаторном режиме (рис. 7.6) конструкции сельсин-датчиков (СД) и сельсин-приемников (СП) одинаковы. При включении обмоток возбуждения $ОВ_1$ и $ОВ_2$, расположенных на статорах, в сеть однофазного переменного тока в катушках синхронизации 1, 2 и 3 возникает индуцированная ЭДС; величина и фаза ЭДС в каждой катушке зависит от положения ротора сельсина относительно полюсов статора. Обмотки синхронизации обычных

сельсинов соединены между собой линией связи (ЛС). При одинаковой ориентации роторов СД и СП относительно обмоток возбуждения в каждой паре катушек индуцируются одинаковые ЭДС, и ток в линии связи отсутствует. При повороте ротора СД на некоторый угол θ равновесие нарушается, в линии связи возникают токи, в результате чего на роторе СП появляется вращающийся момент – момент синхронизации. Вращение ротора под действием момента синхронизации происходит до тех пор, пока в линии связи не исчезнут токи, т. е. пока ротор не повернется на тот же угол θ .

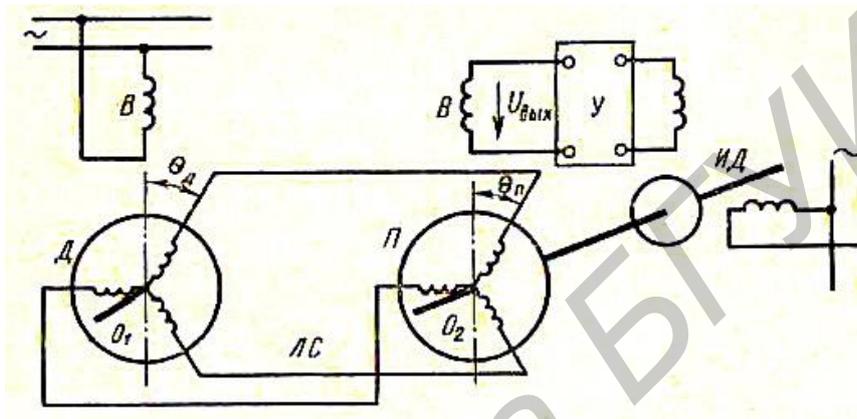


Рис. 7.7

При работе сельсинов в трансформаторном режиме (рис. 7.7) обмотка возбуждения В сельсина-датчика подключена к сети однофазного переменного тока, ротор сельсина-датчика механически связан с ведущим валом O_1 . Обмотка возбуждения сельсина-приемника подключена к усилителю У, подающему питание на обмотку исполнительного двигателя ИД. Переменный ток, проходящий по обмотке возбуждения сельсина-датчика, создает в нем пульсирующий магнитный поток, который индуцирует ЭДС в трех фазах обмотки синхронизации. Так как обмотки синхронизации датчика и приемника соединены между собой линией связи, то по ним будет протекать ток, вследствие чего в сельсине-приемнике создается свой пульсирующий магнитный поток. Если имеет место рассогласование положений роторов датчика и приемника, то этот поток индуцирует в обмотке возбуждения приемника некоторую ЭДС, и на зажимах ее появляется выходное напряжение $U_{\text{вых}}$. Это напряжение через усилитель передается на обмотку управления исполнительного двигателя, который поворачивает ведомый вал O_2 совместно с ротором приемника. При ликвидации рассогласования выходное напряжение становится равным нулю и вращение ведомого вала прекращается.

8. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

8.1. Элементы электромагнитных устройств

Электромагнитное устройство (ЭМУ) представляет собой преобразователь электрического сигнала в механическое перемещение. В качестве двигателя в ЭМУ используют электромагнит (ЭМ) с подвижным ферромагнитным элементом. Используют ЭМУ в качестве исполнительных электромагнитных механизмов в коммутационных устройствах электроавтоматики, телеметрии (реле коммутационные, токовые, напряжения, контакторы, магнитные пускатели, шаговые переключатели и т. д.); в устройствах для управления клапанами, золотниками, вентилями т. п.; в устройствах для создания удерживающей или тормозящей силы (стопорные, переключающие, зажимные, тормозные, арретирующие); в электромагнитных муфтах, служащих для включения и отключения исполнительных механизмов, их реверса, ограничения момента; в электромагнитных шаговых приводах и т. д.

Несмотря на многообразие выполняемых функций и конструктивных решений, в любом электромагнитном исполнительном механизме можно выделить две основные части – электромагнит, который играет роль двигателя, и передаточный механизм (ПМ). Простейший ЭМ состоит из одной или нескольких обмоток и магнитной цепи. Обмотка служит для создания необходимого магнитного потока, а магнитная цепь – для его формирования, сосредоточения и проведения в нужном направлении. На рис. 8.1, а представлен ЭМ электромагнитного реле. Магнитная цепь содержит магнитопровод, выполненный из ферромагнитных материалов и имеет воздушные зазоры, с ее помощью замыкается магнитный поток. В свою очередь магнитопровод состоит из сердечника 1, на который устанавливается обмотка, подвижного элемента – якоря 3 и ярма 2 – участка магнитопровода, соединяющего якорь и сердечник или сердечники между собой.

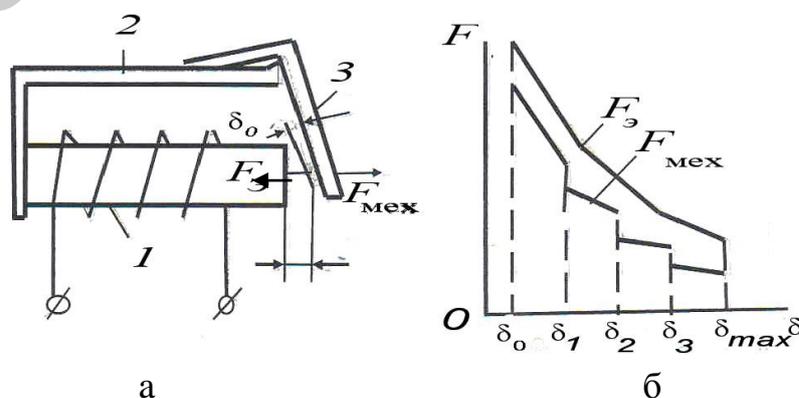


Рис. 8.1

Якорь электромагнита механически связан с рабочим звеном исполнительного механизма (контактными пружинами, золотником, заслонкой и т. п.), создающим силы сопротивления $F_{\text{мех}}$ его движению (рис. 8.1, б). Зазор между подвижной и неподвижной частями магнитопровода называют рабочим, или основным и обозначают δ . При прохождении магнитного потока через рабочий зазор создается тяговое усилие F_z (рис. 8.1, б), благодаря которому электромагнит, преодолевая силы механического сопротивления, притягивает якорь, перемещая тем самым рабочее звено исполнительного механизма. Остальные воздушные зазоры, образованные в местах сочленения отдельных элементов магнитопровода, называют нерабочими или паразитными. Поверхности, обращенные к рабочему зазору, называют полюсами. Иногда к сердечнику, обращенному к рабочему воздушному зазору, присоединяется полюсной наконечник, который имея большее чем сердечник сечение, облегчает проведение магнитного потока через зазор.

Часть полного магнитного потока Φ , создаваемого обмоткой, которая проходит через воздушный рабочий зазор δ , называют рабочим магнитным потоком Φ_δ . Рабочий поток обуславливает силы, под действием которых совершается перемещение якоря. Возврат якоря в исходное положение осуществляется с помощью возвратной пружины, силы тяжести якоря и т. д. Часть магнитного потока Φ , которая не замыкается через рабочий зазор, называется потоком рассеяния или утечки Φ_y . Так как знак силы притяжения, возникающей в рабочем зазоре, не зависит от знака магнитного потока (направления тока в обмотке), т. е. не зависит от полярности подаваемого на обмотку напряжения, электромагнит называют нейтральным.

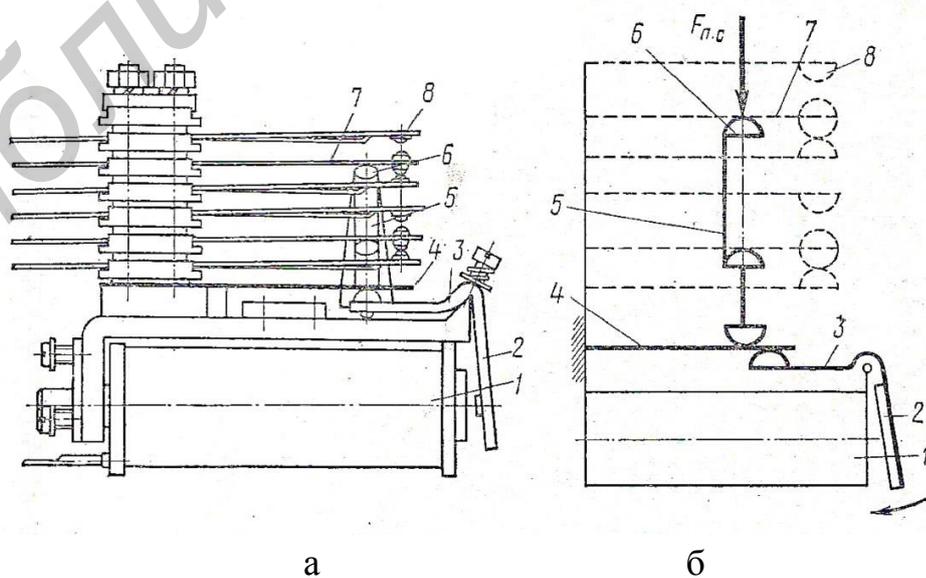


Рис. 8.2

Вид передаточного механизма (ПМ) определяется функциональным назначением ЭМУ и может иметь разное конструктивное исполнение с использованием разных механических элементов (валов, опор, упругих элементов, зубчатых, шарнирно-рычажных, кулачковых и других передач).

На рис. 8.2 изображено электромагнитное реле с электромагнитом 1. ПМ в нем состоит из двухплечего рычага 3, одним из плеч которого служит якорь 2 электромагнита и рычажной передачи из рычага 3 и толкателя 5. При включении реле подвижный элемент – якорь 2, поворачиваясь относительно ножевой опоры, своим плечом 3 перемещает толкатель 5, который упорами 6, преодолевая силу сопротивления контактных пружин 7 и плоской возвратной пружины 4, изгибает их до замыкания контактов 8 (элемент нагрузки – контактные пружины – на схеме изображен штрихованными линиями). После отключения реле якорь 2 возвращается в исходное положение плоской пружиной 4.

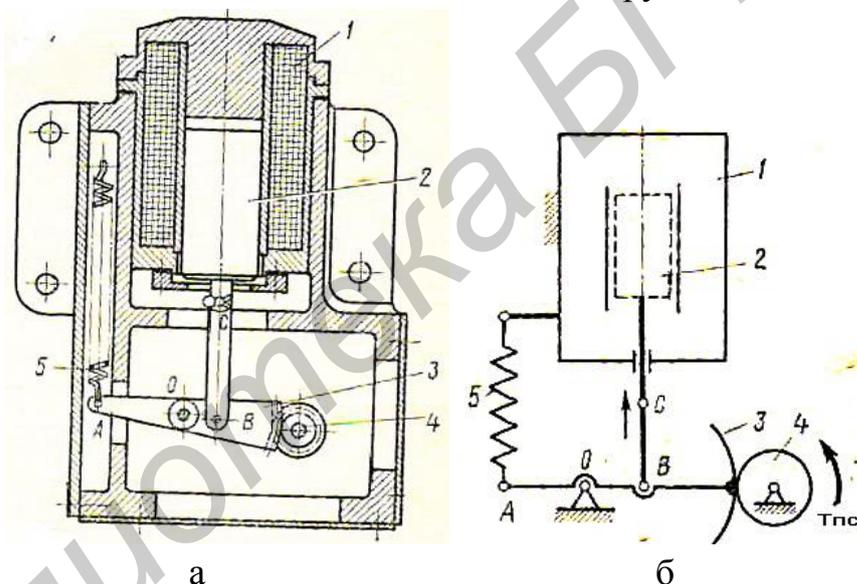


Рис. 8.3

На рис. 8.3 представлено силовое ЭМУ. Якорь 2 электромагнита 1 играет роль ползуна кривошипно-ползунной передачи, в которой кривошипом является участок ОВ зубчатого сектора 3, а ползуном – якорь 2. Кроме этой передачи, в состав ПМ входит также зубчатая передача сектор – колесо 4. При включении устройства якорь, втягиваясь в ЭМ, тянет за рычаг ВС, который заставляет поворачиваться сектор 3 и колесо 4. При этом преодолевается момент сил полезного сопротивления $T_{пс}$ устройства, приложенный к оси колеса 4. В исходное положение ПМ после отключения ЭМ возвращается винтовой пружиной 5. Основное внимание при изучении ЭМУ уделяется электромагниту как наиболее

сложному и специфическому узлу электромагнитных исполнительных механизмов.

8.2. Классификация электромагнитных исполнительных механизмов

Электромагнитные исполнительные механизмы (ЭИМ) классифицируют по роду тока, назначению, особенностям конструкции и другим признакам.

В зависимости от рода питающего тока различают три основные группы ЭИМ: ЭИМ постоянного тока нейтральные, они питаются постоянным током, а их действие не зависит от направления тока; ЭИМ постоянного тока поляризованные, их действие зависит от направления тока; ЭИМ переменного тока, питающиеся переменным током. В приборах чаще всего находят применение ЭИМ постоянного тока нейтральные. ЭИМ постоянного тока в сравнении с ЭИМ переменного тока при прочих равных условиях имеют значительно меньшие массу, габариты, потребляемую мощность, больший коэффициент полезного действия, способны развивать большие тяговые усилия или движущие моменты. Кроме того, в ЭИМ переменного тока тяговые усилия имеют импульсный характер, что нежелательно и может привести к нарушению нормальной работы устройства. Часто в приборных устройствах, в которых имеется питающая сеть только переменного тока, выгоднее установить специальный выпрямитель, чем использовать ЭИМ переменного тока.

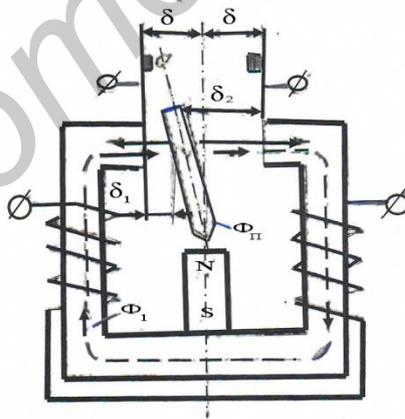


Рис. 8.4

В автоматических и измерительных устройствах часто требуется, чтобы электромагниты реагировали не только на значения, но и на полярность тока на входе. Такую реакцию у ЭИМ постоянного тока получают путем использования специальной магнитной цепи, включающей в себя не только магнитомягкий магнитопровод, но и постоянный (полярирующий) магнит. Схема поляризованного ЭИМ представлена на рис. 8.4.

В системе всегда существует поток постоянного магнита $\Phi_{\text{п}}$, разветвляющийся на две части по двум ветвям магнитопровода. Якорь расположен посередине между ветвями магнитопровода так, что каждая из ветвей имеет свой рабочий зазор. Тяговые усилия, создаваемые частями потока постоянного магнита, направлены встречно (каждое стремится уменьшить свой зазор) и при среднем положении якоря уравниваются друг друга. Но среднее нейтральное положение якоря неустойчиво, так как даже при незначительном отклонении от него появляется результирующая сила, направленная в сторону меньшего зазора. Чем больше смещается якорь от нейтрального положения, тем больше величина результирующей силы. Этой силой якорь удерживается в крайнем (в нашем случае – левом) положении.

При подаче тока в обмотку электромагнита в системе возникает созданный ею поток $\Phi_{\text{т}}$, замыкающийся по наружному контуру в направлении, определяемом полярностью тока в обмотке. Выбираем направление тока в обмотке таким, чтобы поток $\Phi_{\text{т}}$ был направлен встречно потоку $\Phi_{\text{п}}$ в левом зазоре. В этом случае по мере возрастания потока $\Phi_{\text{т}}$ суммарный поток и тяговое усилие в зазоре δ_1 будут уменьшаться, а в зазоре δ_2 – увеличиваться. В результате якорь перекинется в правое положение и останется в этом положении при снятии напряжения в обмотке. Для возвращения якоря в левое положение в обмотку должен быть подан ток обратной полярности. Управление поляризованным реле можно вести с помощью кратковременных импульсов, достаточных по значению для перевода якоря через нейтральное положение. Обычно длительность импульса рассчитывают так, чтобы он действовал в течение всего времени переброса якоря, что позволяет получить высокое быстродействие. Рассмотренная конструкция относится к двухпозиционному реле, якорь может быть в одном из двух возможных положений. В тех случаях, когда требуется чтобы после снятия напряжения с обмотки якорь не оставался в одном из крайних положений, а возвращался и фиксировался в нейтральном положении, применяются трехпозиционные реле. Возвращение и фиксация якоря в нейтральном положении у трехпозиционных реле достигается с помощью пружин.

В зависимости от величины развиваемого усилия подвижной частью якорем ЭИМ делят на силовые и контактные реле, т. е. электромагнитные механизмы, снабженные контактной системой. В приборостроении очень широко используются электромагнитные реле. Это устройства с разрывными контактами, скачкообразно срабатывающие при достижении током или напряжением определенного значения. Существуют две основные конструктивные схемы реле: с угловым движением якоря (рис. 8.5, а) и поступательно перемещающимся тягиваемым якорем (рис. 8.5, б).

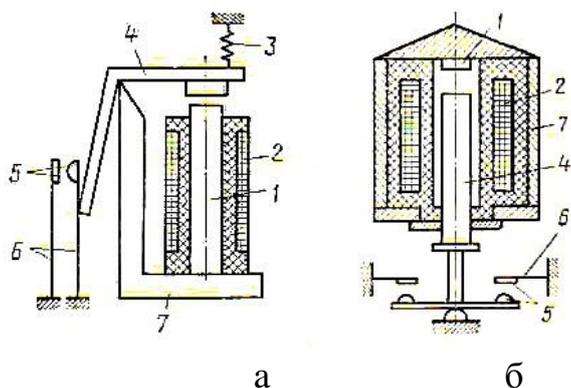


Рис. 8.5

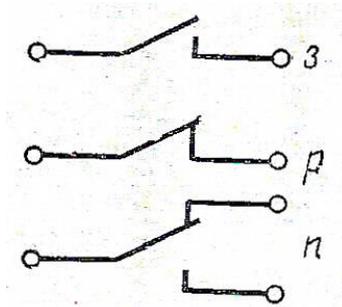


Рис. 8.6

При прохождении тока через катушку 2 возникает магнитный поток, проходящий через сердечник 1, ярмо 7, якорь 4 и воздушный зазор. Под действием магнитного поля возникает сила, перемещающая якорь. Происходит замыкание контактов 5, закрепленных на контактно-несущих пружинах 6. При обесточивании катушки якорь занимает первоначальное положение либо под действием собственного веса (рис. 8.5, б), либо под действием пружины 3 (рис. 8.5, а).

Реле характеризуются током срабатывания $I_{ср}$, при котором происходит замыкание контактов; током отпускания $I_{от}$, при котором происходит размыкание контактов; временем срабатывания от момента подачи напряжения до замыкания контактов и временем отпускания $t_{от}$ от момента отключения реле до размыкания контактов; потребляемой мощностью $P_{п}$ (мощность, расходуемая реле в рабочем состоянии), мощностью управления $P_{у}$ (мощность коммутируемой цепи) и коэффициентом управления $K = P_{у}/P_{п}$.

По назначению реле подразделяют на пусковые для ввода в действие различных устройств; максимальные и минимальные – для отключения или включения цепей при токе или напряжении, больших или меньших определенного значения; для создания требуемой выдержки времени при включении цепи. По мощности управления реле подразделяют на маломощные ($P_{у} \leq 1$ Вт), средней мощности (1 ... 10 Вт) и мощные (>10 Вт). По времени срабатывания реле подразделяют на безынерционные ($t_{ср} \leq 0,001$ с), быстродействующие (0,005 ... 0,05 с), нормальные (0,05 ... 0,15 с) и замедленные (0,1 ... 1,0 с).

Схемы коммутации реле разнообразны (рис. 8.6). Они могут содержать контакты, которые при подаче тока в обмотку катушки замыкаются (условное обозначение – «З»), размыкаются (условное обозначение – «р») или переключаются (условное обозначение – «п»). Если на схеме указывается «1з – 2п», то это значит, что реле имеет один замыкающий и два переключающих контакта. Реле может одновременно иметь слабо- и средненагруженные контакты.

При разработке приборного устройства, содержащего реле, следует учитывать, что в рабочем состоянии реле выделяет теплоту, и поэтому его следует размещать так, чтобы обеспечить наилучший теплоотвод от него. При наличии в устройстве теплочувствительных элементов их необходимо изолировать от реле тепловыми экранами.

Существующие в настоящее время электромагнитные устройства классифицируют также по расположению якоря: с внутренним или втягивающимся якорем (ЭИМ соленоидного или втяжного вида) и с внешним якорем (клапанного типа); по форме магнитопровода.

8.3. Расчет магнитной цепи электромагнитного механизма

Магнитной цепью называется совокупность элементов из ферромагнитных материалов, образующих замкнутую цепь, в которой при наличии (намагничивающей) магнитодвижущей силы образуется магнитный поток, и вдоль которой замыкаются линии магнитной индукции. Магнитодвижущая сила создается обмоткой электромагнита, для соленоида она равна $F_M = Iw$, где I – ток в обмотке; w – число витков обмотки электромагнита.

При расчете магнитных цепей удобно использовать электрические схемы замещения магнитных цепей. Аналогия электрических и магнитных цепей позволяет произвести в схеме замещения следующие замены: силу тока I заменяют магнитным потоком Φ ; электродвижущую силу источника питания E – магнитодвижущей силой F_M ; падение электрического потенциала U – падением магнитного потенциала U_m ; электрическое сопротивление R – магнитным сопротивлением R_m ; электрическую проводимость G – магнитной стью G_m . При этом магнитная цепь рассчитывается с использованием приемов и способов расчета электрических цепей.

Исходными законами при расчете магнитных цепей постоянного тока являются правила Кирхгофа и закон Ома. Согласно первому правилу Кирхгофа, алгебраическая сумма магнитных потоков в любом узле (точке) магнитной цепи равна нулю, т. е. $\sum \Phi_i = 0$. Согласно второму правилу Кирхгофа, алгебраическая сумма падений магнитного потенциала по замкнутому контуру магнитной цепи равна алгебраической сумме магнитодвижущих сил, действующих в этом контуре. Если считать, что на отдельных участках длиной l_i магнитной цепи напряженность H_i и магнитный поток Φ_i постоянны, то это правило принимает вид

$$\sum U_{mi} = \sum F_{mi}, \quad (8.1)$$

где $U_{mi} = H_i l_i$ – магнитные напряжения на i -м участке длиной l_i контура магнитной цепи; $F_{mi} = I_i \cdot w_i$ – i -я магнитодвижущая сила.

Закон Ома для магнитной цепи будет иметь вид

$$\Phi = U_m / R_m. \quad (8.2)$$

Известно, что $\Phi = B \cdot S$, где B – индукция магнитного потока, S – площадь поперечного сечения потока. Подставив значение $\Phi = H \cdot \mu \cdot \mu_\alpha S$ и $U_m = H \cdot l$ в уравнение (8.2) получим величину магнитного сопротивления магнитопровода длиной l и сечением S ;

$$R_m = l / (\mu \cdot \mu_o S), \quad (8.3)$$

где $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода. Соответственно проводимость магнитопровода

$$G_m = 1/R_m = (\mu \mu_o S) / l. \quad (8.4)$$

Для воздушного рабочего зазора величиной δ , когда $\mu = 1,0$ магнитное сопротивление

$$R_{m\delta} = \delta / (S_\delta \mu_o), \quad (8.5)$$

и соответственно проводимость рабочего зазора

$$G_{m\delta} = (\mu_o S_\delta) / \delta, \quad (8.6)$$

где S_δ – площадь поперечного сечения магнитного потока в рабочем зазоре.

Тогда магнитный поток в рабочем зазоре магнитопровода равен

$$\Phi_\delta = U_{m\delta} \cdot G_{m\delta} = (Iw)_\delta \mu_o S_\delta / \delta. \quad (8.7)$$

Задача (прямая задача) расчета магнитной цепи сводится к определению магнитодвижущей силы катушки или системы катушек, необходимой для создания заданного магнитного потока. Встречается и обратная задача, когда по заданной магнитодвижущей силе нужно определить магнитные потоки.

8.4. Механическая и тяговая характеристики электромагнита

Электромагнитный механизм представляет собой преобразователь электрического сигнала в механическое перемещение. Входной электрический сигнал подается на обмотку электромагнита. При этом обмоткой создается магнитный поток, замыкающийся по магнитопроводу, одна из частей которого, якорь, может перемещаться относительно неподвижных частей. Якорь электромагнита жестко связан с рабочим органом какого-либо исполнительного устройства (контактными пружинами, золотником, заслонкой и т.п.). Зависимость сил (моментов сил) сопротивления, приведенная к якорю в зависимости от положения якоря, т. е. величины рабочего зазора δ , называют механической характеристикой электромагнита ($F_{\text{мех}} = F_{\text{мех}}(\delta)$).

При прохождении магнитного потока через рабочий зазор создается тяговое усилие F_z , благодаря которому электромагнит, преодолевая силы механического сопротивления $F_{\text{мех}}$, притягивает якорь, перемещая тем самым рабочий орган исполнительного устройства. На якорь электромагнита во время переме-

щения действуют две силы, величины которых меняются в зависимости от положения якоря (рис. 8.1, б): тяговое усилие электромагнита $F_э$ и результирующее противодействующее усилие сил сопротивления $F_{мех}$, обусловленное силами механического сопротивления исполнительного механизма, инерционностью подвижных частей рабочего органа и их силами трения. В общем случае движение якоря возможно, когда $F_{мех} < F_э$ в любом положении якоря. Графические зависимости $F_{мех}$ и $F_э$ удобнее строить не от перемещения якоря, а от величины рабочего зазора (рис. 8.1, б), где δ_0 и δ_m – соответственно минимальное и максимальное значение рабочего зазора. Обеспечение условия $F_{мех} < F_э$ является одной из задач расчета электромагнита, при таком условии работа электромагнита будет устойчивой.

Кроме того, требуется согласование тяговой и механической характеристик. Слишком большое превышение тягового усилия над противодействующим приведет к ускоренному движению якоря и будет сопровождаться большим расходом энергии и большими ударными нагрузками на якорь. Желательно, чтобы тяговая характеристика на всем перемещении была незначительно выше механической, т. е. имела тот же наклон, что и механическая. Обычно зависимость $F_{мех} = f(\delta)$ или задана во всем диапазоне изменения зазора или рассчитывается методами дисциплины «техническая механика».

Значение тягового усилия определяют с учетом величины зазора. Наличие минимального зазора δ_0 , создаваемого за счет немагнитных прокладок-штифтов между якорем и ярмом, необходимо для надежного возвращения якоря в исходное положение после снятия напряжения в обмотке, так как возможно залипание якоря из-за остаточной намагниченности магнитопровода после снятия напряжения в обмотке.

8.5. Тяговое усилие электромагнита постоянного тока

В процессе срабатывания электромагнита возникает ЭДС самоиндукции

$$E = -Ldi/dt = -d\psi/dt = -wd\Phi/dt,$$

где L – индуктивность обмотки; $\Psi = w\Phi$ – потокосцепление обмотки; w – число витков обмотки; Φ – магнитный поток.

Учитывая, что ЭДС самоиндукции меньше подводимого к электромагниту напряжения на величину падения напряжения в обмотке, имеем $E = U - iR$. Тогда уравнение равновесия напряжения в процессе срабатывания будет

$$U = iR + wd\Phi/dt, \quad (8.8)$$

где U – напряжение источника питания цепи обмотки; R – активное сопротивление обмотки; i – мгновенное значение тока в обмотке.

После умножения уравнения (8.7) почленно на idt получим выражение

$$Uidt = i^2 Rdt + iwd\Phi, \quad (8.9)$$

показывающее, что полная энергия $Uidt$, потребляемая электромагнитом из сети за время dt , расходуется на нагрев обмотки ($i^2 Rdt$) и на создание магнитного поля ($iwd\Phi$). Энергия, затрачиваемая на создание тягового усилия, является частью энергии магнитного поля. Поэтому подробно рассмотрим последний член выражения (8.8). Вся энергия W , израсходованная на создание магнитного поля за время срабатывания электромагнита, может быть найдена как определенный интеграл в пределах изменения магнитного потока $W = \int^{\Phi} iwd\Phi$. Этот интеграл может быть определен графически как площадь фигуры, заключенной между кривой намагничивания и осью ординат (рис. 8.7)

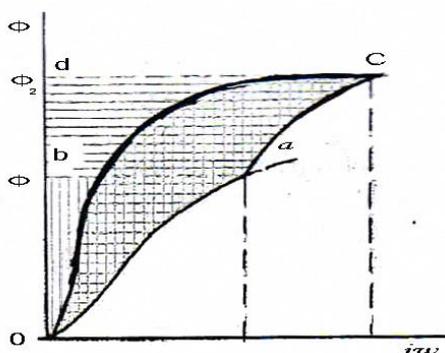


Рис. 8.7

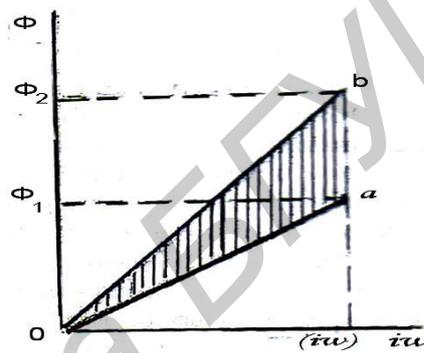


Рис. 8.8

Во время срабатывания электромагнита кривая намагничивания его магнитной цепи не остается постоянной. Процесс начинается при максимальном зазоре, который не меняется за время нарастания потока от нуля до значения величины потока трогания Φ_1 . Энергия, запасенная магнитным полем до момента трогания якоря, численно равна площади фигуры $OabO$, т. е. $W_1 = \int_0^{\Phi_1} iwd\Phi = S_{OabO}$.

Далее по мере притяжения якоря и уменьшения рабочего зазора до окончательного притяжения поток изменяется по переходной кривой ac , а энергия, перешедшая в энергию поля за время движения якоря равна площади фигуры $acdb$, т. е. $W_2 = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} iwd\Phi = S_{acdb}$.

Вся энергия, преобразованная в энергию поля при срабатывании электромагнита, будет соответствовать площади фигуры $OacdbO$. Но после притяжения якоря энергия, запасенная полем, будет определяться площадью фигуры, заключенной между кривой намагничивания Oc , соответствующей минимальному зазору, и осью ординат, т. е. $W_3 = S_{OcdbO}$. Тогда энергия, потраченная на притяжение якоря, $W_3 = W_1 + W_2 - W_3 = S_{OacO}$.

Нелинейность кривых намагничивания затрудняет точный аналитический расчет энергии, потраченной на перемещение якоря. Поэтому введем два допущения, позволяющие существенно упростить задачу при сохранении необходимой точности: ограничим рассмотрение кривой намагничивания начальным, линейным участком; будем считать магнитодвижущую силу $(iw)_\delta$ обмотки электромагнита в процессе движения якоря неизменной. Тогда графическое представление энергии поля в процессе срабатывания будет иметь вид, представленный на рис. 8.8.

Энергия поля, потраченная на притяжение якоря, равна

$$W_3 = \int dW_3 = S_{\text{обмотки}} = \frac{1}{2} (iw)_\delta (\Phi_2 - \Phi_1).$$

Она равна работе тяговой силы F_3 электромагнита на всем перемещении якоря, т. е.

$$W_3 = A_3 = \int dA_3 = \int F_3 d\delta.$$

Для устойчивой работы электромагнита в любом положении якоря необходимо соблюдение условия

$$dW_3 = dA_3 \quad \text{или} \quad \frac{1}{2} (iw)_\delta d\Phi = F_3 d\delta,$$

откуда
$$F_3 = \frac{1}{2} (iw)_\delta \frac{d\Phi}{d\delta}. \quad (8.10)$$

Учитывая, что закон Ома для магнитной цепи имеет вид $\Phi = (iw)_\delta \cdot G_m$, и считая $(iw)_\delta = \text{const}$, определим $d\Phi = (iw)_\delta dG_m$. Тогда выражение (8.10) примет вид

$$F_3 = \frac{1}{2} (iw)_\delta^2 \frac{dG_m}{d\delta}. \quad (8.11)$$

Но $G_{m\delta} = (\mu_0 S)/\delta$, а $dG_{m\delta}/d\delta = (-\mu_0 S)/\delta^2$, поэтому выражение (8.11) примет вид

$$F_3 = -\frac{1}{2} (iw)_\delta^2 \frac{\mu_0 S}{\delta^2}, \quad (8.12)$$

т. е. тяговая характеристика электромагнита постоянного тока представляет собой обратно пропорциональную квадратичную зависимость от рабочего зазора и имеет круто спадающий характер изменения $F_3 = f(\delta^2)$.

Из выражения (8.6) определяем магнитодвижущую силу в зазоре $(iw)_\delta = \Phi_\delta / G_{m\delta}$. Подставив ее значение в уравнение (8.11), выразим величину тяговой силы электромагнита в виде

$$F_3 = \frac{1}{2} \frac{\Phi_\delta^2}{G_{m\delta}^2} \frac{dG_m}{d\delta}. \quad (8.13)$$

Выражения (8.12) и (8.13) эквивалентны. Подставим в уравнение (8.13) значения $G_{m\delta}$ из (8.6), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ и $dG_{m\delta}/d\delta$ получим

$$F_3 = 3.95 \cdot 10^5 \Phi_\delta^2 / S_\delta. \quad (8.14)$$

Учитывая, что $\Phi_\delta = B_\delta \cdot S_\delta$, выражение (8.14) примет вид

$$F_3 = \frac{1}{2} \frac{B_\delta^2 S_\delta}{\mu_0} = 3.95 \cdot 10^5 B_\delta^2 S_\delta, \quad (8.15)$$

где Φ_δ , B_δ , S_δ – соответственно магнитный поток, магнитная индукция поля и площадь потока в рабочем зазоре электромагнита.

Выражения (8.14) и (8.15) известны как формулы Максвелла и благодаря своей простоте часто используются для предварительных расчетов. Они лишь косвенно связывают величину тягового усилия с величиной зазора, показывая, что максимальное тяговое усилие определяется при минимальном зазоре величиной магнитодвижущей силы и магнитным сопротивлением (проводимостью) зазора. Зависимость (8.12) определяет тяговую характеристику электромагнита от величины зазора, зависимость (8.15) используют при проектных расчетах электромагнита.

8.6. Расчет электромагнита постоянного тока

Задачей расчета является определение размеров и обмоточных данных катушки, позволяющих обеспечить необходимое тяговое усилие электромагнита F_3 . В задание входят следующие обязательные параметры: величины механической характеристики, рабочего зазора δ и подводимого к электромагниту напряжения U . Прочие параметры (быстродействие, особые требования) могут не оговариваться.

Исходя из назначения электромагнита, технологии и экономичности производства, удобства эксплуатации, имеющегося в наличии материала или возможности его приобретения, выбирают конструкцию и материал магнитопровода. В качестве материала магнитной цепи используют низконикелевые пермаллои 45НП; 50НП с соответственно 45 или 50 % никеля, высококачественные низкоуглеродистые ($C < 0,04$ %) стали с повышенной магнитной проницаемостью μ и высоким значением индукции насыщения B_m . После выбора материала магнитопровода определяют индукцию B_δ в рабочем зазоре с учетом рассеяния магнитного потока приблизительно в 20 – 60 %. При этом считают, что $B_\delta = B_m / (1,2 - 1,6)$, желательно, что бы величина B_m была близка к значению индукции на колене перегиба кривой намагничивания выбранного материала магнитопровода.

Сечение сердечника рассчитывают исходя из обеспечения необходимого усилия при максимальном зазоре, используя зависимость (8.15).

$$S = 2\mu_0 F_3 / B_\delta^2,$$

где F_3 – тяговое усилие электромагнита при максимальном зазоре.

Обмотки электромагнита могут выполняться как на специальных каркасах (рис. 8.9), так и без них. Форма каркаса (круглая или прямоугольная) опре-

деляется фигурой сечения сердечника. При выборе круглого сечения диаметр сердечника равен $d_s = \sqrt{4S/\pi}$.

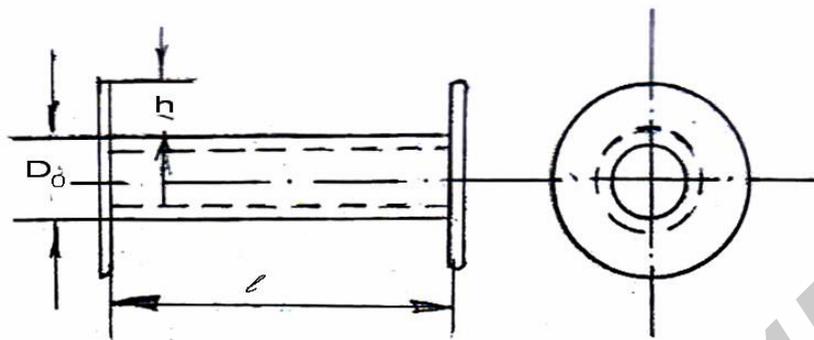


Рис. 8.9

Диаметр каркаса D_0 выбирают с учетом прочности и жесткости катушки. Далее определяют магнитодвижущую силу в зазоре $(iw)_\delta$, необходимую для создания выбранного значения индукции в зазоре из зависимости

$$(iw)_\delta = \Phi R_{m\delta} \text{ или } (iw)_\delta = (B_\delta \cdot S)(\delta/\mu_0 S) = B_\delta \delta/\mu_0,$$

где δ – максимальное значение зазора; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$.

С учетом потерь магнитодвижущей силы в нерабочих зазорах магнитопровода (20 – 30 %), полная магнитодвижущая сила обмотки равна

$$(iw)_p = (1,2 - 1,3)(iw)_\delta = (1,2 - 1,3)B_\delta \delta/\mu_0.$$

На основе зависимости между магнитодвижущей силой и размерами катушки находят параметры обмоточного окна каркаса $(iw)_p = (l \cdot h)K_3 \cdot j$, где j – допустимая величина плотности тока в катушке; K_3 – коэффициент заполнения обмоточного окна $l \cdot h$ активным материалом провода. Обычно при предварительном расчете принимают $j = 3-4 \text{ А/мм}^2$ и $K_3 = 0,25-0,3$. Определив $l \cdot h$ и задавшись соотношением между величинами l и h , например, длиной катушки l , определяют высоту обмоточного окна каркаса h .

Далее выбирают диаметр обмоточного провода и число витков обмотки. Так как тяговое усилие электромагнита является функцией магнитодвижущей силы, одно и то же ее значение $(iw)_p$ может быть получено изменением или тока или числа витков, поэтому при расчете учитывают дополнительные требования, которым должен соответствовать электромагнит. Наиболее часто предъявляют требования получения максимальной чувствительности или получения минимальных габаритов электромагнита.

Расчет на максимальную чувствительность или на полное заполнение обмоточного окна ведется по плотности тока с учетом электрического сопротивления обмотки R .

$$R = w \cdot R_{\text{ср}} = w \cdot \rho l_{\text{ср}} / S = 4w\rho(D_o + h)/d^2, \quad (8.16)$$

где w – число витков; $R_{\text{ср}}$ – сопротивление среднего витка; ρ – удельное электрическое сопротивление материала витков (для меди $\rho = 0,0172 - 0,0182 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$); $l_{\text{ср}} = \pi(D_o + h)$ – длина среднего витка; $\pi d^2 / 4$ – токопроводящее сечение витка диаметром d .

Магнитодвижущую силу катушки можно выразить как

$$(iw)_\rho = wU/R = U/R_{\text{ср}}, \quad (8.17)$$

где U – напряжение питания.

После подстановки в (8.17) величины $R_{\text{ср}}$ из (8.16) определим диаметр токопроводящего сечения витков:

$$d = \sqrt{\frac{4\rho(D_o+h) \cdot (iw)_\rho}{U}}.$$

Далее, задавшись маркой провода и соответственно диаметром провода с изоляцией d_B , определяют число витков $w = l \cdot h / d_B^2$, где d_B^2 – размер сечения провода с изоляцией в обмоточном окне при упорядоченной намотке витков. Номинальный ток в витках катушки электромагнита равен

$$I_{\text{ном}} = U/R.$$

Расчет заканчивается проверкой плотности тока $j = 4I_{\text{ном}}/\pi d^2$, которая должна быть не более допустимой по условиям работы электромагнита, т. е. $j \leq j_{\text{доп}}$. Ориентировочно можно принять допустимую плотность тока $j_{\text{доп}}$ при длительном режиме работы не выше $3 \text{ А}/\text{мм}^2$, при повторно-кратковременном режиме – не выше $7 \text{ А}/\text{мм}^2$ и при кратковременном – не выше $12 \text{ А}/\text{мм}^2$.

При расчете электромагнита на минимальные габариты или на максимально допустимый нагрев исходят из условия, что плотность тока в обмотке сразу берется максимально допустимой по режиму работы. Тогда

$$h_{\text{мин}} = (iw)_\rho / l \cdot K_3 \cdot j_{\text{доп}}.$$

8.7. Тяговое усилие электромагнита переменного тока

При питании обмотки электромагнита переменным током происходит циклическое перемагничивание сердечника с частотой питающего напряжения, что вызывает потери на вихревые токи. Поэтому в отличие от электромагнита постоянного тока магнитопровод электромагнита переменного тока выполняется шихтованным, т. е. набирается из тонких изолированных друг от друга пластин.

Второй отличительной особенностью электромагнита переменного тока является наличие индуктивного сопротивления обмотки $X_L = \omega L = 2\pi fL$, которое влияет и на переходный, и на установившийся режим, т. к. ток в обмотке

определяется как величиной приложенного напряжения, так и комплексным сопротивлением $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$. В подавляющем большинстве случаев $X_L \gg R$, поэтому можно утверждать, что действующее значение тока в обмотке определяется практически ее индуктивным сопротивлением, т. е. $i = U/2\pi fL$.

При синусоидально изменяющемся напряжении ток и магнитный поток тоже изменяются циклически. Это приводит к циклическому изменению тягового усилия, что является третьей особенностью работы электромагнита переменного тока. Полученное ранее для тягового усилия электромагнита выражение $F_3 = \frac{1}{2} (i\omega)_\delta^2 dG_{m\delta}/d\delta$ справедливо как для постоянного, так и для переменного тока. Подставляя в это выражение значение тока в обмотке $i = I_m \sin \omega t$ (I_m – амплитуда переменного тока) и пренебрегая потерями магнитодвижущей силы в магнитопроводе и нерабочих зазорах, получим после несложных преобразований уравнение

$$F_3 = \frac{1}{2} (I_m \omega)^2 \frac{dG_{m\delta}}{d\delta} \cdot \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} (I_m \omega)^2 \frac{dG_{m\delta}}{d\delta} \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right),$$

которое показывает, что тяговое усилие электромагнита переменного тока меняется во времени с двойной частотой по сравнению с частотой питающего напряжения. Тяговое усилие электромагнита переменного тока можно рассматривать состоящим из двух составляющих: постоянной, равной среднеквадратичному значению тягового усилия $F_{cp} = \frac{1}{4} I_m^2 \omega^2 \frac{dG_{m\delta}}{d\delta}$ и переменной $F_{п} = F_{cp} \cos 2\omega t$.

Как следует из картины изменения тягового усилия электромагнита переменного тока (рис. 8.10, а), оно дважды за период питающего напряжения падает до нулевого значения и дважды достигает максимума, равного удвоенному среднему.

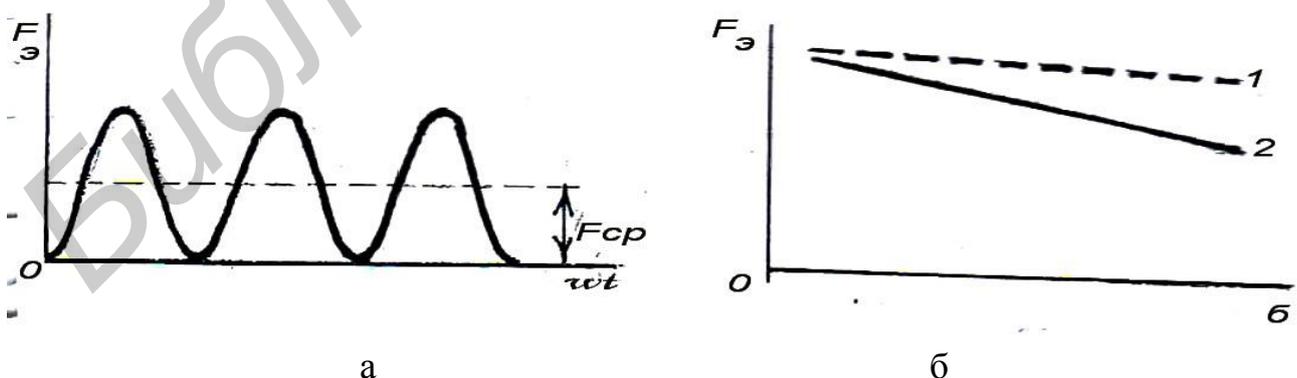


Рис. 8.10

Поэтому под тяговой характеристикой электромагнита переменного тока понимают зависимость не полного, а среднего тягового усилия от зазора $F_{cp} = f(\delta)$.

При прочих равных условиях (размерах, величине индукции) тяговое усилие электромагнита переменного тока равно $F_3 = 1,98 \cdot 10^5 B^2 S$. Оно вдвое меньше тягового усилия электромагнита постоянного тока и не зависит (рис. 8.10, б) от величины рабочего зазора. В реальных условиях тяговая характеристика электромагнита переменного тока не является абсолютно жесткой, так как с увеличением зазора значение тягового усилия несколько уменьшается. Это связано с увеличением потока рассеяния при увеличении рабочего зазора. Но уменьшение тягового усилия при увеличении зазора у электромагнитов переменного тока значительно меньше, чем у электромагнитов постоянного тока.

Допустим, что противодействующее усилие равно F_M (рис. 8.11). Тогда в промежутках времени $t_1 - t_2$ и $t_3 - t_4$ тяговое усилие оказывается меньше противодействующего, и якорь начинает отходить от сердечника.

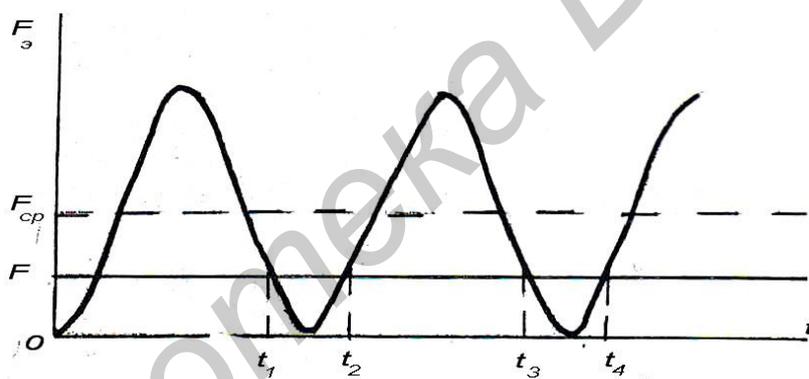


Рис. 8.11

Так как за период питающего напряжения тяговое усилие дважды становится меньше противодействующего, возникает отрицательное явление – вибрация якоря с двойной частотой питания напряжения. Из-за высокой частоты питания (50 Гц) и малости промежутка времени $t_1 - t_2$ якорь электромагнита успевает отойти на незначительное расстояние и вновь притянуться. Так как величина вибрации якоря зависит от инерционности подвижной системы, то наиболее простым решением борьбы с вибрацией является увеличение массы подвижных частей электромагнита. Но это ведет к снижению чувствительности и необходимости усиления конструкции, что является большим недостатком.

Вторым возможным путем борьбы с вибрацией якорного электромагнита переменного тока является использование многофазного переменного тока. Электромагнит выполняется из трех сердечников, имеющих общее ярмо и

якорь. На каждом сердечнике устанавливают отдельную обмотку. Питание обмоток осуществляется равными по частоте и величине напряжениями, сдвинутыми по фазе. Получим постоянство тягового усилия, действующего на якорь.

Изменение тягового усилия во времени приводит к тому, что время отпущения электромагнита переменного тока может быть разным в зависимости от того, какая величина тягового усилия соответствует моменту выключения питания.

8.8. Классификация контактных устройств

Среди электромагнитных механизмов наиболее широко используются коммутирующие устройства, предназначенные для различных переключений в слаботочных (реле) и сильноточных (контакторы, пускатели) электрических цепях. Электрическое соединение между отдельными элементами электрической цепи обеспечивается контактными устройствами, содержащими контактные пары. Группа контактов как составляющее устройства является неотъемлемой частью электромагнитного механизма. Надежность работы такого механизма во многом определяется работой контактов.

Электрическим контактом называют соединение двух или более токоведущих элементов электрической цепи. В зависимости от рода работы контактного устройства различают четыре группы электрических соединений: неразъемные, разъемные, скользящие и разрывные. Неразъемные электрические соединения предназначены для постоянного соединения элементов электрической цепи. Они подразделяются на сварные, паяные, зажимные и накрученные. Разъемные электрические соединения предназначены для периодического соединения и разъединения элементов обесточенной электрической цепи. Характерной особенностью этой группы соединений является то, что при прохождении тока контактная пара неподвижна и не изменяет своего положения. Скользящие электрические соединения служат для постоянного или периодического изменения относительного расположения элементов контактной пары. У них один элемент (часто это щетка) скользит относительно других. Они применяются в токосъемниках, коллекторах, потенциометрах и других устройствах и могут коммутировать как обесточенные электрические цепи, так и цепи с током. Разрывные электрические соединения служат для периодического размыкания и соединения элементов электрических цепей под током.

В каждой из четырех групп соединений контактные пары могут подразделяться по ряду признаков. Так в зависимости от формы зоны контактирования контактные пары делят на точечные, линейные и плоскостные. Понятия точечной и линейной форм являются условными, так как в месте соприкоснове-

ния всегда получается площадка с реальными размерами, но эти размеры пренебрежимо малы по сравнению с размерами самих контактов. Точечная форма получается при касании контактов типа сфера–сфера, сфера–плоскость, двух цилиндров, расположенных под углом 90° . Эти виды контактов характеризуются повышенными напряжениями в зоне контакта по сравнению с другими формами. Размер площади соприкосновения зависит от формы и размеров сопрягаемых поверхностей, физических свойств материалов контактов, величины контактного усилия. Точечную форму зоны контактирования имеют контакты большинства реле, кнопок, разъемов и т.п.

Линейная форма получается при касании контактов вида цилиндр–плоскость, цилиндр–цилиндр при параллельном расположении осей, в щеточных контактах (рис. 8.12).

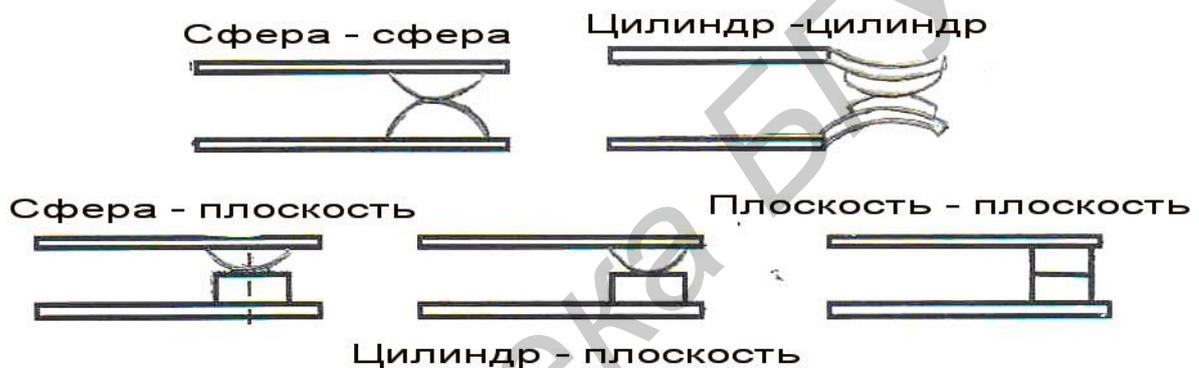


Рис. 8.12

Плоскостная форма получается при касании контактов в виде плоской поверхности. На рис. 8.12 представлены типы разрывных контактов с разными формами контактирующих поверхностей. Контакты с точечной и линейной формами зоны соприкосновения контактирующих поверхностей используют в слаботочных электрических цепях.

8.9. Физические явления в контактных парах

Во время работы элементы контактной пары могут находиться в четырех состояниях: замкнутом, в процессе размыкания, разомкнутом и в процессе замыкания.

В замкнутом состоянии в зоне контакта возникает дополнительное электрическое сопротивление. Поясним это на примере. Если измерить электрическое сопротивление двух стержней одинакового размера из одного материала, но одного целого, а другого – составленного из двух частей, то они окажутся разными. Электрическое сопротивление составного стержня больше на величину

сопротивления в зоне соприкосновения его частей, назовем его контактным R_k . Контактное сопротивление вызвано двумя причинами. Во-первых, оно связано с наличием поверхностных окисных пленок, которые препятствуют протеканию тока. От этого можно избавиться, поместив контакты в вакууме или путем создания контактных усилий прижатия, которые разрушают окисные пленки. Второй причиной появления контактного сопротивления является наличие микронеровностей (шероховатости) на поверхности контактов. Вследствие этого соприкосновение происходит не по всей поверхности, а только в отдельных точках. Суммарную площадь контакта называют эффективной (реальной). Прижимное усилие F_k создает удельное давление в зоне соприкосновения, и если оно больше напряжения смятия материала контакта, то ведет к дальнейшему сближению контактов и образованию новых площадок соприкосновения. Так как напряжение смятия определяется свойствами материала контактов и является постоянной величиной, то очевидно, что реальная площадь контакта будет определяться не только формой, но и силой прижима контактов. Она должна быть выбрана такой, чтобы обеспечить минимально необходимую для создания устойчивого контакта площадь соприкосновения.

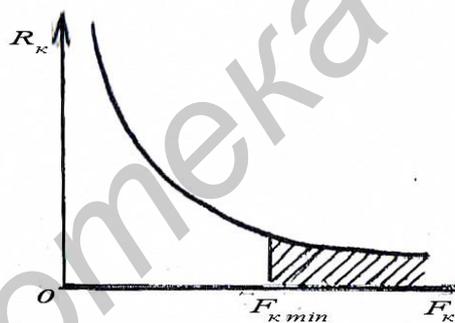


Рис. 8.13

Зависимость изменения контактного сопротивления от величины контактного усилия (рис. 8.13) показывает, что увеличение контактного усилия целесообразно только до определенной величины $F_{k min}$, при котором контактное сопротивление близко к минимально возможному, определяемому свойствами материала контактов.

Наряду с рассмотренными факторами величина контактного сопротивления зависит от условий эксплуатации (среды), наличия примесей в материале контактов и его способности к окислению. Наличие сопротивления контактов приводит к определенным потерям мощности ($P_k = I^2 R_k$), выделяющейся в виде тепла. Поэтому допустимая величина тока, проходящего через контакт, определяется его теплопроводящей способностью, которая, в свою очередь, зависит от конструкции и формы контактов. Чем больше ток, тем большие разме-

ры должны иметь контакты. Проверка контактов в замкнутом состоянии заключается в выборе по заданному току материала, вида и размера контактов.

Процесс размыкания контактов – наиболее тяжелый их режим работы. По мере снижения сжимающего усилия уменьшается эффективная площадь контакта, что ведет к росту контактного сопротивления и увеличению напряжения на контактном переходе и температуры. При определенном положении контактов материал в точках соприкосновения плавится, и между расходящимися контактами появляется жидкий мостик, который разрывается при дальнейшем движении контактов. После этого вследствие большой напряженности электрического поля происходит газовый разряд, который может закончиться образованием дуги, особенно сильно разрушающей контакты. Условия образования дуги зависят от многих факторов: металла контактов, состояния контактирующих поверхностей, состава окружающей среды. Возникновению электрической дуги способствует загрязнение окружающей среды и наличие индуктивностей в электрической цепи. Наличие дуги сопровождается значительным повышением температуры контактирующих тел и частичным их оплавлением, приводит к резкому усилению эрозии (электрическому износу) контактов, заключающейся в распылении материала контактов и переносе части его под действием электрического поля с одного контакта на другой.

В цепях переменного тока дуга гаснет при прохождении напряжения сети через нуль, поэтому одни и те же контакты могут работать в более мощных цепях переменного тока, чем в цепях постоянного тока. Разрушающее действие дуги на контакт будет тем сильнее, чем больше ток дуги и время ее существования. Для уменьшения влияния дуги применяют специальные дугогасительные устройства. При отсутствии дугообразования процесс размыкания контактов может сопровождаться их искрением. Искра может возникнуть, если напряжение на контактах окажется в процессе их перемещения выше напряжения зажигания, зависящего от произведения расстояния между контактами на давление воздуха. Минимальная величина напряжения зажигания 300 В.

Методы искро- и дугогашения основаны на шунтировании контактов емкостью и сопротивлением. При размыкании цепи ток, проходящий через контакт, уменьшается на величину зарядного тока конденсатора. Но в момент последующего замыкания контакты должны пропустить суммарный ток нагрузки и разряда конденсатора, который может быть очень большим. Поэтому последовательно с емкостью обязательно должно быть включено ограничивающее сопротивление, снижающее величину разрядного тока до допустимых пределов. Возрастание величины емкости по мере возрастания тока нагрузки ограничивает область применения этого метода.

При разомкнутых контактах основное требование – выбор нужного зазора между контактами пары, исключающего пробой током. С увеличением зазора пробивное напряжение увеличивается (на воздухе при зазоре 1 мм пробивное напряжение 20 кВ), но растет и время срабатывания контактного устройства. Поэтому выбирают компромиссное решение по величине зазора, удовлетворяющее как условиям электрической прочности, так и заданному быстродействию.

Процесс замыкания контактов происходит проще по сравнению с процессом размыкания. При сближении контактов воздушные промежутки пробиваются напряжением, но пробой не влияет на работу устройства, так как контакты продолжают сближаться до соприкосновения. При замыкании может наблюдаться дребезг контактов. Он обусловлен ударным взаимодействием контактов при замыкании. При дребезге меняется зазор между контактами, и могут наблюдаться все формы газового разряда. Дребезг усиливает электрический износ контактов и увеличивает время срабатывания устройства. Основным путем снижения дребезга – уменьшение массы контактнонесущей системы.

К контактам при периодическом замыкании и размыкании электрических цепей предъявляют следующие требования: малое контактное сопротивление; высокая стойкость против обгорания; большая износостойчивость и малая коррозия. В качестве материала для контактов используют медь, никель, серебро, вольфрам и их покрытия. Материалы покрытий контактов наряду с низким электрическим сопротивлением должны обеспечивать хорошее сцепление с основным материалом контакта, не создавать непроводящих пленок, быть износостойкими и достаточно мягкими для снижения контактного сопротивления. Следует учитывать, что разные материалы при одних и тех же условиях работы требуют разных контактных усилий.

Размеры контактов должны выбираться с учетом теплового режима работы. При длительной работе под током температура контактов не должна превышать 50–75 °С.

8.10. Магнитоуправляемые контакты

Особое положение среди электромагнитных механизмов занимают магнитоуправляемые контакты, к которым относят герконы и ферриды (рис. 8.14). Они возникли в результате совершенствования контактных электромагнитных устройств и стремления свести к минимуму их недостатки, основными из которых является плохая защищенность от воздействия внешней среды, относительно небольшой срок службы (до 10^7 срабатываний), невысокое быстродей-

ствие (десятки миллисекунд), потребление энергии в течение всего периода притяжения якоря и необходимость периодического обслуживания.

Геркон (рис. 8.14, а) представляет собой герметичную стеклянную оболочку, в которую заключены пластины, выполненные из материала с высокой магнитной проницаемостью. Они служат одновременно токопроводом, контактами и магнитопроводом и находятся на некотором расстоянии друг от друга (контакт разомкнут). На пластинах укреплены контакты. Стеклянная оболочка вакуумирована или заполнена инертным газом – смесью азота с гелием или – водородом. Вакуумирование позволяет применять для контактов износостойкие материалы – вольфрам, молибден, окисляющиеся в обычных условиях; применять малые контактные силы, так как окисные газовые пленки на контактах отсутствуют; использовать малые бесконтактные зазоры, так как электрическая прочность вакуума выше, чем у воздуха. К наружным концам пластин припаиваются провода нагрузочной цепи. У герконов сверху на ампулу наматывают управляющую обмотку. При подаче тока в обмотку магнитный поток, создаваемый этой обмоткой и направленный вдоль оси обмотки, проходит через пластины, создавая в зазоре между ними тяговое усилие, притягивающее пластины друг к другу и замыкающее контакт. После отключения обмотки пластины возвращаются в первоначальное положение под действием сил упругости, и контакт размыкается. Удерживать контакт в замкнутом состоянии можно только за счет потребления энергии из сети, что является одним из недостатков герконов. От указанных недостатков свободны ферриды.

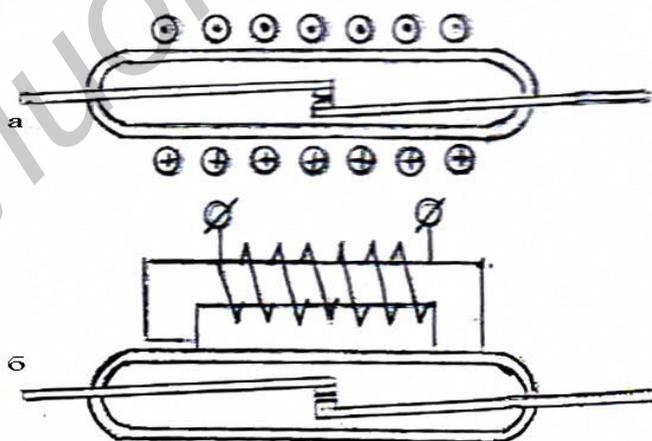


Рис. 8.14

Ферриды представляют собой (рис. 8.14, б) комбинацию магнитоуправляемого контакта с магнитопроводом из материала, обладающего большим остаточным потоком (остаточной индукцией). Управление ферридом осуществляет-

ся подачей в обмотку кратковременного импульса, обеспечивающего намагничивание магнитопровода. Замкнувшийся в этом случае контакт и после окончания импульса остается в замкнутом состоянии, удерживаемый силой притяжения, создаваемой остаточным потоком магнитопровода. Для размыкания контакта феррида в обмотку необходимо подать импульс тока противоположного знака, размагничивающий магнитопровод. Напряженность поля, создаваемого этим импульсом, не должна превышать значения коэрцитивной силы, так как в противном случае возможно новое срабатывание от магнитного потока противоположного знака.

Библиотека БГУИР

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольтберг, О. Г. Электромеханика / О. Д. Гольтберг, С. П. Хелемска. – М. : Академия, 2007 – 352 с.
2. Беспалов, В. Я. Электрические машины / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. – М. : Академия, 2006. – 320 с.
3. Брускин Д. Э. Электрические машины и микромашины / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – М : Высш. шк., 1990. – 528 с.
4. Шамрай, Б. В. Электромагнитные механизмы : учеб. пособие / Б. В. Шамрай. – Л. : СЗПН, 1987. – 71 с.
5. Данилов, И. А. Общая электротехника с основами электроники / И. А. Данилов, П. М. Иванов. – М. : Высш. шк., 2000. – 751 с.
6. Волковицкий, В. Д. Системы контроля и управления доступом/ В. Д. Волковицкий. – СПб. : Экополис и культура, 2003. –126 с.

Библиотека БГУМР

Учебное издание

Сури Виталий Михайлович
Боровиков Сергей Максимович
Вышинский Николай Владимирович

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
УСТРОЙСТВА СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ**
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *И. В. Ничипор*

Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоля*

Подписано в печать 24.01.2014. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 8,14. Уч.-изд. л. 7,0. Тираж 100 экз. Заказ 198.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП № 02330/0494175 от 03.04.2009.
2200013, Минск, П. Бровки, 6