

**Э.Г. ЧЕБОТКОВ  
П.В. ТУЛУПОВ**

**КОНСТРУКЦИИ И ПОТРЕБИТЕЛЬСКИЕ  
СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

**Учебное пособие**

**Самара  
Самарский государственный технический университет  
2009**



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

Кафедра «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

Э.Г. ЧЕБОТКОВ  
П.В. ТУЛУПОВ

КОНСТРУКЦИИ И ПОТРЕБИТЕЛЬСКИЕ  
СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

*Утверждено редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

Самара  
Самарский государственный технический университет  
2009

УДК 621. 313

Ч 34

Рецензент д-р техн. наук В. Е. Высоцкий

**Чеботков Э.Г.**

**Ч 34 Конструкции и потребительские свойства электромеханических преобразователей переменного тока:** учеб. пособ. / Э.Г. Чеботков, П.В. Тулупов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2009. – 146 с.: ил.

Содержатся общие сведения, теоретические основы электромеханических преобразователей переменного тока. Дано описание принципа их действия, принципиальные схемы, характеристики и основные соотношения.

Предназначено для теоретических занятий и самостоятельной работы студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Дисциплина «Специальные электрические машины».

УДК 621. 313

Ч 34

© Э.Г. Чеботков, П.В. Тулупов, 2009  
© Самарский государственный  
технический университет, 2009

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Специалисты, занимающиеся проектированием, эксплуатацией и обслуживанием электромеханического оборудования, должны хорошо понимать принцип работы и специфические особенности того или иного электромеханического преобразователя. Эти знания необходимы современному специалисту для того, чтобы самостоятельно принимать грамотные решения.

Электромеханические преобразователи предназначены для производства, преобразования и накопления электроэнергии и являются в общем случае электрическими машинами. Научные исследования и развитие электромеханики привели к созданию разнообразных видов электрических машин – источников и преобразователей энергии, которые конструктивно и по своим характеристикам отличаются от обычных электромеханических преобразователей, изучаемых в курсе «Электрические машины».

Широкое и разнообразное применение специальных электромеханических преобразователей в энергетике, автоматизации производственных процессов и во всех отраслях промышленности определяет необходимость освоения инженерно-техническим составом, работающим в этой области, теорией преобразователей, вопросами их разработки и применения.

Учебные планы технических университетов для студентов, обучающихся по специальности 140601, содержат дисциплину «Конструкции, расчет, проектирование, потребительские свойства электромагнитных устройств и электромеханических преобразователей». Учебный план и рабочие программы дисциплины предусматривают, кроме теоретического курса, практические занятия и достаточно большой объем самостоятельной работы.

Изучение специальных электромеханических преобразователей опирается на знания, полученные при изучении таких предшествующих дисциплин, как математика, физика, теоретическая и прикладная механика, теоретические основы электротехники, основы электроники и др.

Данное пособие предназначено для освоения отдельного раздела специальных электромеханических преобразователей – изучения конструкций и потребительских свойств, в частности принципа действия специальных машин переменного тока, их узлов и деталей и особенностей характеристик систем, в которых они применяются. Целью изучения данного раздела является практическое применение полученных знаний при эксплуатации, расчетах и конструировании указанных электрических машин.

## **Глава 1. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ОДНОФАЗНЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Для маломощных нерегулируемых электроприводов в качестве вспомогательных используют *микродвигатели с расщепленными экранированными полюсами и асинхронные микродвигатели с пусковыми элементами*, работающие от однофазной сети переменного тока и поэтому называемые однофазными.

Для создания пускового вращающего момента в однофазных двигателях малой мощности (5-25 Вт) с расщепленными экранированными полюсами применяют конструкцию с явновыраженными полюсами (см. рис. 1.1, *а*), на которых располагается однофазная обмотка. Полюса 1 имеют расщепленную конструкцию, причем на одну из расщепленных частей каждого полюса надет короткозамкнутый виток (экран) в виде медного кольца 2. Ротор двигателя имеет обычную короткозамкнутую конструкцию. При подключении обмотки статора к сети под действием создаваемого ею пульсирующего магнитного потока в короткозамкнутом витке возникает ток, который препятствует нарастанию потока в этой части полюса (см. рис. 1.1, *б*).

В результате потоки в обеих частях каждого полюса оказываются сдвинутыми по фазе относительно друг друга, что, в свою очередь, приводит к образованию в двигателе вращающегося магнитного поля. Для улучшения пусковых и рабочих характеристик двигателя часто

между полюсами помещают магнитные шунты в виде стальных пластинок.

Однофазные двигатели с явновыраженными полюсами обычно применяют в устройствах, не требующих больших пусковых моментов. Например, они применяются в небольших вентиляторах, электропроигрывателях и т. д.

Микродвигатели с расщепленными экранированными полюсами (рис. 1.2, а) в асинхронном и синхронном исполнении являются наиболее простыми однофазными двигателями переменного тока.

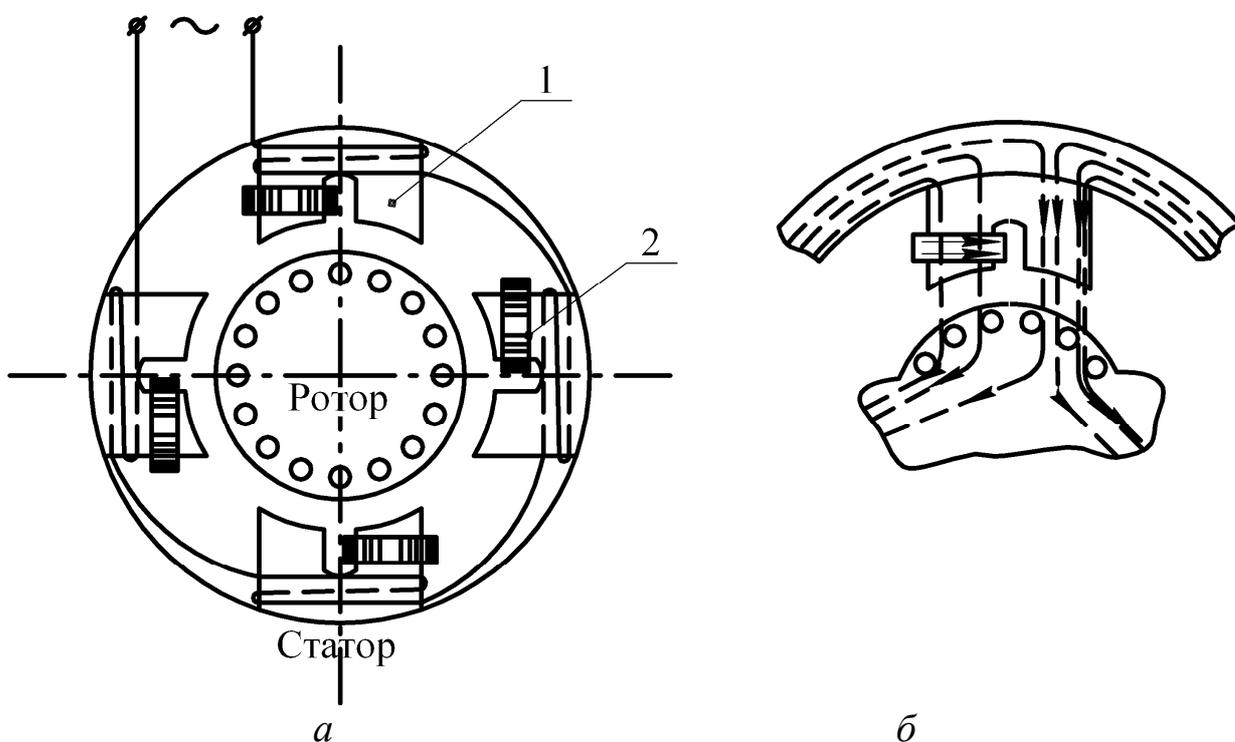
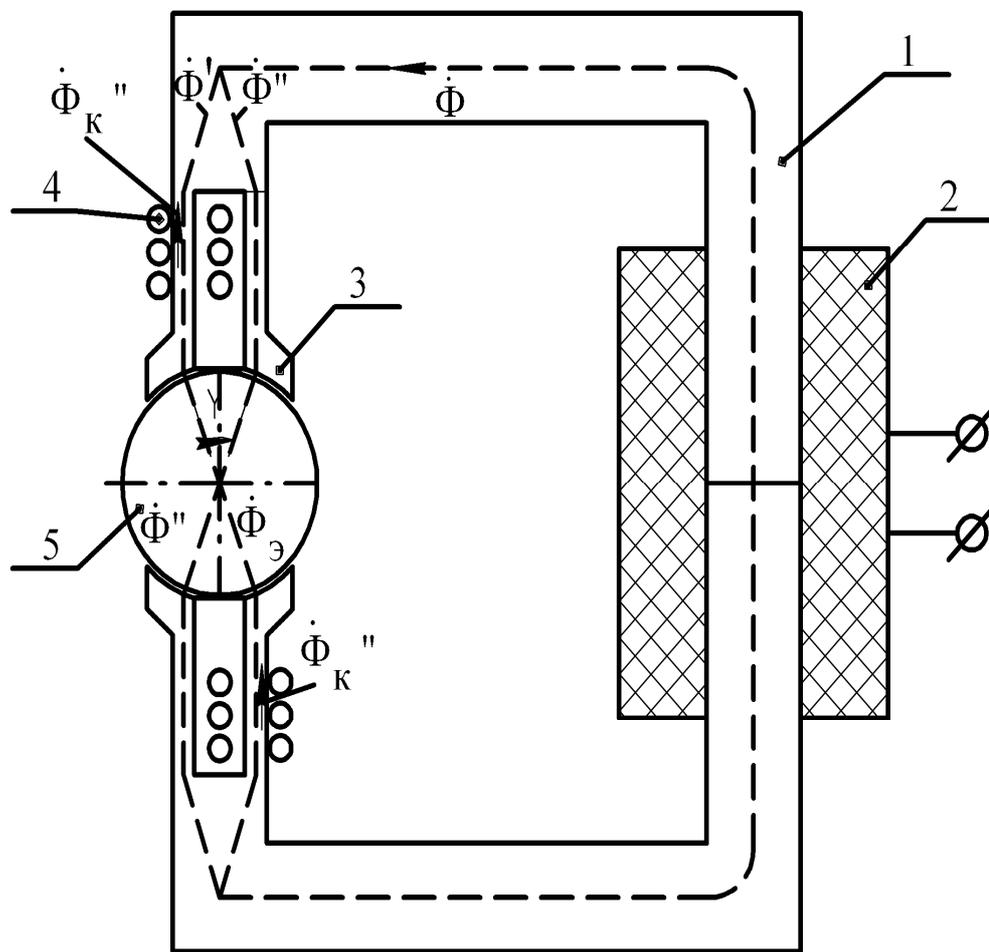


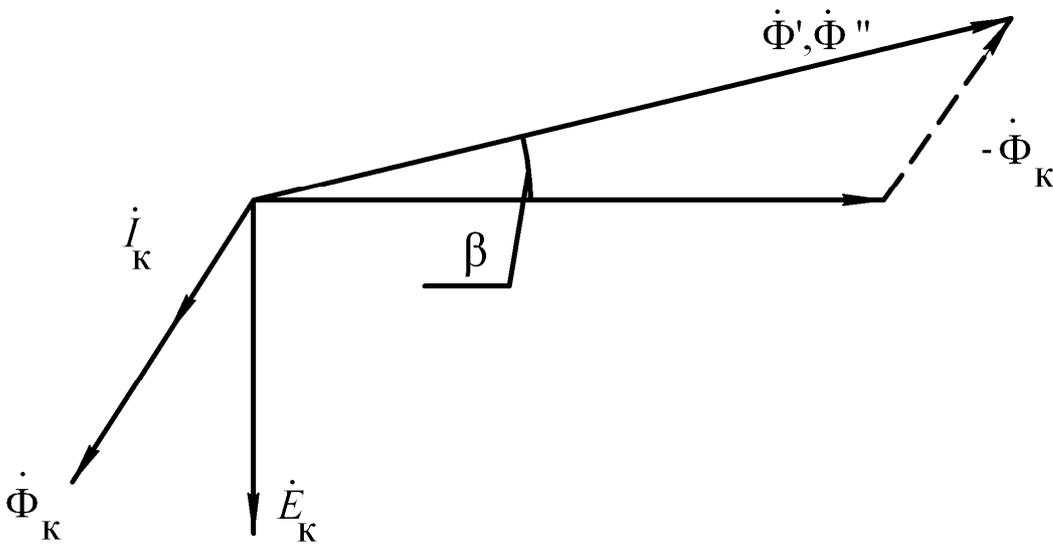
Рис. 1.1. Однофазный асинхронный двигатель с экранированными полюсами

Статор 1 такого двигателя явнополюсный и состоит из двух пакетов электротехнической стали. На статоре имеется однофазная обмотка возбуждения 2. На каждом из полюсов 3 находится продольный паз, в котором размещается одна из сторон короткозамкнутых витков 4, охватывающих и экранирующих часть (от  $1/5$  до  $1/2$  полюсной дуги) полюса. В расточке полюсов помещается ротор 5 двигателя. Конструкция ротора зависит от типа микродвигателя. В двигателях асинхронного исполнения ротор типа «беличьей клетки» полый

немагнитный или ферромагнитный. При синхронном варианте ротор может быть с постоянным магнитом (активный), из магнитотвердого материала (гистерезисный) или с переменным вдоль окружности магнитным сопротивлением (реактивный).



a



b

Рис. 1.2. Схема конструкции (а) и векторная диаграмма (б) однофазного микродвигателя с расщепленными экранированными полюсами

При подаче однофазного переменного напряжения на зажимы обмотки возбуждения в магнитопроводе статора создается пульсирующий магнитный поток  $\Phi$ . Проходя по полюсам статора, этот поток расщепляется продольным пазом на два потока –  $\Phi'$  и  $\Phi''$ , – сдвинутых в пространстве на угол  $\gamma$ . Поток  $\Phi'$ , замыкаясь по экранированной части полюсов, наводит в короткозамкнутых витках трансформаторную ЭДС. При этом по виткам течет ток, отстающий от ЭДС вследствие индуктивного характера сопротивления витков. Под действием ЭДС витков создается поток  $\Phi_K$ , замыкающийся по экранированной части полюсов.

В сумме с потоком  $\Phi'$  поток  $\Phi_K$  образует результирующий магнитный поток  $\Phi_{\Sigma}$  экранированной части полюсов, сдвинутый во времени относительно потока  $\Phi''$  неэкранированной части полюсов:

$$\dot{\Phi}_{\Sigma} = \dot{\Phi}' + \dot{\Phi}_K.$$

Векторная диаграмма микродвигателя изображена на рис. 1.2, б.

Магнитные потоки  $\Phi''$  и  $\Phi_{\Sigma}$ , сдвинутые относительно друг друга в пространстве и во времени, создают результирующее вращающееся магнитное поле. Так как углы сдвига магнитных потоков  $\Phi''$  и  $\Phi_{\Sigma}$  во времени и пространстве обычно меньше  $90^\circ$ , а величины потоков не равны, магнитное поле будет не круговым, а эллиптическим. Вращающееся магнитное поле взаимодействует с ротором двигателя и создает вращающий момент, природа которого зависит от типа ротора.

Существенное преимущество однофазных микродвигателей с расщепленными полюсами, кроме простоты конструкции и небольшой стоимости, состоит в их надежной работе при частых пусках и остановках под напряжением. Величина полных потерь в двигателе практически не меняется при его работе в диапазоне от режима холостого хода до режима короткого замыкания (остановки ротора при напряжении на зажимах обмотки возбуждения). Поэтому недопустимого перегрева обмотки возбуждения не происходит. Это объяс-

няется тем, что основными потерями в двигателе являются электрические потери в короткозамкнутых витках.

Один из основных недостатков описываемых микродвигателей состоит в том, что вследствие существенной эллиптичности магнитного поля они развивают незначительный пусковой момент. Это можно пояснить на примере асинхронного микродвигателя.

Величина пускового момента в относительных единицах у асинхронных микродвигателей равна эффективному коэффициенту сигнала. Если принять за единицу пусковой момент  $M_{п0}$ , развиваемый круговым полем с амплитудой потока  $\Phi''$ , то пусковой момент  $M_{п}$  реального двигателя с экранированными полюсами

$$M_{п} = M_{п0} \sin\beta \sin\gamma \alpha_{м}.$$

В этом двигателе имеет место самый общий случай несимметрии магнитных потоков  $\Phi_{\varepsilon}$  и  $\Phi''$ , образующих вращающееся поле

$$\alpha_{м} = \frac{\Phi_{\varepsilon}}{\Phi''} < 1; \sin\beta < 1; \sin\gamma < 1.$$

Откуда получаем, что  $M_{п} \ll M_{п0}$ . В экранированных микродвигателях асинхронного типа пусковой момент составляет обычно 20-60% от номинального.

Аналогично можно показать, что вследствие эллиптичности магнитного поля двигатели развивают небольшую механическую мощность при относительно высоком уровне потерь. КПД у рассматриваемых асинхронных микродвигателей различной мощности не превышает 0,1-0,4. Коэффициент мощности этих двигателей  $\cos\varphi = 0,4 - 0,6$ .

Некоторое улучшение энергетических и пусковых характеристик можно достигнуть путем выполнения двигателя с равномерным воздушным зазором. Примером может служить микродвигатель с составным статором, изображенный на рис. 1.3. Статор состоит из цилиндра 1 и крестовины 2. Крестовина образует полюсы двигателя и магнитные шунты 3 между ними. Магнитные шунты имеют малое сечение, поэтому основная часть потока полюсов проходит через зазор в ротор. При такой конструкции магнитопровода форма распределе-

ния индукции в зазоре приближается к синусоидальной, уменьшаются потери и паразитные моменты от высших гармоник поля.

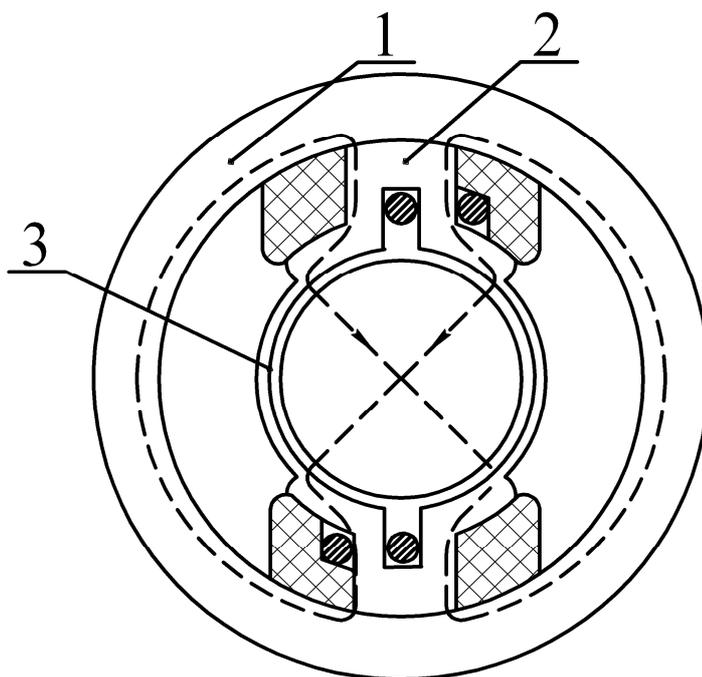


Рис. 1.3. Конструктивная схема микродвигателя с составным статором

Рассмотренные микродвигатели относятся к неререверсивным. Однофазный микродвигатель с расщепленными экранированными полюсами, позволяющий осуществлять реверсирование, а также регулирование в определенном диапазоне вращающего момента изображен на рис. 1.4.

Микродвигатель, схема которого показана на рис. 1.4, отличается от микродвигателя на рис. 1.3, а только тем, что короткозамкнутые витки заменены катушками с выведенными концами. Четыре катушки  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  располагаются на обеих частях полюсов, охватывая каждую половину полюса.

Замыкая то одну ( $A$ ,  $D$ ), то другую ( $B$ ,  $C$ ) пару катушек, можно экранировать то одну, то другую часть полюсов, изменяя, таким образом, на противоположное направление вращения магнитного поля и ротора. Если соединить эти катушки через потенциометр  $R$ , то при нейтральном положении движка потенциометра экранирующее

действие всех катушек будет одинаковым, а результирующее магнитное поле пульсирующим.

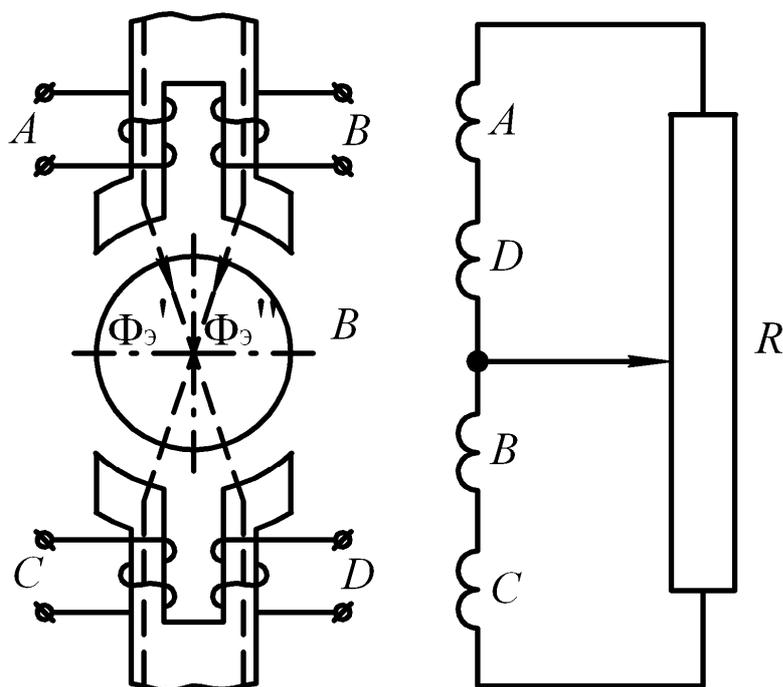


Рис. 1.4. Схема реверсивных микродвигателей с расщепленными экранированными полюсами

При смещении движка потенциометра от нейтрального положения меняются потоки  $\Phi_K$  экранирующих катушек обоих полюсов, а значит, и фазовый сдвиг ( $\sin \beta$ ) и соотношение амплитуд ( $\alpha_M$ ) потоков  $\Phi_3$  и  $\Phi''$ . При этом изменяется эллиптичность вращающегося магнитного поля и величина вращающего момента.

Теоретически однофазный микродвигатель с расщепленными экранированными полюсами можно рассматривать как двухфазный двигатель, у которого угол сдвига между фазовыми обмотками не равен  $90^\circ$  и зажимы одной из обмоток замкнуты накоротко.

## Глава 2. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

### 2.1. ИНДУКЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР И ФАЗОРЕГУЛЯТОР

Индукционный регулятор представляет собой заторможенный асинхронный двигатель с контактными кольцами. Он может регулировать напряжение в широких пределах. Статорная и роторная обмотки в индукционном регуляторе соединены электрически (рис. 2.1), но так, чтобы они могли быть смещены относительно друг друга поворотом ротора. При подключении индукционного регулятора к сети вращающееся магнитное поле наводит в обмотках статора и ротора ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ . При совпадении осей обмоток фазы ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  совпадают и на выходных зажимах регулятора устанавливается максимальное напряжение  $U_{2\text{МАКС}}$  (см. рис. 2.2, а). При повороте ротора ось обмотки поворачивается на некоторый угол. На такой же угол смещается и вектор  $E_2$ . При этом напряжение на выходе регулятора, равное геометрической сумме ЭДС ( $U_2 = E_1 + E_2$ ), уменьшается. Поворотом ротора на угол 180 эл. градусов мы устанавливаем на выходе регулятора минимальное напряжение  $U_{2\text{МИН}}$ .

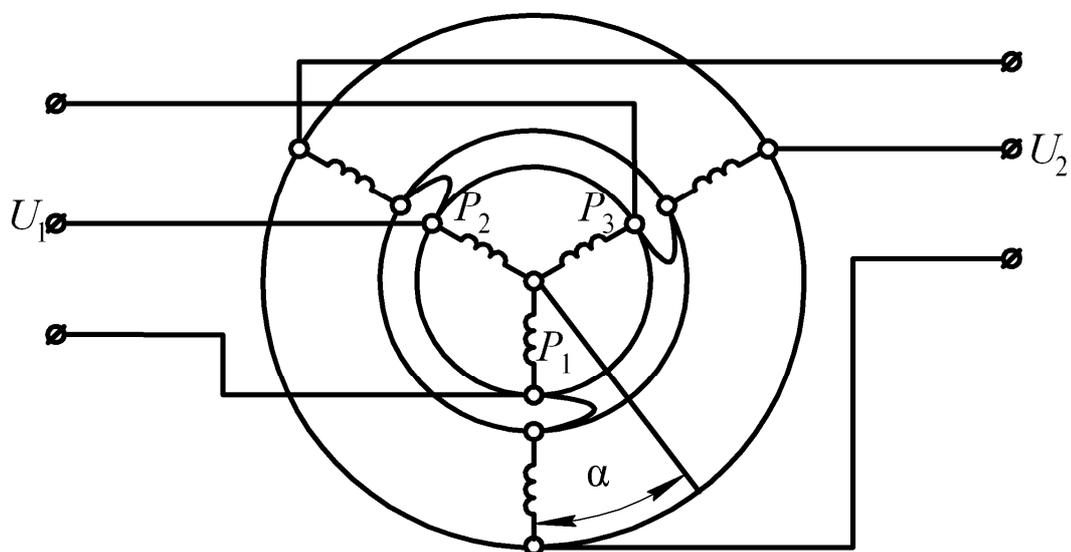


Рис. 2.1. Схема соединений индукционного регулятора

На рис. 2.2, б представлен график напряжения на выходе индукционного регулятора в зависимости от угла поворота ротора  $U_2 = f(\alpha)$ .

Индукционные регуляторы применяются для регулирования напряжения в лабораторной практике, в автоматике, а также в распределительных сетях.

Для поворота ротора в индукционном регуляторе обычно применяется червячная передача, которая одновременно осуществляет и торможение ротора.

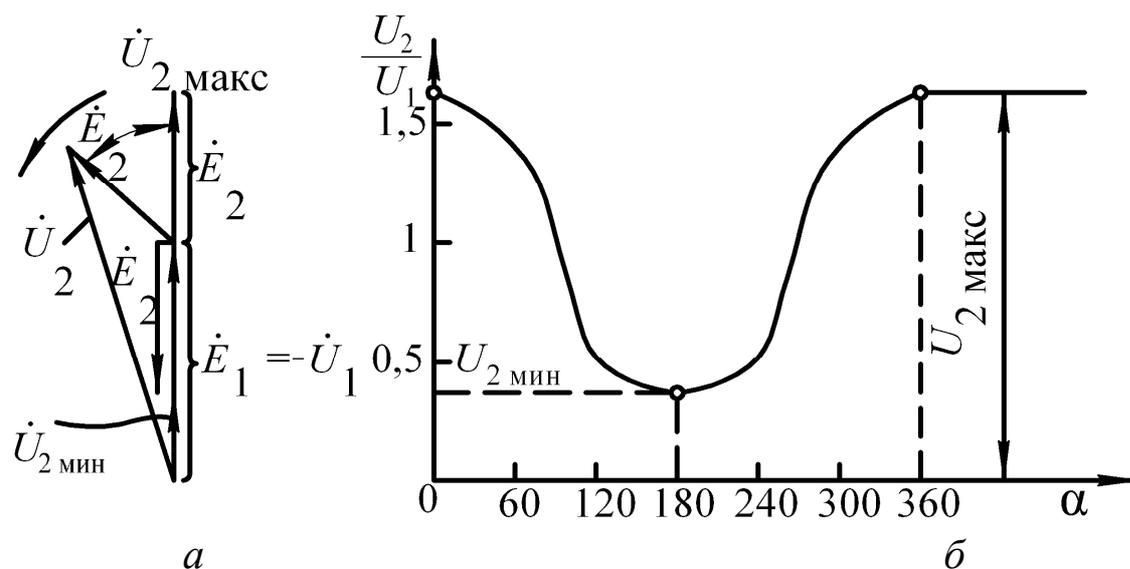


Рис. 2.2. Векторная диаграмма индукционного регулятора (а) и график (б) зависимости  $U_2 = f(\alpha)$

На рис. 2.3 представлен внешний вид индукционного регулятора типа АИ61-100 мощностью 15 кВА. Регулятор имеет принудительное охлаждение, что повышает его мощность. Поворот ротора может осуществляться либо вручную маховиком, либо посредством электродвигателя, позволяющего осуществить дистанционное управление регулятором.

Фазорегулятор представляет собой асинхронную трехфазную машину с контактными кольцами, заторможенную специальным поворотным устройством (обычно червячной передачей). Он предназначен для изменения фазы вторичного напряжения относительно первичного. При этом величина вторичного напряжения остается неизменной. Напряжение подводится к обмотке статора и снимается с выводов обмотки ротора.

В отличие от индукционного регулятора в фазорегуляторе обмотки статора и ротора электрически не соединены (см. рис. 2.4). Из-

менение фазы вторичного напряжения осуществляется поворотом ротора относительно статора.

Фазорегуляторы применяются в автоматике и в измерительной технике. Отечественной промышленностью изготавливаются фазорегуляторы серии ФРО (фазорегулятор обдуваемый) мощностью 7,5 и 15 кВА. Плавный поворот ротора в фазорегуляторах ФРО осуществляется посредством электродвигателя, допускающего дистанционное управление фазорегулятором.

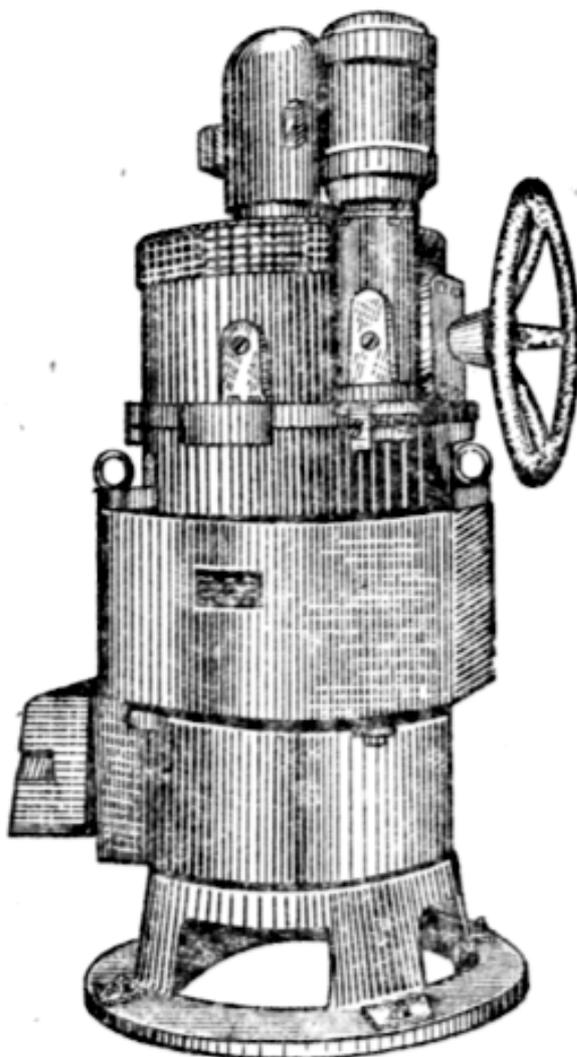


Рис. 2.3. Внешний вид индукционного регулятора типа АИ61-100 мощностью 15 кВА

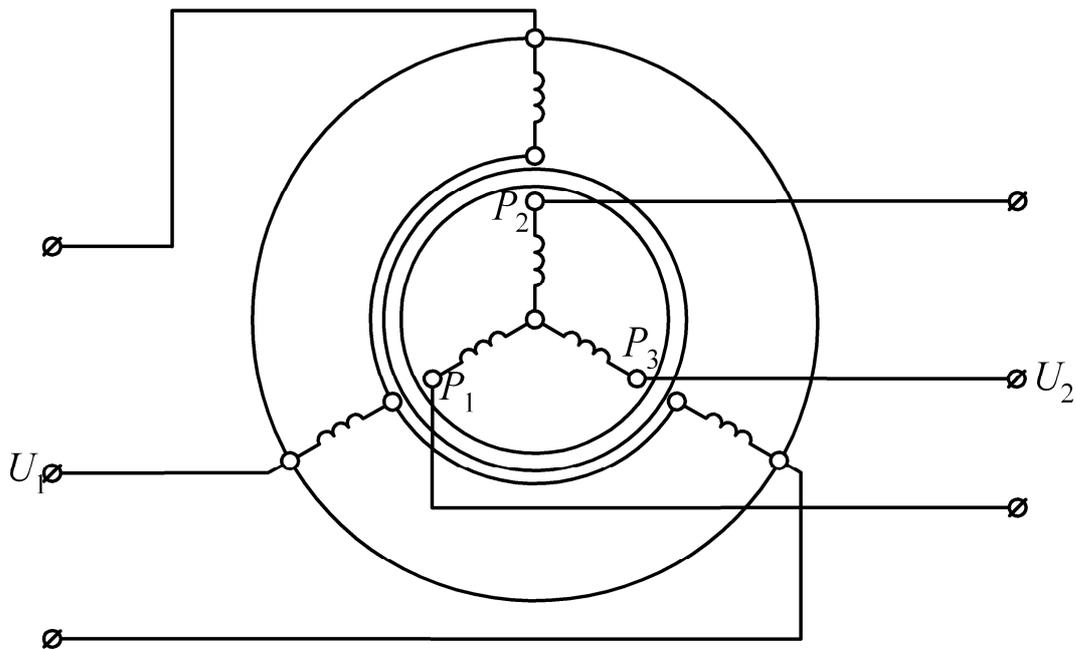


Рис. 2.4. Схема соединений фазорегулятора

## 2.2. АСИНХРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ

Как известно, частота тока в цепи ротора асинхронной машины зависит от скольжения, т. е. определяется разностью частот вращения поля статора и ротора:

$$f_2 = s \cdot f_1 = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot f_1.$$

Указанное свойство позволяет использовать асинхронную машину в качестве преобразователя частоты (АПЧ). В этом случае обмотка статора подключается к сети промышленной частоты, а ротор посредством постороннего двигателя (ПД) приводится во вращение против поля статора, т. е. в направлении, противоположном его вращению при работе машины в режиме двигателя. При этом скольжение возрастет от единицы и выше, а частота тока ротора увеличится по сравнению с частотой тока питающей сети.

Если требуется уменьшить частоту питающей сети, то ротор преобразователя вращают в направлении вращения поля статора. ЭДС  $E_2$ , наведенная в обмотке ротора, через контактные кольца и щетки

подается к потребителю. На рис. 2.5 представлена схема включения асинхронного преобразователя частоты.

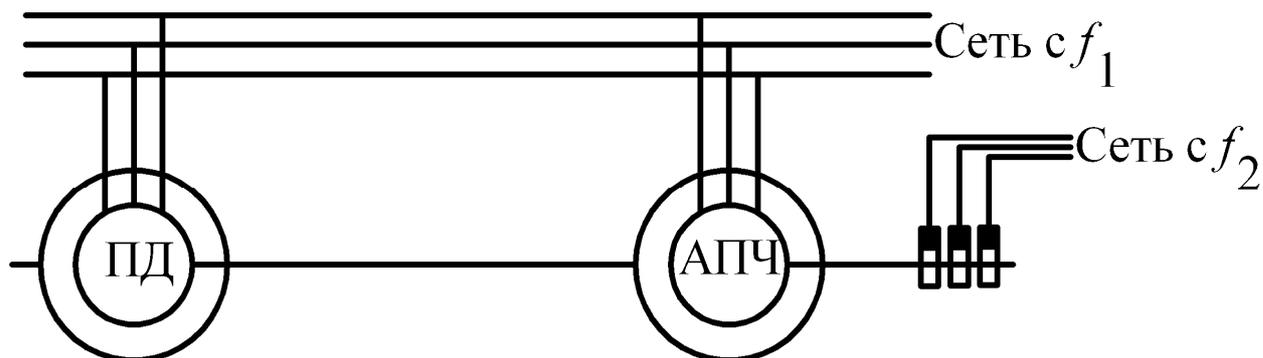


Рис. 2.5. Схема соединений асинхронного преобразователя частоты

Электрическая мощность  $P'_2$  цепи ротора складывается из электромагнитной мощности  $P_{ЭМ}$ , передаваемой вращающим полем статора на ротор, и механической мощности  $P_{МЕХ}$  первичного двигателя ПД  $P'_2 = P_{ЭМ} + P_{МЕХ}$ .

Соотношение между мощностями  $P_{ЭМ}$  и  $P_{МЕХ}$  зависит от скольжения. Так, при работе АПЧ со скольжением  $s = 2$  эти мощности равны, и ротор половину мощности получает от статора, а половину – от первичного двигателя.

При необходимости плавной регулировки частоты на выходе асинхронного преобразователя частоты в качестве первичного двигателя применяют электродвигатели с плавной регулировкой скорости, например двигатели постоянного тока. Однако чаще всего АПЧ используется для получения определенной (фиксированной) частоты  $f_2$ . В этом случае в качестве первичного применяют асинхронный или синхронный двигатель.

В главе 13 рассмотрен асинхронно-синхронный двухчастотный генератор.

### 2.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ АСИНХРОННАЯ МУФТА

Электромагнитная асинхронная муфта устроена по принципу асинхронного электродвигателя и служит для передачи вращающего момента от одного вала (ведущего) к другому валу (ведомому).

На ведущем валу 1 помещается полюсная система 2 муфты, представляющая собой систему явно выраженных полюсов с катушками возбуждения. Ведомая часть муфты 3 выполняется по типу роторной клетки асинхронного двигателя. Постоянный ток в катушки возбуждения подается через контактные кольца 4 (см. рис. 2.6).

Принцип работы муфты аналогичен работе асинхронного двигателя, только вращающийся магнитный поток здесь создается механическим вращением полюсной части. Вращающий момент от ведущего вала к ведомому валу передается через магнитный поток. Разъединение муфты производится отключением тока возбуждения. Регулирование величины тока дает возможность осуществить дистанционное управление муфтой (плавно сцеплять и расцеплять ведущий и ведомый валы). Кроме того, муфта, подобно асинхронному двигателю, при достижении максимального момента переходит в режим неустойчивой работы, что предохраняет первичный двигатель от чрезмерных перегрузок и толчков нагрузки.

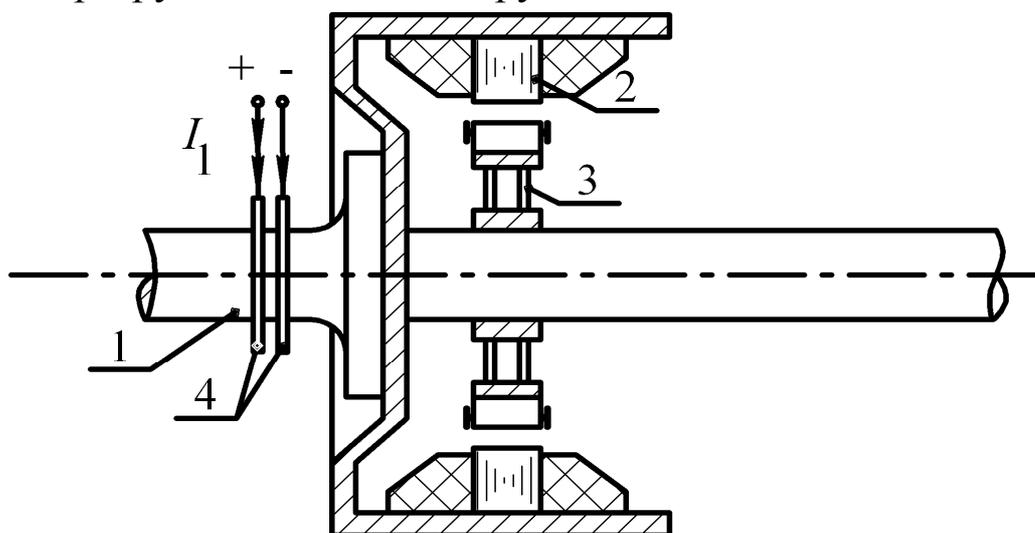


Рис. 2.6. Устройство асинхронной электромагнитной муфты

## 2.4. АСИНХРОННЫЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Асинхронные исполнительные двигатели применяются в устройствах автоматики и предназначены для преобразования электрических сигналов в механическое перемещение.

На статоре этого двигателя имеются две обмотки: обмотка возбуждения, постоянно включенная в сеть переменного тока, и обмотка управления, на зажимы которой подводится сигнал  $U_c$  (рис. 2.7).

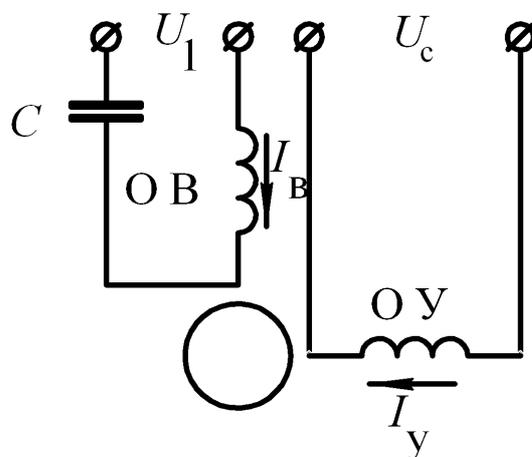


Рис. 2.7. Схема включения асинхронного исполнительного двигателя

Оси этих обмоток сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол  $90^\circ$ . В цепь обмотки возбуждения включается емкость, которая вызывает фазовый сдвиг между токами  $I_B$  и  $I_y$ . Все это обеспечивает создание в двигателе вращающегося магнитного поля. Если же на обмотку управления сигнал не подан, то в двигателе действует пульсирующее поле, которое не создает пускового момента.

Если же на обмотку управления сигнал был подан и двигатель начал вращаться, то после прекращения сигнала  $U_c$  двигатель может продолжать работать. Это явление, называемое *самоходом*, недопустимо в исполнительном двигателе, так как делает его неуправляемым. Для устранения самохода ротор исполнительного двигателя делают с повышенным активным сопротивлением.

Процесс устранения самохода поясним с помощью представленных на рис. 2.8 механических характеристик однофазного двигателя.

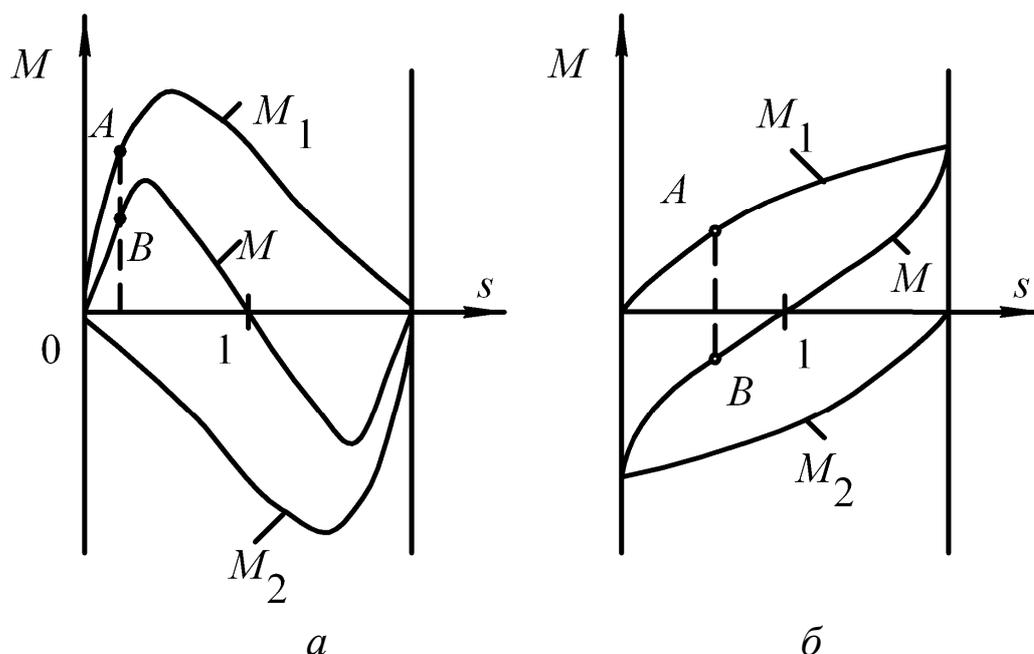


Рис. 2.8. Устранение самохода в асинхронном исполнительном двигателе

При наличии сигнала  $U_c$  двигатель работает с вращающимся магнитным полем и его механическая характеристика имеет вид кривой  $M_1 = f(s)$  на рис. 2.8, а. Допустим, что двигатель работает в режиме, соответствующем точке  $A$ . После прекращения сигнала  $U_c$  поле статора становится пульсирующим и механическая характеристика двигателя приобретает вид кривой  $M = f(s)$ .

Новый режим работы двигателя определится точкой  $B$ , при этом электромагнитный момент двигателя останется положительным и ротор двигателя продолжает вращаться.

Если увеличить активное сопротивление ротора, то графики  $M_1 = f(s)$  и  $M_2 = f(s)$  изменятся (максимум момента сместится в область больших скольжений). Так же изменит свою форму и график результирующего момента  $M = f(s)$  (рис. 2.8, б). Теперь после прекращения сигнала  $U_c$ , т. е. при переходе исполнительного двигателя в однофазный режим, электромагнитный момент становится отрицательным (точка  $B$ ) и оказывает на ротор двигателя тормозящее действие, устраняя самоход.

К исполнительному двигателю предъявляется также требование *малоинерционности* (быстродействия), т. е. чтобы с подачей сигнала на обмотку управления ротор двигателя как можно быстрее достигал

установленной частоты вращения. Для удовлетворения этого требования ротор исполнительного двигателя делается облегченным, не имеющим сердечника и обмотки. Такой двигатель называется *двигателем с полым немагнитным ротором* (см. рис. 2.9). Вместо обмотки на роторе располагается тонкостенный алюминиевый стакан с малым моментом инерции ротора. Это обеспечивает двигателю повышенное активное сопротивление ротора, а, следовательно, устранение самохода.

Двигатель имеет два статора: внешний, с обмоткой, и внутренний, без обмотки, входящий внутрь полого ротора. Внутренний статор необходим для уменьшения магнитного сопротивления основному потоку.

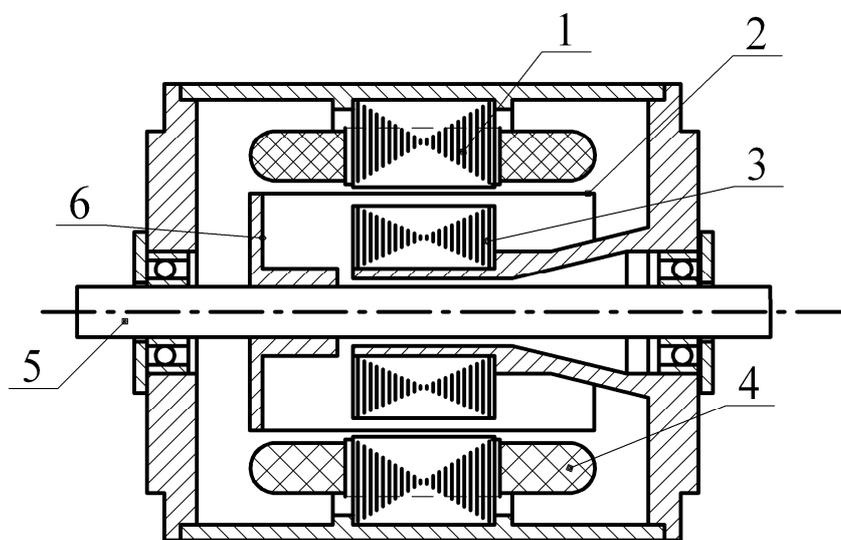


Рис. 2.9. Конструкция асинхронного двигателя с полым немагнитным ротором:

- 1 – внешний статор; 2 – стакан ротора; 3 – внутренний статор; 4 – обмотка статора;  
5 – вал; 6 – втулка для крепления стакана ротора

В сравнении с асинхронными двигателями обычной конструкции двигатели с полым немагнитным ротором имеют повышенные габариты и более низкий КПД. Объясняется это увеличенным воздушным зазором, который в этих двигателях складывается из зазора между внешним статором и стаканом ротора, толщины стенки немагнитного стакана и зазора между стаканом ротора и внутренним статором. Большой воздушный зазор ведет к увеличению намагничивающего тока и росту потерь.

### Глава 3. ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

### 3.1. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГИРОДВИГАТЕЛЕЙ

Главное требование, предъявляемое к гиродвигателю, – получение достаточно большого значения кинетического момента ротора. Для электрических гиродвигателей это требование наилучшим образом удовлетворяется применением обращенной конструкции машины при относительно высокой угловой частоте вращения ротора. В двигателях переменного тока это требование достигается применением повышенной частоты питания (400 Гц и более) и выбором малого числа пар полюсов.

Основной режим работы гиродвигателя – режим максимальной частоты вращения ротора, который для обычных электродвигателей является режимом холостого хода. Однако для гироскопических электродвигателей этот режим работы следует считать номинальным. Это объясняется двумя обстоятельствами, обусловленными обращенной конструкцией двигателя:

- вследствие больших габаритов и массы ротора тормозной момент сил трения о воздух и в подшипниках значительно больше, чем в обычном электродвигателе тех же габаритов;

- мощность двигателя вследствие меньшей площади, занимаемой обмоткой статора, и худших условий охлаждения значительно ниже.

Важным режимом работы для гироскопического двигателя является пусковой режим. Вследствие большого момента инерции ротора двигателя и относительно малого электромагнитного момента пуск гироскопического двигателя по времени может быть весьма продолжительным, иногда до 20-30 мин. При проектировании гироскопического электродвигателя стремятся максимально возможно сократить время пуска при обеспечении приемлемой тепловой нагрузки в процессе пуска.

Основными величинами, характеризующими работу гироскопического электродвигателя, являются:

- потребляемые мощности и ток в установившемся режиме;
- максимальная (номинальная) частота вращения ротора;

- кинетический момент – произведение момента инерции ротора на его максимальную угловую частоту вращения;
- стабильность кинетического момента при колебаниях напряжения и частоты сети в определенных пределах;
- стабильность углового положения вектора кинетического момента при длительной работе двигателя;
- максимальные значения потребляемой мощности и тока при пуске;
- время пуска;
- срок службы.

### **3.2. АСИНХРОННЫЙ ГИРОСКОПИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ С РОТОРОМ ТИПА «БЕЛИЧЬЯ КЛЕТКА»**

Этот тип двигателя является наиболее распространенным. Асинхронный гироскопический двигатель представляет собой асинхронную электрическую машину с короткозамкнутым ротором обращенной конструкции, приведенной на рис. 3.1. На статоре 1 уложена трехфазная обмотка 2, образующая вращающееся магнитное поле. В маховик 3 запрессован магнитопровод ротора 4 с «беличьей клеткой» 5. Маховик жестко насажен на вал 6, вращающийся в радиально-упорных подшипниках 7. Статор крепится на выступе крышки 8, которая прикреплена винтами 9 к защитному кожуху 10. В кожухе для вентиляции двигателя сделаны круглые отверстия 11.

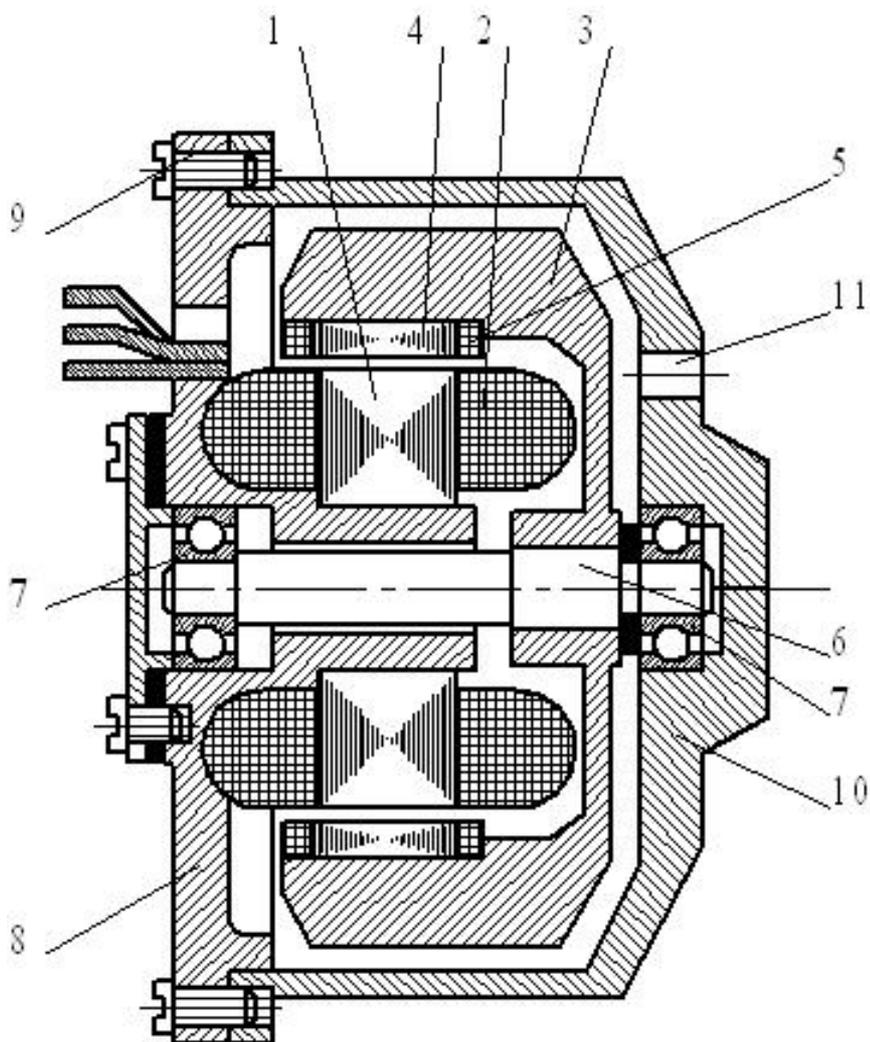


Рис. 3.1. Асинхронный несимметричный гироскопический двигатель

Рассмотренная конструкция двигателя вследствие асимметрии маховика (место крепления маховика к валу не совпадает с центром его тяжести) не обеспечивает стабильности вектора кинетического момента при изменении температуры и вибрациях, и такого типа гидродвигатель применяется в относительно «грубых» гироскопических приборах.

Для точных гироскопических систем используют гидродвигатель с симметричным ротором и двумя внутренними статорами (см. рис. 3.2). Его можно рассматривать как совокупность двух асимметричных гидродвигателей с совмещенным маховиком. Для уменьшения трения ротора в газовой среде гидродвигатель помещается в герметичную камеру и заполняется гелием или водородом.

Принцип работы двигателя и основные электромагнитные соотношения остаются такими же, как и для обычного асинхронного двигателя при симметричном режиме работы.

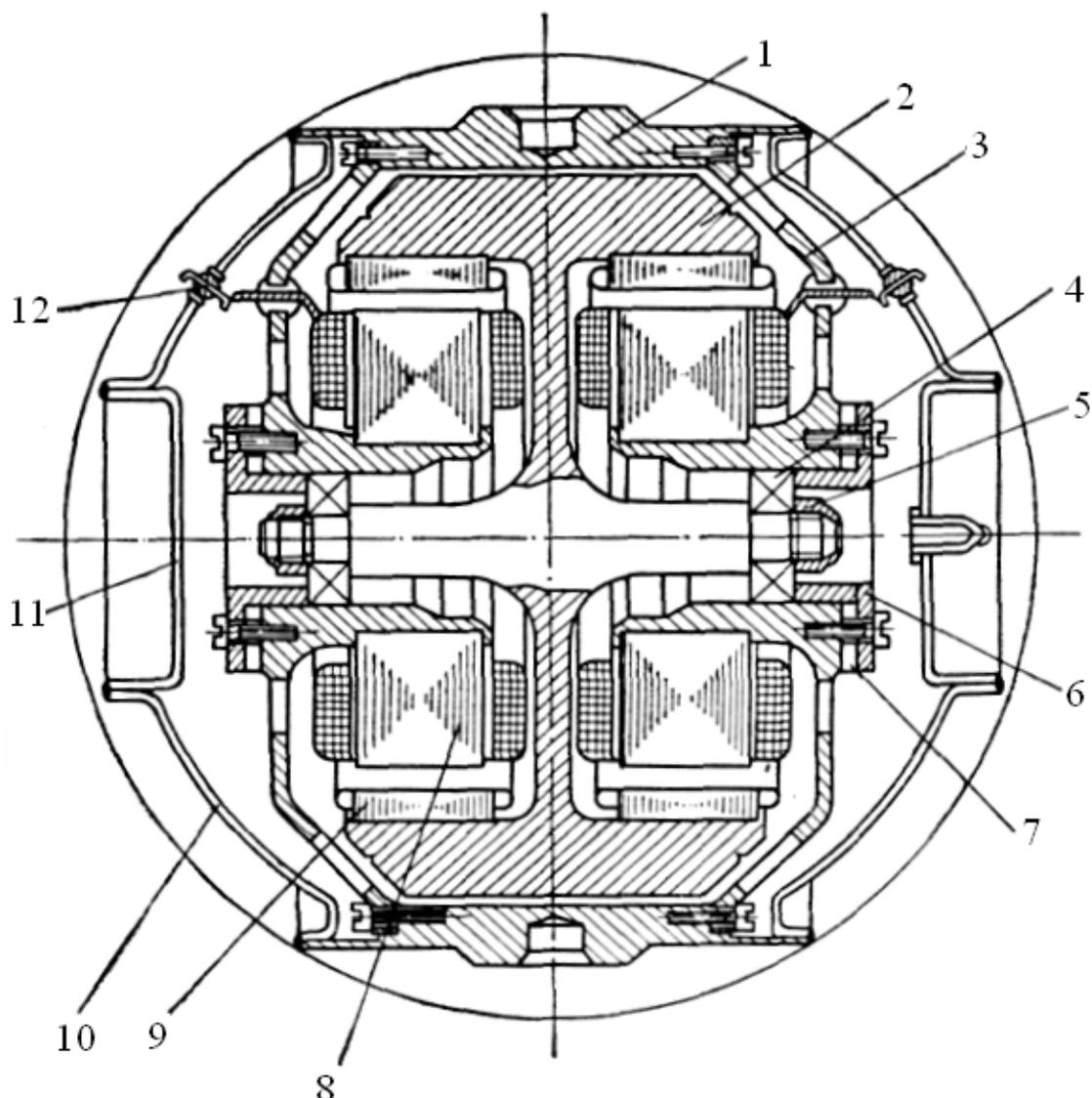


Рис. 3.2. Асинхронный симметричный гироскопический двигатель:  
 1 – корпус; 2 – маховик; 3 – крышка; 4 – шарикоподшипник; 5 – гайка; 6 – фланец;  
 7 – шайба; 8 – статор; 9 – магнитопровод ротора; 10 – основной кожух;  
 11 – дополнительный кожух; 12 – гермовывод

### 3.3. СИНХРОННЫЙ ГИРОСКОПИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ

В качестве синхронных гироскопических двигателей, как правило, используются гистерезисные двигатели, принцип действия которых подробнее рассматривается в главе 4. Это объясняется их хорошими пусковыми свойствами и легкостью входа в синхронизм.

Синхронные двигатели с постоянными магнитами и реактивные синхронные двигатели имеют «беличью клетку» и в пусковом режиме работают как асинхронные двигатели. При достижении скорости, соответствующей некоторому скольжению, зависящему от момента нагрузки, ротор втягивается в синхронизм за счет воздействия на него синхронного момента, однако ввиду большого момента инерции маховика гиродвигателя процесс втягивания в синхронизм чрезвычайно затруднен.

В гистерезисном двигателе момент, приложенный к ротору двигателя, не зависит от скорости и остается постоянным вплоть до достижения синхронной скорости. Его величина определяется НС статора  $F_m$ , магнитным потоком  $\Phi$  и гистерезисным углом. После входа в синхронизм двигатель превращается в недовозбужденный синхронный двигатель с постоянными магнитами. Для обеспечения работы гистерезисного гироскопического двигателя в синхронном режиме необходимо, чтобы момент сопротивления нагрузки был меньше гистерезисного момента.

По устройству гистерезисный гиродвигатель совершенно аналогичен асинхронному гиродвигателю. Отличие состоит в конструкции ротора. Вместо магнитопровода ротора 9 и «беличьей клетки» (см. рис. 3.2) запрессованы кольца из викаллой соответствующей толщины, выбранной из условия получения максимального момента. Синхронные гистерезисные гиродвигатели обычно проектируются для точных гиросистем и имеют симметричный маховик и два внутренних статора.

### **3.4. ГИРОСКОПИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ ТИПА «ШАР»**

Следует отметить, что гироскопический двигатель типа «шар» значительно отличается от гиродвигателей на подшипниках. Одна из основных особенностей этого двигателя состоит в том, что он представляет собой электрическую машину с тремя степенями свободы ротора. Ось вращения ротора и ось вращающегося магнитного поля статора не совпадают. Это приводит к сложным электромагнитным взаимодействиям системы «статор–ротор», в результате которых к ротору, кроме вращающего момента, направленного по оси враще-

ния, приложены так называемые корректирующие моменты, вызывающие прецессию от вращения ротора.

Принципиальная конструктивная схема шарового гиродвигателя приведена на рис. 3.2. Ферромагнитный шар 1, поддерживаемый аэродинамической опорой 3, приводится во вращение внешним магнитным полем, образуемым трехфазной обмоткой статора 2. Этот тип двигателя отличается от обычных двигателей тем, что его ротор жестко не закреплен в опорах и имеет три вращательных степени свободы.

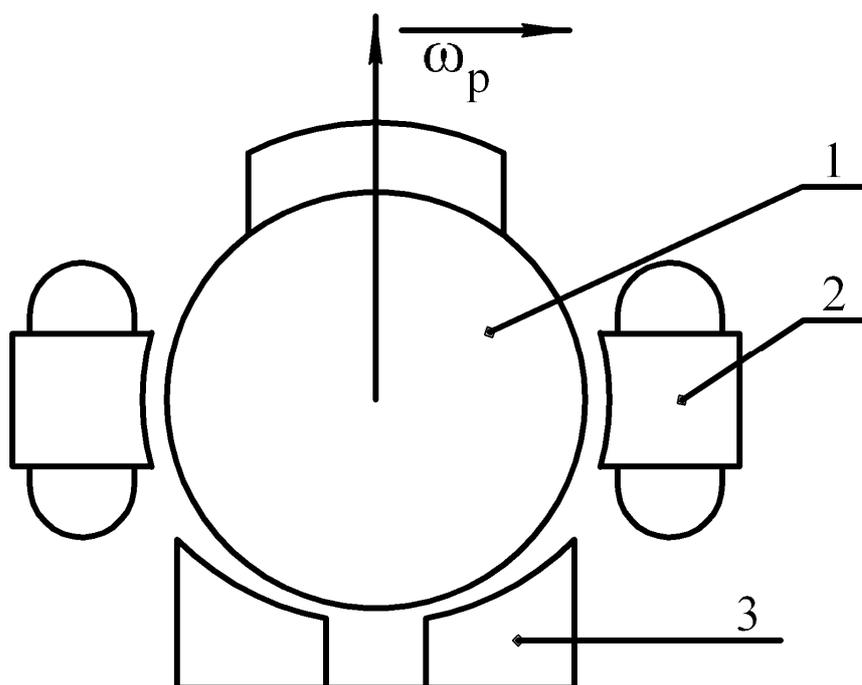


Рис. 3.3. Гироскопический двигатель типа «шар»:  
1 – стальной шар; 2 – статор с трехфазной обмоткой;  
3 – аэродинамическая опора

При совпадении осей вращения ротора и магнитного поля статора к шару приложен вращающий электромагнитный момент, значение которого равно в установившемся режиме моменту сил сопротивления в аэродинамических опорах. Обычно ширина пакета статора невелика, и расчет вращающего момента, создаваемого статором, можно провести по методике, разработанной для асинхронных двигателей со сплошным ферромагнитным цилиндрическим ротором. Гироскопические шаровые двигатели работают при больших номинальных скольжениях  $s \approx 0,2 - 0,5$ . При этом частота тока в роторе такова, что имеет место четкое проявление поверхностного эффекта.

## Глава 4. ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Гистерезисными машинами называют машины переменного тока, основные электромагнитные процессы в которых связаны с явлением гистерезиса магнитотвердых материалов. Принципиально гистерезисные машины могут работать в режиме двигателя, генератора и электромагнитного тормоза.

Гистерезисные машины применяют в основном в качестве синхронных двигателей (СД) в автоматизированных приводах постоянной частоты вращения и в качестве гироскопических двигателей навигационных систем.

Гистерезисные двигатели являются высоконадежными, бесконтактными машинами, просты по конструкции и имеют хорошие пусковые свойства. Главный их недостаток – сравнительно низкие энергетические показатели.

### 4.1. КОНСТРУКЦИИ И ПОТРЕБИТЕЛЬСКИЕ СВОЙСТВА ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Гистерезисный двигатель имеет статор с трехфазной или однофазной обмоткой и ротор, представляющий собой цилиндр без обмотки, выполненный из магнитотвердого материала с широкой петлей гистерезиса. При подключении обмотки статора к сети возникает вращающееся магнитное поле, которое наводит в массивном роторе вихревые токи. Взаимодействие этих токов с полем статора создает на роторе вращающий момент  $M_B$ , величина которого зависит от скольжения (см. рис. 4.1, кривая 1). Наибольшего значения момент достигает при неподвижном роторе ( $s = 1$ ). По мере увеличения частоты вращения (уменьшение скольжения) момент уменьшается. Величина вращающего момента, вызванного действием вихревых токов в роторе, определяется выражением

$$M_B = \frac{s \cdot P_{BK}}{\omega_1},$$

где  $P_{\text{вк}}$  – потери на вихревые токи в роторе двигателя при  $s = 1$ , т.е. в режиме короткого замыкания;

$\omega_1$  – угловая синхронная скорость.

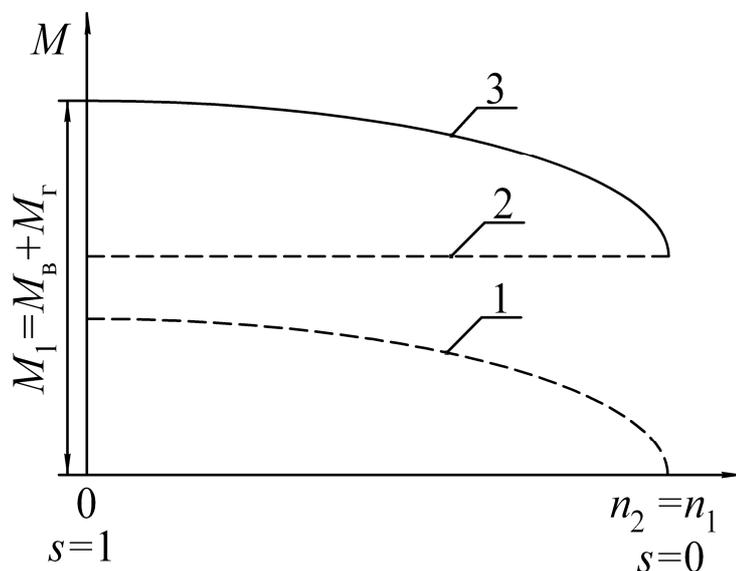


Рис. 4.1. Механические характеристики гистерезисного двигателя

Кроме вращающего момента  $M_B$ , на роторе гистерезисного двигателя возникает так называемый *гистерезисный* момент  $M_G$ , для выяснения природы которого обратимся к модели гистерезисного двигателя на рис. 4.2.

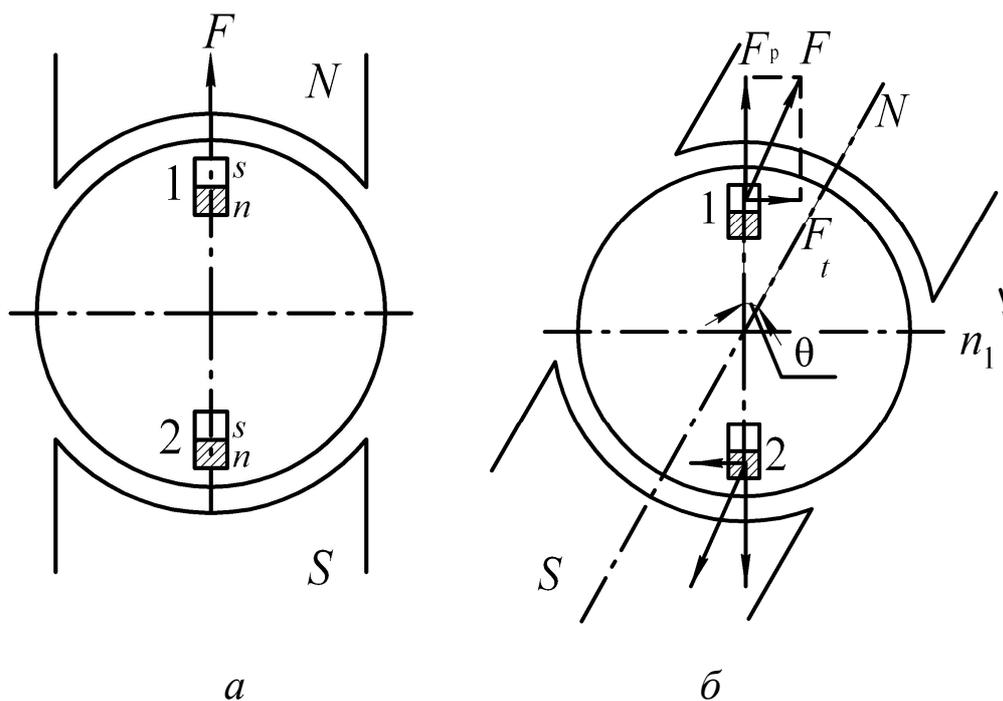


Рис. 4.2. Модель гистерезисного двигателя

В отличие от реального двигателя в рассматриваемой модели вращающееся поле создается вращением пары магнитных полюсов  $N—S$ . Ротор двигателя, находясь в поле статора, намагничивается так, что северному магнитному полюсу статора соответствует южный магнитный полюс ротора. Это видно из рис. 4.2, *а*, где ротор условно показан состоящим из элементарных магнитиков, ориентированных в соответствии с направлением внешнего поля. Между элементарными магнитиками и магнитом  $N—S$  возникает сила взаимодействия  $F$ , направленная по оси магнита  $N—S$ . При вращении внешнего поля происходит перемагничивание ротора. При этом элементарные магнитики как бы поворачиваются вслед за внешним полем. Но так как ротор выполнен из магнитотвердого материала, то вследствие *магнитного запаздывания* ориентировка элементарных магнитиков несколько отстает от вращения внешнего поля. Поэтому поле ротора оказывается повернутым относительно внешнего поля на угол  $\theta$  (см. рис. 4.2, *б*). В этом случае силу взаимодействия  $F$  каждого элементарного магнитика с внешним полем можно разложить на составляющие: радиальную  $F_p = F \cos\theta$  и тангенциальную  $F_t = F \sin\theta$ . Составляющие  $F_t$  от всех элементарных магнитиков создают на роторе вращающий гистерезисный момент  $M_\Gamma$ . Величина момента зависит от величины угла  $\theta$ , который определяется материалом ротора: чем шире петля гистерезиса магнитного материала ротора, тем больше величина гистерезисного момента. Например, применение магнитотвердого материала типа викаллоу с широкой петлей гистерезиса дает возможность получить большой гистерезисный момент. Величина гистерезисного момента  $M_\Gamma$  пропорциональна потерям от гистерезиса в роторе при  $s = 1$ , т. е. при работе двигателя в режиме короткого замыкания  $M_\Gamma = \frac{P_{\Gamma.к}}{\omega_1}$ . Так как гистерезисный момент не зависит от скольжения, то график  $M_\Gamma = f(s)$  имеет вид прямой, параллельной оси абсцисс (см. рис. 4.1, кривая 2).

Таким образом, вращающий момент гистерезисного двигателя можно рассматривать как сумму двух моментов: момента от вихревых токов  $M_B$  и гистерезисного момента  $M_\Gamma$ :

$$M = M_B + M_\Gamma = \frac{s \cdot P_{BK}}{\omega_1} + \frac{P_{ГК}}{\omega_1}.$$

Вид механической характеристики  $M = f(s)$  гистерезисного двигателя (см. рис. 4.1, кривая 3) зависит от соотношения моментов  $M_B = f(s)$  и  $M_\Gamma = f(s)$ . Так, например, если гистерезисный двигатель имеет шихтованный ротор (набранный из листов), то ввиду небольшой величины вихревых токов момент  $M_B$  практически равен нулю. При этом  $M \approx M_\Gamma$ , т. е. двигатель работает лишь под действием гистерезисного момента. Частота вращения ротора такого двигателя равна синхронной.

Двигатели с массивным ротором работают под действием гистерезисного момента и момента от вихревых токов. Такие двигатели могут работать как в синхронном, так и в асинхронном режимах. Однако работа двигателя в асинхронном режиме весьма неэкономична, так как связана со значительными потерями на перемагничивание ротора, выполненного из магнитотвердого материала. Эти потери возрастают при увеличении скольжения (уменьшении частоты вращения). Поэтому гистерезисные двигатели обычно используются в синхронном режиме и только при малых скольжениях – в асинхронном.

Существенными преимуществами гистерезисных двигателей являются:

- простота конструкции;
- надежность в эксплуатации;
- большой пусковой момент;
- плавность входа в синхронизм;
- сравнительно высокий КПД (до 60%);
- бесшумность в работе.

К недостаткам гистерезисного двигателя, прежде всего, следует отнести неравномерность вращения и низкий коэффициент мощности, который обычно не превышает 0,45.

В целях экономии дорогостоящего магнитотвердого материала роторы гистерезисных двигателей делают сборными. В таком роторе магнитотвердый материал применяется в виде шихтованного кольца, насаженного на втулку (рис. 4.3).

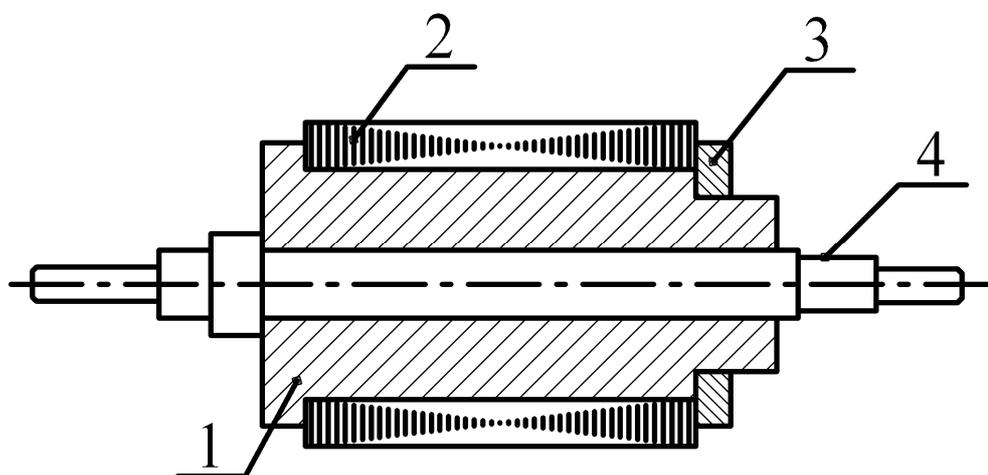


Рис. 4.3. Сборный ротор гистерезисного двигателя:  
1 – втулка; 2 – шихтованное кольцо из магнитотвердого материала;  
3 – запорное кольцо; 4 – вал

## 4.2. ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ

Гистерезисные двигатели обычно изготавливаются на небольшую мощность (микродвигатели) и применяются в автоматике.

*Синхронным гистерезисным* называют микродвигатель (рис. 4.4), вращающий момент которого возникает за счет явления гистерезиса при перемагничивании ротора.

Ротор гистерезисного двигателя выполняют из магнитотвердого материала с широкой петлей гистерезиса (викаллой, альни). Причем в целях экономии дорогостоящего магнитотвердого материала ротор делают сборным (см. рис. 4.3).

При определенном соотношении между толщиной кольца 2 из магнитотвердого материала и диаметра ротора достигаются оптимальное по намагничиванию использование материала и наилучшие энергетические показатели.

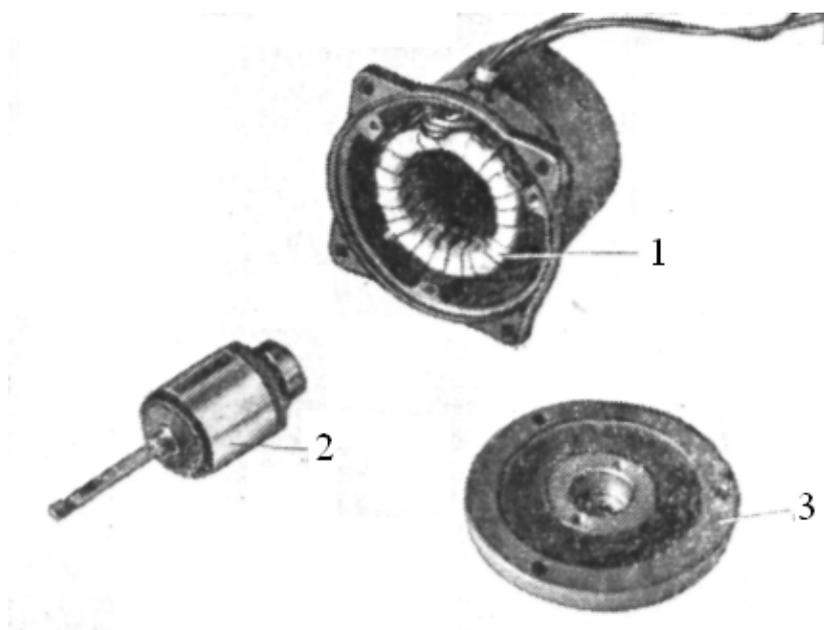


Рис. 4.4. Синхронный гистерезисный микродвигатель:  
1 – статор с двухфазной обмоткой; 2 – ротор; 3 – подшипниковый щит

Для выяснения природы гистерезисного момента рассмотрим физические процессы, происходящие в роторе описанной конструкции при асинхронном вращении, т. е. когда материал ротора непрерывно перемагничивается (см. рис. 4.5). Будем считать, что оси МДС и потоков как в статоре, так и в роторе, совпадают. В момент времени, когда вектор вращающегося магнитного потока статора  $\Phi_1$  занимает положение *A* (см. рис. 4.5, *a*), элементарные магнитики ротора ориентируются вдоль этого потока. Силы взаимодействия элементарных магнитиков, например  $M_1$  и  $M_2$ , с потоком статора направлены вдоль этого потока и вращающего момента не создают. При перемещении потока статора в положение *B* в том же направлении будут поворачиваться и элементарные магнитики (см. рис. 4.5, *б*). Однако вследствие явления гистерезисного запаздывания магнитики  $M_1$  и  $M_2$  не сразу повернутся на тот же угол, что и поток  $\Phi_1$ , и между ними образуется угол рассогласования  $\gamma_{\Gamma}$  (угол гистерезисного запаздывания). После этого силы взаимодействия  $F_{\text{ЭМ}}$  будут иметь тангенциальные составляющие  $F_t$ , которые и создадут гистерезисный момент асинхронного режима  $M_{\Gamma A}$ . Возникающий гистерезисный момент пропорционален векторному произведению пространственных векторов магнитного потока ротора  $\Phi_2$ , образованного элементарными магнитиками, и ста-

тора  $\Phi_1$ , которые вращаются с одинаковой скоростью со сдвигом по фазе на угол  $\gamma_\Gamma$ :

$$M_{\Gamma A} = k \Phi_1 \Phi_2 \sin \gamma,$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от параметров машины.

Величины потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  при симметричном, например трехфазном, питании не зависят от скорости вращения ротора. Пространственный угол  $\gamma_\Gamma$ , на который поток ротора отстает от потока статора, также не зависит от скорости вращения ротора и определяется той коэрцитивной силой  $H_c$ , при которой начинает изменяться направление поля элементарных магнитиков, т. е. определяется формой петли гистерезиса материала ротора. Соответственно, не зависит от скорости вращения ротора и величина вращающего гистерезисного момента  $M_{\Gamma A}$ .

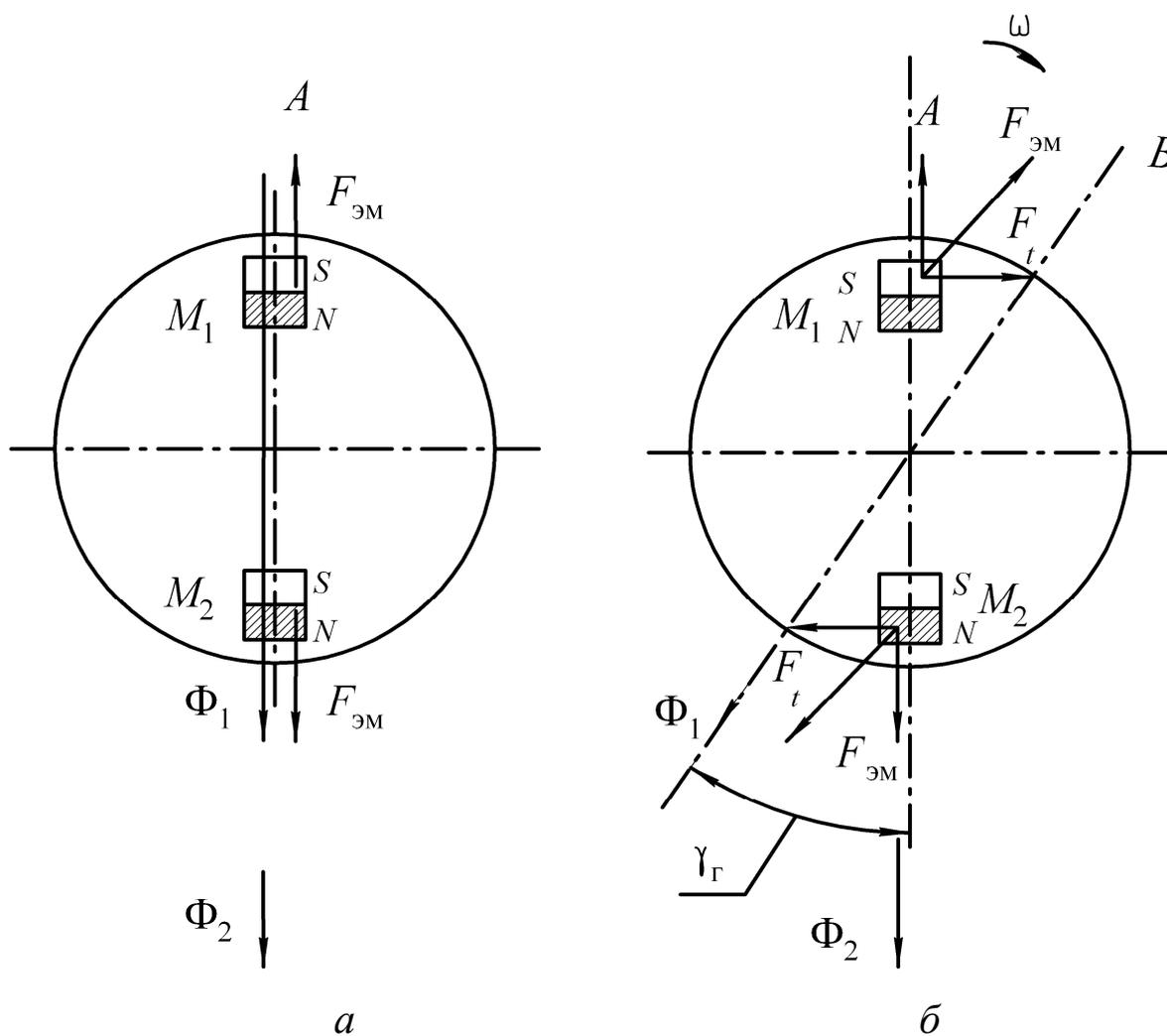


Рис. 4.5. Принцип действия гистерезисного микродвигателя

Величину гистерезисного момента определяют исходя из баланса мощностей в роторе. Мощность потерь на гистерезис в неподвижном роторе

$$P_{\text{ГП}} = p_{\text{Гу}} f_1 V,$$

где  $p_{\text{Гу}}$  – удельные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания в единице объема, пропорциональные площади петли гистерезиса;

$V$  – объем магнитотвердого материала ротора;

$f_1$  – частота напряжения сети.

При вращении ротора со скольжением  $s$  частота перемагничивания ротора  $f_s = s f_1$  и потери на гистерезис в роторе равны

$$P_{\text{ГS}} = s P_{\text{ГП}}.$$

Разница мощностей  $P_{\text{ГП}}$  и  $P_{\text{ГS}}$  соответствует полной механической мощности, развиваемой двигателем:

$$P_{\text{Мех}} = P_{\text{ГП}} - P_{\text{ГS}} = P_{\text{ГП}} (1 - s).$$

Тогда гистерезисный вращающий момент

$$P_{\text{ГА}} = \frac{P_{\text{Мех}}}{\omega_2} = \frac{P_{\text{ГП}}}{\omega_1} = \frac{p_{\text{Гу}} f_1 V}{\omega_1},$$

где  $\omega_2$  и  $\omega_1$  – частоты вращения ротора и поля.

Увеличение гистерезисного момента возможно за счет выполнения ротора из материала с петлей гистерезиса, имеющей наибольшие значения коэрцитивной силы  $H_c$  и остаточной индукции  $B_r$ , а также наиболее выпуклую форму (рис. 4.6). Идеальным был бы материал ротора с прямоугольной петлей гистерезиса 1. Материалы типа ви-каллой и альни, как показывает кривая 2, весьма близки к этому идеалу. Обычные электротехнические стали имеют гистерезисную петлю типа 3 и не обеспечивают сколько-нибудь значительного гистерезисного момента.

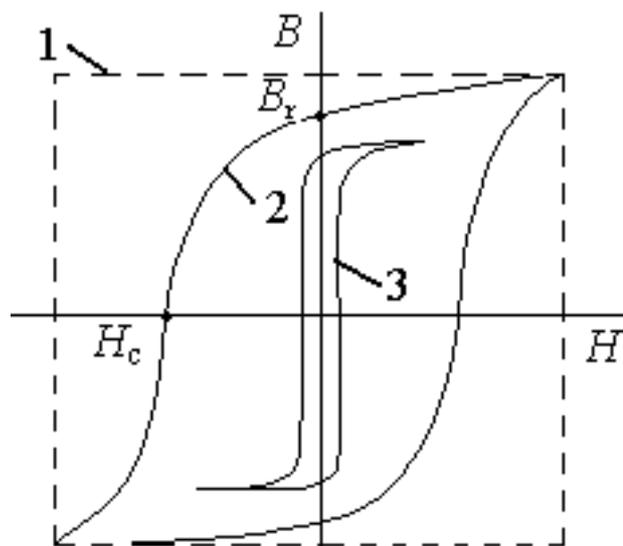


Рис. 4.6. Петля гистерезиса различных материалов

Идеальная механическая характеристика микродвигателя показана на рис. 4.7, *а* сплошной линией. Из этой характеристики видно, что синхронный гистерезисный микродвигатель в отличие от синхронных микродвигателей других типов имеет собственный гистерезисный пусковой момент, равный моменту при синхронной скорости ротора.

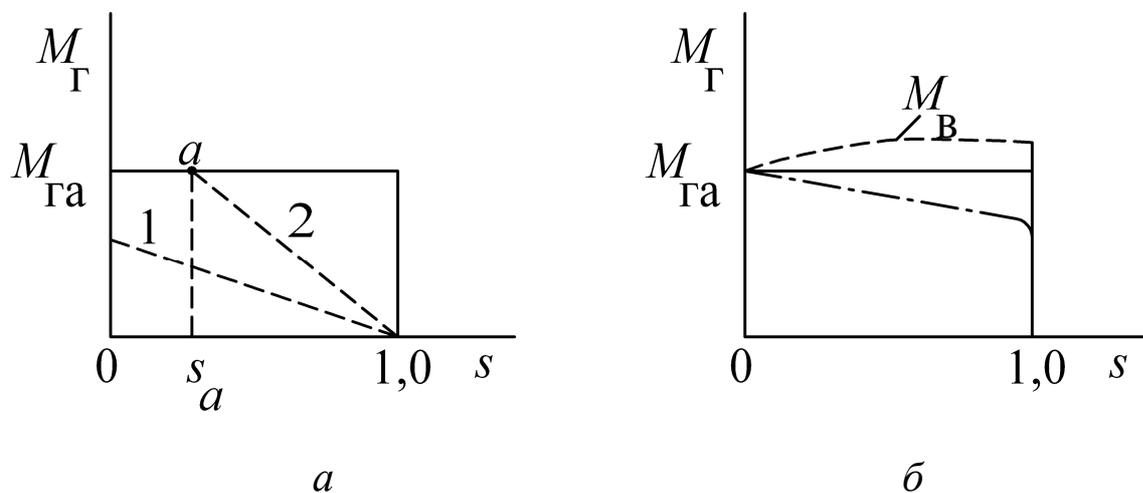


Рис. 4.7. Механические характеристики гистерезисного двигателя

Механическая характеристика реальных гистерезисных микродвигателей может быть не абсолютно жесткой. Изменение гистерезисного момента в функции частоты вращения ротора (скольжения) объясняется в основном тремя факторами.

1. При неравенстве частот вращения ротора и поля в роторе наводятся вихревые токи, которые во взаимодействии с вызвавшим

их полем  $\Phi_1$  создают момент  $M_B$ , являющийся по существу моментом асинхронного двигателя (пунктирная линия на рис. 4.7, б).

2. При конденсаторной схеме включения двухфазного гистерезисного двигателя (см. рис. 4.7, б) в однофазную сеть форма вращающегося магнитного поля статора, а значит, и величина момента  $M_{ГА}$  (штрихпунктирная линия на рис. 4.7, б) зависят от частоты вращения ротора. При изменении частоты вращения ротора меняется частота перемагничивания и потери в роторе и соответственно ток в обмотках статора. Происходит перераспределение напряжений между конденсатором и фазовой обмоткой, и поле, круговое при одной частоте вращения (например, при  $s = 0$ ), становится эллиптическим при другой (аналогично асинхронным микродвигателям).

3. Сказывается влияние моментов высших гармоник поля.

В синхронном режиме магнитное поле статора и ротор вращаются с одной скоростью и перемагничивание материала ротора не происходит. Магнитный поток ротора  $\Phi_{2ост}$  сохраняется вследствие остаточного магнетизма и вращается вместе с ротором с синхронной скоростью. Поток тем больше, чем выше значение остаточной индукции  $B_r$ . Микродвигатель работает как обычный синхронный микродвигатель с постоянными магнитами на роторе. Отличие состоит только в том, что угол отставания оси поля ротора, принимаемой за его продольную ось, от оси поля статора гистерезисного микродвигателя  $\gamma$  не может превысить угла гистерезисного запаздывания  $\gamma_G$ , так как в противном случае начинается перемагничивание ротора. Следовательно, наибольшее значение момента  $M_{ГС}$ , развиваемого гистерезисным двигателем в синхронном режиме, равно  $M_{ГА}$ . При моменте сопротивления на валу, превышающем  $M_{ГА}$ , ротор выходит из синхронизма. У гистерезисных микродвигателей угол  $\gamma_G$  обычно не превышает 20-25°.

Из изложенного следует, что синхронный гистерезисный микродвигатель развивает вращающий момент и при асинхронной, и при синхронной частоте вращения ротора. Режим его работы зависит от величины и характера статического момента сопротивления  $M_{СТ}$  на валу ротора (см. рис. 4.7, а). Если во всем диапазоне скольжений от 1 до 0 момент сопротивления (прямая 1) меньше гистерезисного момента, то

двигатель работает в синхронном режиме. Ось поля ротора отстает от оси поля статора на угол  $\gamma$ , при котором соблюдается равновесие моментов  $M_{ГС} = M_{СТ}$ . Если момент сопротивления меняется по прямой 2, то равновесие моментов наступит при скольжении  $s_a$ , соответствующем точке  $a$ , т. е. двигатель будет работать в асинхронном режиме ( $M_{ГА} = M_{СТ}$ ). Однако использование гистерезисных микродвигателей в асинхронном режиме неэкономично вследствие больших потерь на перемагничивание ротора, особенно при больших скольжениях.

Синхронные гистерезисные микродвигатели обладают весьма ценными качествами. Они развивают большой пусковой момент и способны входить в синхронизм при большом моменте инерции нагрузки. Ротор гистерезисного двигателя входит в синхронизм плавно, без рывков благодаря практически постоянной величине пускового гистерезисного момента за весь период пуска от  $s = 1$  до  $s = 0$ . Потребляемый гистерезисным двигателем ток незначительно (на 20-30%) изменяется при изменении режима работы от короткого замыкания (пуск) до холостого хода, что позволяет эффективно использовать гистерезисные двигатели в повторно-кратковременном режиме. Гистерезисные микродвигатели просты по конструкции и надежны в эксплуатации.

Синхронные микродвигатели выпускают как для работы в системах с постоянной частотой напряжения сети, так и с переменной.

Первые применяются в таких приборах и установках (звукозаписи, телевидения и т. д.), где требуется постоянная частота вращения при изменении момента сопротивления в определенных пределах. Изменение синхронной частоты вращения ротора этих двигателей возможно только переключением обмоток статора на другое число пар полюсов. Следует отметить, что свойством полисинхронизма, т.е. способностью одного и того же двигателя работать при различном числе полюсов обмотки статора, среди синхронных двигателей обладают только гистерезисные микродвигатели. У них число полюсных зон на роторе автоматически получается равным числу полюсов на статоре. Во всех остальных синхронных микродвигателях число полюсов на роторе фиксируется конструктивно.

Двигатели второго типа рассчитаны на плавное или дискретное регулирование синхронной частоты вращения ротора за счет изменения частоты питающей сети. Двигатели с плавным регулированием частоты применяют в основном в системах синхронной связи.

К синхронным микродвигателям, используемым в системах звукозаписи, звуковоспроизведения и т. д., предъявляются жесткие требования по уровню создаваемых звуковых шумов. Для сравнения различных синхронных микродвигателей по этому показателю выделим основные причины шумов.

1. *Шумы механического происхождения* возникают в результате вибраций за счет динамического небаланса ротора, работы подшипников и скользящих контактов.

2. *Шумы аэродинамического происхождения* появляются в результате воздушных завихрений при вращении ротора.

3. *Шумы магнитного происхождения* возникают в результате вибраций магнитопровода под действием переменных электромагнитных сил, обусловленных в основном изменением магнитного сопротивления потоку вдоль окружности ротора.

В соответствии с изложенным наименьший уровень шумов может быть достигнут у гистерезисных микродвигателей, имеющих симметричный в механическом и магнитном отношении ротор с гладкой поверхностью. Наибольшим уровнем шумов обладают реактивные микродвигатели с явнополюсным ротором.

Синхронные микродвигатели часто используют в технологическом оборудовании и бытовых приборах в качестве двигателей общего применения. Из рассмотренных синхронных микродвигателей наиболее просты по конструкции и технологии изготовления и сравнительно дешевы в производстве реактивные микродвигатели, которые выполняются из недорогих магнитомягких материалов.

На рис. 4.8 представлены рабочие характеристики гистерезисного двигателя.

### 4.3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ МАШИН

Энергетические показатели гистерезисного микродвигателя не особенно высоки ( $\eta, \cos\varphi = 0,15 - 0,4$ ), так как поток ротора является вторичным, наведенным рабочим потоком статора и работа такого двигателя соответствует режиму синхронной машины с недовозбуждением. Низкие энергетические показатели гистерезисных машин и, в частности, гистерезисных двигателей – главный их недостаток.

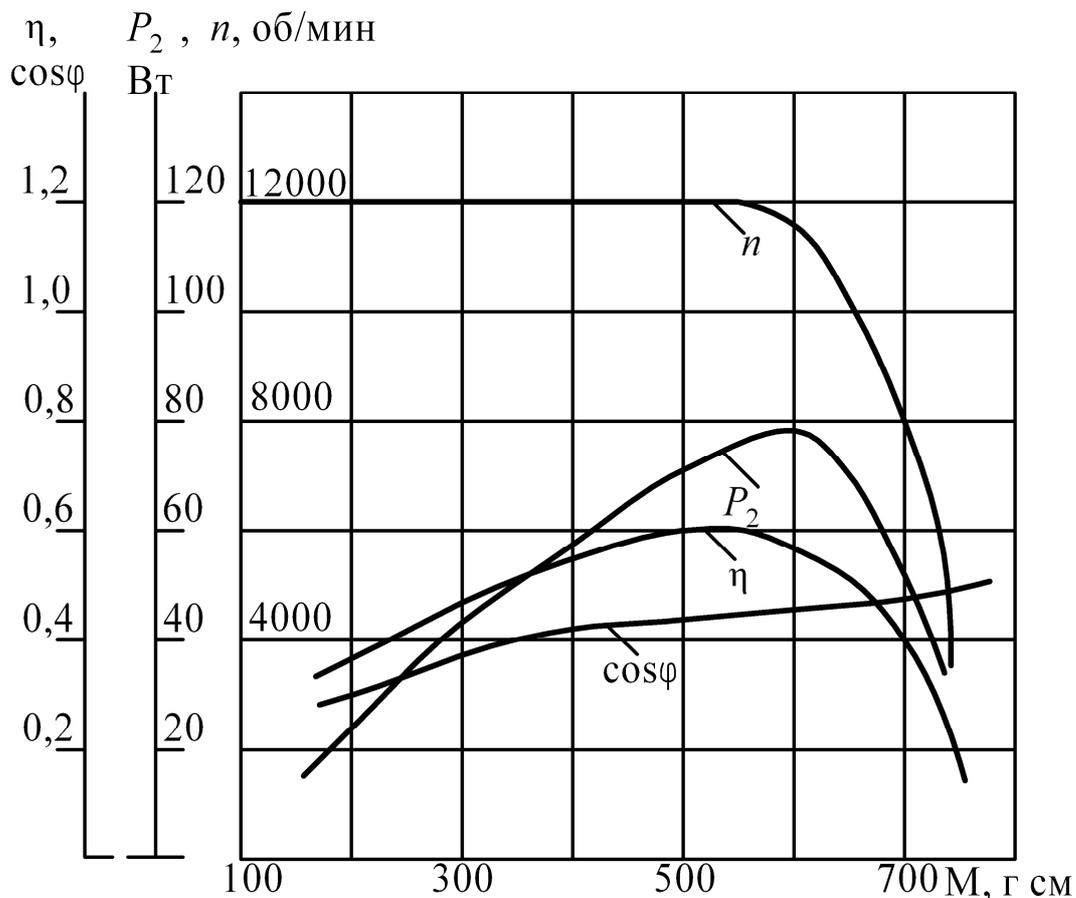


Рис. 4.8. Рабочие характеристики гистерезисного двигателя

Низкие энергетические показатели связаны с большим реактивным намагничивающим током, потребляемым обмоткой статора из сети. В асинхронном режиме это обусловлено большим магнитным сопротивлением гистерезисного слоя из магнитотвердого материала.

Поясним это на примере зависимости тока  $I_1$  гистерезисного микродвигателя в синхронном режиме от напряжения возбуждения  $U_1$ , при снижении последнего от величины  $U_{1п}$ , при которой проис-

ходит пуск (см. рис. 4.9). Величина возбужденной МДС ротора определяется напряжением пуска  $U_{1П}$ , а величина результирующего потока двигателя уменьшается пропорционально  $U_1$ . Значит, при уменьшении  $U_1/U_{1П}$  возрастает роль МДС ротора в создании результирующего магнитного поля и меняется величина и характер тока статора. Индуктивная намагничивающая составляющая тока статора ( $\varphi > 0$ ) постепенно уменьшается до нуля ( $\varphi = 0$ ) и затем появляется размагничивающая емкостная составляющая ( $\varphi < 0$ ). Эта зависимость по своей физической сути аналогична U-образной характеристике синхронного микродвигателя с электромагнитным возбуждением.

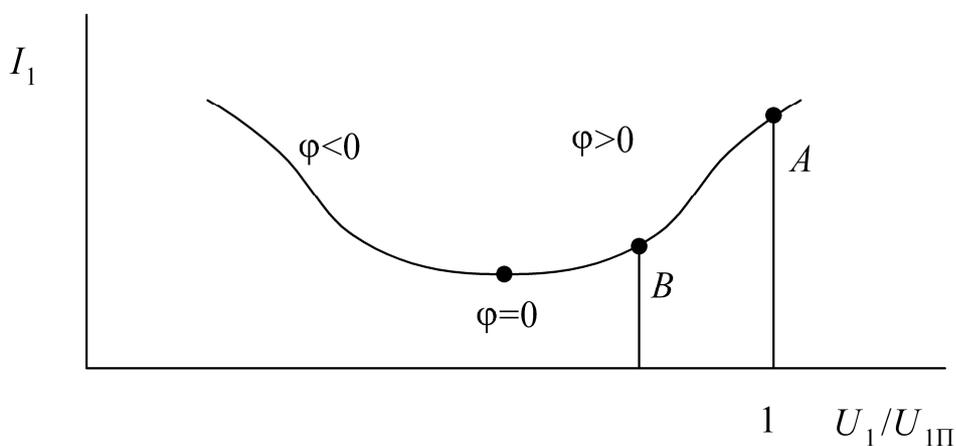


Рис. 4.9. U-образная характеристика гистерезисного микродвигателя

В синхронном режиме низкий  $\cos\varphi$  обусловлен низкой намагниченностью гистерезисного слоя, в результате чего гистерезисный двигатель работает как сильно недо возбужденный синхронный двигатель.

Поскольку основной рабочий режим двигателя – синхронный, а асинхронный является лишь пусковым и длится доли секунды, то важно повышать энергетические показатели в синхронном режиме. Одним из методов является так называемое «перевозбуждение» двигателя. Поскольку магнитная индукция вершины гистерезисной петли  $B_{r\max}$ , до которой намагничен гистерезисный слой в синхронном режиме, определяется напряжением, подведенным к двигателю  $B_{r\max} \sim U_1$ , то «перевозбуждение» заключается в кратковременном

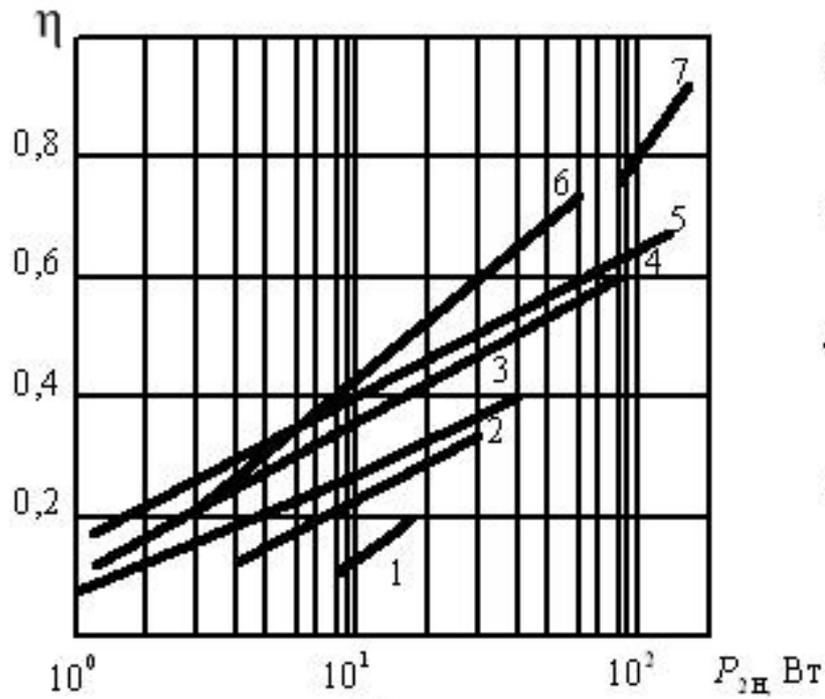
(в течение нескольких периодов переменного тока) повышении напряжения в 2-3 раза по сравнению с номинальным, после чего его вновь снижают до номинального уровня. В результате ротор оказывается намагниченным до больших индукций, увеличивается значение ЭДС холостого хода  $E_0$  и снижается реактивный намагничивающий ток, в связи с чем повышаются энергетические показатели.

Подмагниченный ротор, как и ротор с постоянными магнитами обычного синхронного микродвигателя, начинает больше участвовать в создании основного рабочего магнитного потока и тем самым разгружать обмотку статора от реактивного намагничивающего тока. Это соответствует смещению рабочей точки характеристики двигателя из  $A$  в  $B$  на рис. 4.9.

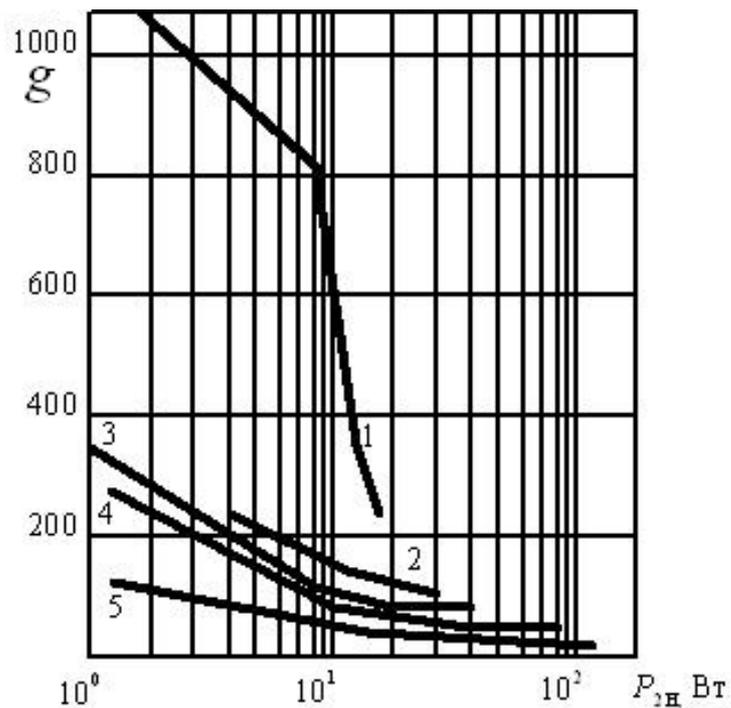
На рис. 4.10 приведены энергетические и весовые показатели гистерезисных микродвигателей в сравнении с теми же показателями некоторых серийных синхронных микродвигателей.

Наиболее высокие энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности) и наименьший вес  $g$  на единицу номинальной мощности имеют микродвигатели активного типа с постоянными магнитами. При частоте напряжения питания 50 Гц в диапазоне мощностей 10-100 Вт,  $\eta=40-80\%$  (меньшие значения относятся к двигателям меньшей мощности). Затем идут гистерезисные микродвигатели, режим которых, как указывалось, соответствует работе синхронной машины с недовозбуждением. При тех же условиях их КПД  $\eta=30-50\%$ . Наихудшие показатели имеют реактивные микродвигатели, у которых поток возбуждения ротора вообще отсутствует. В указанных условиях их КПД  $\eta=20-40\%$ .

Коэффициент мощности существенно зависит от схемы включения двигателя: трехфазной или однофазной с конденсатором. Коэффициент мощности, весьма низкий из-за собственных свойств у реактивных и гистерезисных микродвигателей (порядка 0,3-0,5 в трехфазном режиме), в конденсаторной схеме включения выше и примерно такой же, как у микродвигателей с постоянными магнитами (порядка 0,6-0,9).



*a*



*б*

Рис. 4.10. Зависимость КПД (*a*) и веса на единицу номинальной мощности (*б*) от номинальной мощности синхронных микродвигателей:

- 1 – реактивные; 2 – гистерезисные с однофазной схемой включения и частотой 50 Гц;
- 3 – гистерезисные с однофазной схемой включения и частотой 400 Гц;
- 4 – гистерезисные с трехфазной схемой включения и частотой 50 Гц;
- 5 – гистерезисные с трехфазной схемой включения и частотой 400 Гц;
- 6 – активного типа с постоянными магнитами и частотой 50 Гц;
- 7 – активного типа с постоянными магнитами и частотой 400 Гц

Синхронные микродвигатели, предназначенные для работы от сети с повышенной частотой (400 и 1000 Гц), могут иметь лучшие показатели КПД и веса, чем при частоте 50 Гц.

## **Глава 5. СИНХРОНИЗИРОВАННЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ**

Синхронизированный асинхронный двигатель представляет собой комбинацию синхронного и асинхронного двигателей. Благодаря этому он имеет хорошие пусковые свойства асинхронного двигателя и высокий коэффициент мощности синхронной машины.

Конструктивно синхронизированный двигатель мало отличается от асинхронного двигателя с контактными кольцами. Однако в схеме двигателя имеется переключатель П, посредством которого обмотка ротора может быть подключена либо к пусковому реостату (ПР), либо к возбuditелю В (см. рис. 5.1).

При пуске в ход переключатель ставят в положение 1, и двигатель приходит во вращение как асинхронный. При достижении частоты вращения, близкой к синхронной, переключатель переводят в положение 2, благодаря чему постоянный ток от возбuditеля проходит по обмотке ротора и двигатель начинает работать синхронно. При больших перегрузках синхронизированный двигатель выходит из синхронизма, но продолжает работать как асинхронный, так как максимальный вращающий момент двигателя при его работе в асинхронном режиме больше максимального вращающего момента при работе в синхронном режиме. При уменьшении нагрузки двигатель вновь начинает работать синхронно. Наличие возбuditеля повышает стоимость синхронизированного двигателя. Поэтому двигатели с возбуждением изготавливаются мощностью свыше 60-70 кВт. Синхронизированные двигатели малой мощности не имеют отдельного возбuditеля. Для получения постоянного тока эти двигатели снабжают специальной обмоткой с коллектором.

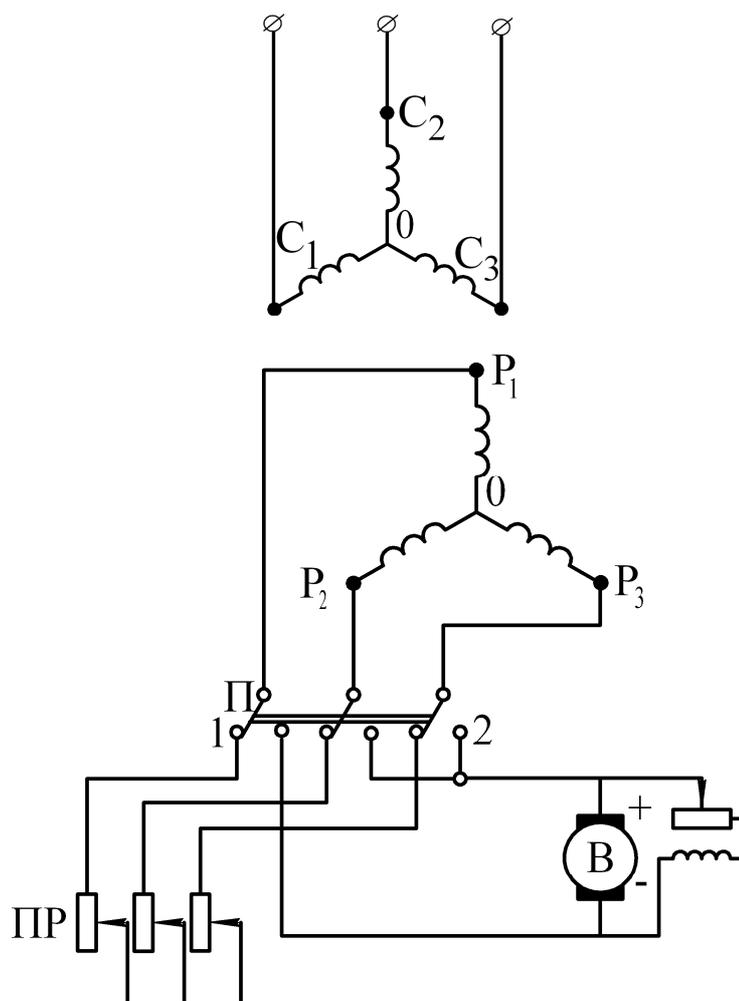


Рис. 5.1. Схема синхронизированного двигателя с возбуждением

## Глава 6. КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 6.1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ АСИНХРОННОЙ КОЛЛЕКТОРНОЙ МАШИНЫ

Первые попытки использовать двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением для работы от сети однофазного переменного тока были сделаны еще в середине восьмидесятых годов позапрошлого столетия. Действительно, так как в этом двигателе изменение тока происходит одновременно и в якоре, и в обмотке возбуждения, то развиваемый двигателем вращающий момент не зависит от направления тока. Чтобы улучшить работу двигателя, его магнитную систему стали целиком делать из листовой стали, а для

устранения вредного действия пульсирующей МДС реакции якоря применили компенсационную обмотку в виде короткозамкнутого витка, совместив ось последнего с осью обмотки якоря. К тому времени был разработан однофазный репульсионный двигатель, в котором, так же как в асинхронном бесколлекторном двигателе, статор и ротор соединены только электромагнитно, но который, тем не менее, сохраняет все свойства однофазного последовательного двигателя.

Изобретение М.О. Доливо-Добровольским асинхронного бесколлекторного двигателя трехфазного тока открыло новую эру в электромашиностроении и на время прервало развитие асинхронной коллекторной машины. Однако в начале прошлого столетия выяснилось, что асинхронные бесколлекторные двигатели имеют малоудовлетворительные регулировочные характеристики и коэффициент мощности, в особенности в тихоходных двигателях или при малых нагрузках. Тогда вновь возродился интерес к асинхронным коллекторным машинам, главным образом к двигателям.

Действительно, снабдив асинхронный двигатель коллектором, мы получаем совершенно новый тип двигателя, приближающийся по своим характеристикам к двигателям постоянного тока. Асинхронная коллекторная машина нашла наибольшее применение в электротяге в форме однофазного последовательного двигателя. Опыт эксплуатации электрифицированных магистральных железнодорожных линий показал, что они могут успешно работать как на постоянном токе повышенного напряжения (3300 В), так и на переменном однофазном токе пониженной частоты (25 и  $16^{1/3}$  Гц). Была поставлена проблема использования для целей тяги однофазного тока промышленной частоты. В то же время (1900-1914 гг.) шло развитие трехфазных коллекторных машин в следующих главных направлениях:

- как двигателей последовательного и параллельного возбуждения, позволяющих плавно и в широких пределах регулировать частоту вращения;
- как двигателей с улучшенным коэффициентом мощности;

– как фазокомпенсаторов, включаемых в цепь ротора асинхронных бесколлекторных машин с той же целью улучшения коэффициента мощности;

– как генераторов переменного тока в каскадных и специальных установках.

Трехфазные параллельные двигатели были предложены еще в 1891 г., но начали развиваться только в прошлом столетии. Наибольшее распространение получил обращенный двигатель (т.е. питаемый с ротора) с двумя комплектами щеток на коллекторе, имеющий жесткую характеристику частоты вращения с регулированием последней в пределах 1:3. Асинхронные компенсированные двигатели и синхронизированные асинхронные двигатели получили значительное развитие в 20-х годах прошлого столетия в связи с вопросом об улучшении  $\cos\varphi$  энергосистем. Основная идея обоих типов машин состоит в том, что в нормальный асинхронный двигатель как бы встраивают добавочную коллекторную машину. Поставленная цель этим достигается, но тяжелой ценой умаления большей части положительных показателей нормального асинхронного двигателя: его стоимости, отдачи и надежности в работе. Поэтому в настоящее время предпочитают улучшать  $\cos\varphi$  двигателей малой мощности при помощи статических конденсаторов, а в двигателях большой мощности – при помощи фазокомпенсаторов.

Первые фазокомпенсаторы с роторным возбуждением были предложены в середине 90-х годов позапрошлого столетия. Фазокомпенсаторы этой системы улучшают  $\cos\varphi$  лишь под нагрузкой. Кроме того, предложен ряд других систем, как с самовозбуждением, так и с независимым возбуждением. В ряде случаев фазокомпенсаторы, несмотря на их значительную стоимость, являются ценным средством улучшения  $\cos\varphi$  асинхронных бесколлекторных двигателей и в настоящее время получили довольно широкое распространение. При соответствующем выборе фазокомпенсатора асинхронный двигатель может работать с опережающим  $\cos\varphi$ .

Коллекторные машины переменного тока широко применяются в каскадных соединениях и служат как для регулирования частоты вращения при увеличенной отдаче, так и для компенсации  $\cos\varphi$ . Основные типы каскадов были развиты за время с 1908 по 1916 гг. Каскады позволяли регулировать частоту вращения либо только вниз от синхронной, либо в обе стороны от нее в пределах до  $\pm 25\%$ . Они получили достаточное распространение в тех отраслях промышленности, для которых пределы регулирования частоты вращения не превышают отношения 1:2.

Коллекторная машина переменного тока может быть использована как генератор тока переменной частоты, работающий с постоянной частотой вращения. Одна из лучших систем этого рода, так называемый компенсированный коллекторный генератор с независимым возбуждением переменного тока, была разработана в СССР в 1921 г. М.П. Костенко. В 1946-1947 гг. М.П. Костенко предложил схему с коллекторным генератором, которая позволяет сохранить постоянную частоту и постоянное напряжение при переменной частоте вращения первичного двигателя.

Таким образом, коллекторную асинхронную машину следует рассматривать как специальный тип электрической машины, который не может конкурировать с нормальными типами электрических машин, но находит достаточно широкое и многообразное применение в ряде специальных случаев.

## 6.2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Для работы двигателя постоянного тока необходим преобразователь переменного тока в постоянный. Наличие такого преобразователя усложняет и удорожает установку, снижает ее надежность. Но в то же время двигатели постоянного тока обладают хорошими регулировочными свойствами, чего лишены бесколлекторные двигатели переменного тока.

Стремление получить двигатель с хорошими регулировочными свойствами, но работающий от сети переменного тока привело к созданию коллекторных двигателей переменного тока.

Эти двигатели могут быть однофазными и трехфазными. Они допускают плавное и в широких пределах регулирование частоты вращения при сохранении высокого коэффициента мощности. Однако эти двигатели имеют тяжелые условия коммутации, конструктивно сложнее и дороже бесколлекторных двигателей переменного тока. Указанные недостатки ограничивают применение коллекторных двигателей переменного тока средней и большой мощности.

Наибольшее распространение получили универсальные коллекторные двигатели, работающие как от сети постоянного тока, так и от сети переменного тока.

### 6.3. ОДНОФАЗНЫЙ КОЛЛЕКТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Коллекторный электродвигатель постоянного тока может работать от сети переменного тока, так как в этом случае изменение направления токов в обмотке якоря и в обмотке возбуждения происходит одновременно; также одновременно меняются направления (знаки) тока якоря  $I_a$  и магнитного потока возбуждения  $\Phi$ .

В итоге среднее значение электромагнитного момента за период остается положительным:

$$M_{\text{ср}} = C_M (\pm \Phi) (\pm I_a) > 0.$$

Возможность работы коллекторного двигателя от сети переменного тока иллюстрируется рис. 6.1, где показано, что при переходе от положительного полупериода переменного тока к отрицательному направление электромагнитного момента сохраняется неизменным.

Однофазные коллекторные двигатели преимущественно имеют последовательное возбуждение.

Применение параллельного возбуждения в данном случае ограничивается тем, что значительная индуктивность параллельной обмотки возбуждения, которая отличается от последовательной обмотки большим числом витков, создает значительный сдвиг фаз между током якоря  $I_a$  и током возбуждения  $I_B$  на угол  $\psi$  (см. рис. 6.2, а).

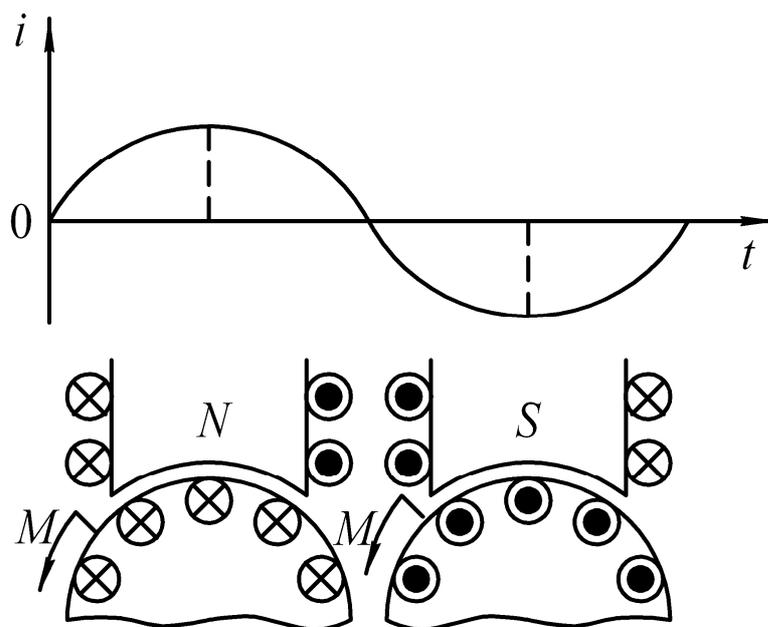


Рис. 6.1. Одновременное изменение направления тока в обмотке возбуждения и в обмотке якоря не влияет на направление электромагнитного момента

Среднее значение электромагнитного момента в этом случае определяется выражением, учитывающим угол сдвига фаз между током якоря и магнитным потоком:

$$M_{\text{ПАР}} = C_M \frac{\Phi_{\text{МАКС}}}{\sqrt{2}} I_a \cos(\psi + \delta),$$

где  $\Phi_{\text{МАКС}}$  – максимальное значение магнитного потока;

$\psi$  – угол сдвига фаз между током якоря и током возбуждения;

$\delta$  – угол сдвига фаз между током возбуждения и магнитным потоком, обусловленный наличием магнитных потерь в машине.

В электродвигателе последовательного возбуждения ток якоря  $I_a$  и ток возбуждения  $I_B$  совпадают по фазе и угол сдвига фаз  $\psi = 0$  (см. рис. 6.2, б). Поэтому среднее значение электромагнитного вращающего момента в двигателе последовательного возбуждения  $M_{\text{ПОСЛ}}$  больше, чем в двигателе параллельного возбуждения:

$$M_{\text{ПОСЛ}} = C_M \frac{\Phi_{\text{МАКС}}}{\sqrt{2}} I_a \cos\delta.$$

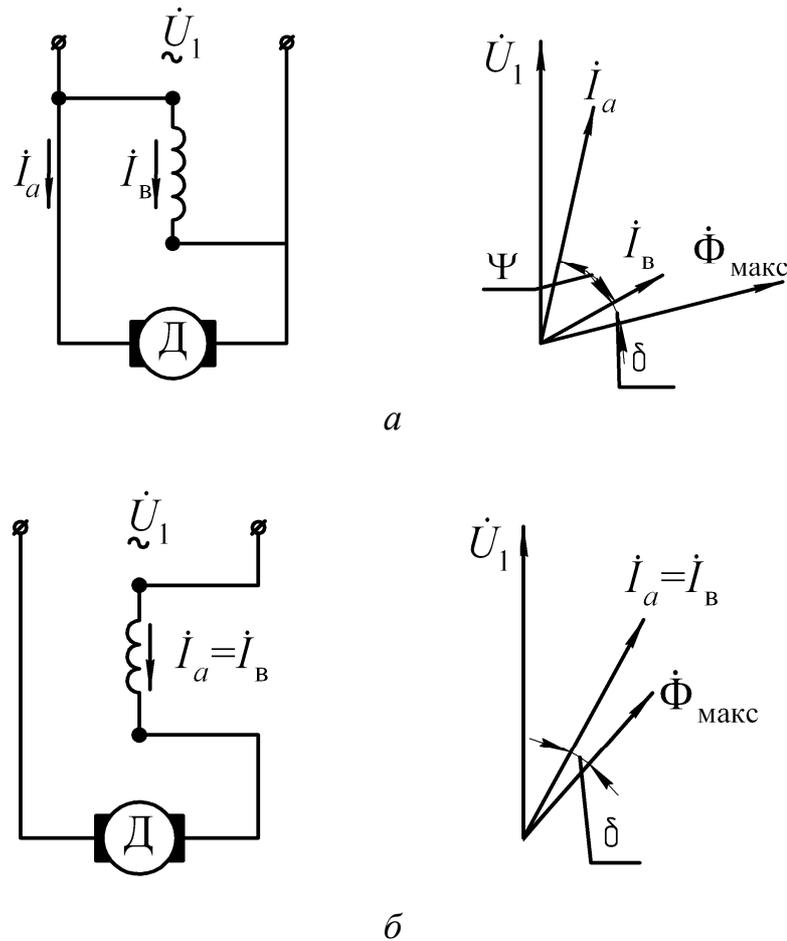


Рис. 6.2. Схемы включения и векторные диаграммы коллекторных двигателей параллельного (а) и последовательного (б) возбуждения при включении в сеть переменного тока

По своей конструкции однофазные коллекторные двигатели отличаются от двигателей постоянного тока тем, что их станина и главные полюса делаются шихтованными из листовой электротехнической стали. Это дает возможность сократить магнитные потери, которые при работе двигателя от сети переменного тока повышаются, так как переменный ток в обмотке возбуждения вызывает перемагничивание всей магнитной цепи машины, включая станину и сердечники полюсов.

Основным недостатком однофазных коллекторных двигателей являются тяжелые условия коммутации. Дело в том, что в коммутирующих секциях помимо реактивной ЭДС  $e_p$  и ЭДС внешнего поля  $e_k$  наводится трансформаторная ЭДС  $e_T$ , действующее значение которой

$$E_T = 4,44 f_1 w_S \Phi_{\text{МАКС}}$$

где  $f_1$  – частота переменного тока в обмотке возбуждения;

$w_s$  – число витков в секции.

Возникновение указанной трансформаторной ЭДС объясняется тем, что переменный ток в обмотке возбуждения создает переменный магнитный поток, который пронизывает коммутирующие секции и наводит в них ЭДС.

Для уменьшения трансформаторной ЭДС необходимо уменьшить поток  $\Phi_{\text{МАКС}}$ , а чтобы мощность двигателя при этом осталась прежней, увеличить число полюсов в двигателе.

Применение в обмотке якоря двигателя одновитковых секций также способствует ограничению величины ЭДС  $E_T$ . Но при этом увеличивается количество пластин в коллекторе, а, следовательно, возрастают его размеры.

При помощи добавочных полюсов с обмоткой, включенной последовательно в цепь якоря, в коммутирующих секциях создают ЭДС  $e_k$ , частично компенсирующую ЭДС  $e_p$  и  $e_T$ . Однако полной взаимной компенсации указанных ЭДС можно добиться только при определенных значениях тока якоря и частоты вращения. При других режимах работы двигателя условия коммутации остаются тяжелыми. В момент пуска двигателя в ход условия коммутации наиболее тяжелы, так как в этот момент ЭДС вращения равна нулю, а ЭДС  $e_p$  и  $e_T$  достигают наибольших значений.

Регулировать частоту вращения однофазного коллекторного двигателя можно теми же способами, что и в двигателях постоянного тока последовательного возбуждения. Наряду с этим принято регулировать частоту вращения изменением подводимого к двигателю напряжения посредством регулировочного трансформатора.

Изменение направления вращения однофазных коллекторных двигателей осуществляется так же, как и в двигателях постоянного тока, переключением концов обмотки возбуждения (либо концов обмотки якоря).

Однофазные коллекторные двигатели малой мощности (до 150 Вт) не имеют ни компенсационной обмотки, ни добавочных полюсов, так как при малой мощности и при частоте питающего тока 50 Гц условия коммутации и без того получаются удовлетворительными.

Эти двигатели могут работать как от сети постоянного тока, так и от сети переменного тока, а поэтому их называют универсальными коллекторными двигателями.

В универсальном коллекторном двигателе стремятся получить примерно одинаковые частоты вращения при номинальной нагрузке как при постоянном, так и при переменном токе. Достигается это тем, что обмотку возбуждения электродвигателя выполняют с ответвлениями: при работе двигателя от сети постоянного тока обмотка возбуждения используется полностью, а при работе от сети переменного тока включается лишь часть обмотки возбуждения (см. рис. 6.3).

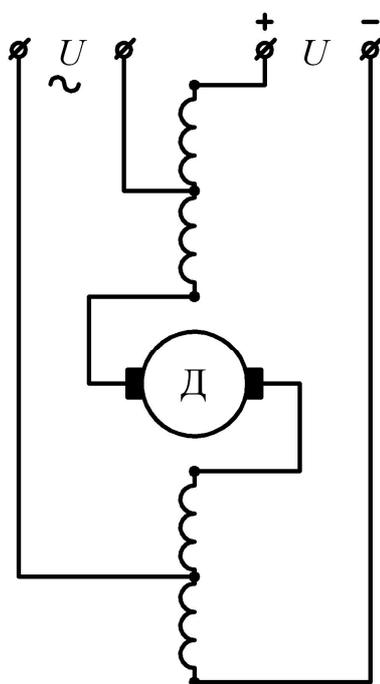


Рис. 6.3. Схема универсального коллекторного двигателя

Кроме того, изменение числа витков обмотки возбуждения при работе от сетей постоянного и переменного тока дает возможность несколько сблизить характеристики двигателя при постоянном и переменном токе. Расхождения в характеристиках объясняются тем, что при работе электродвигателя от сети переменного тока на величину и фазу тока оказывают влияние индуктивные сопротивления обмоток якоря и возбуждения. Однако уменьшение числа витков обмотки возбуждения обеспечивает сближение характеристик лишь при нагрузке, близкой к номинальной.

В табл. 6.1 приведены данные универсального коллекторного двигателя типа УМТ-22. Устройство этого двигателя представлено на рис. 6.4.

Таблица 6.1

Данные универсального коллекторного двигателя типа УМТ-22

Мощность $P_H$ , Вт		Напряжение $U_H$ , В		Частота вращения, об/мин	Номинальный ток, А		КПД, %		$\cos \varphi$	Частота питания, Гц	Вес, кг
постоянного тока	переменного тока	постоянного тока	переменного тока		постоянный	переменный	постоянного тока	переменного тока			
55	55	110	127	2500	1	1,5	54-56	49-51	0,71-0,73	50	4,5

Величина тока статора  $I$  универсальных двигателей при работе от сети переменного тока больше, чем при работе этого же электродвигателя от сети постоянного тока, так как переменный ток, помимо активной составляющей, имеет еще и реактивную составляющую.

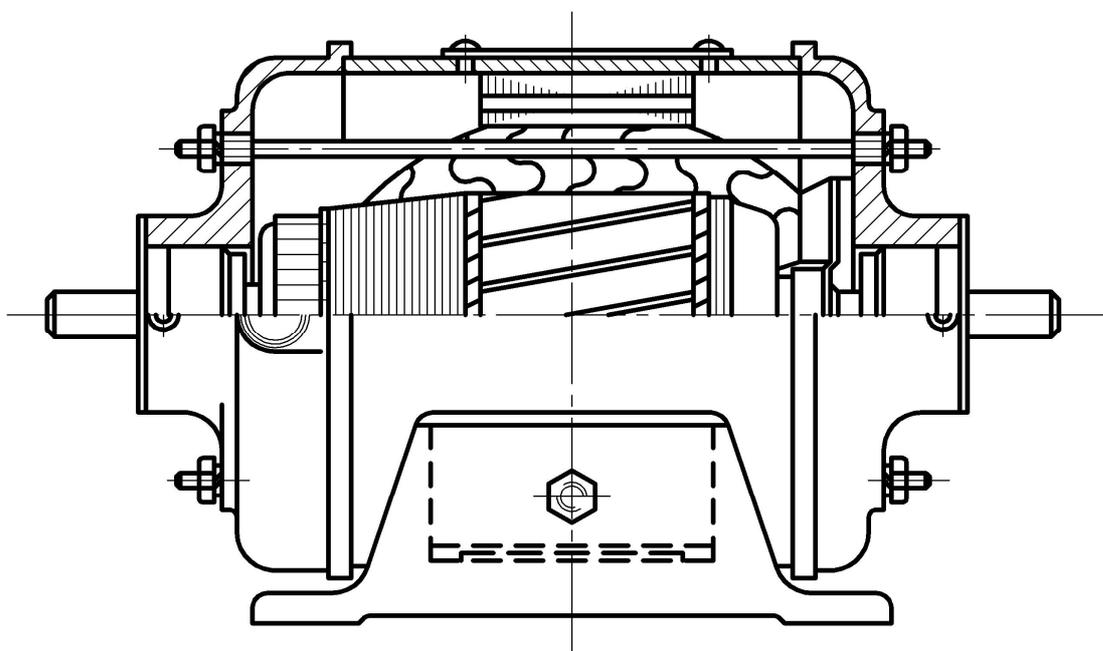


Рис. 6.4. Универсальный коллекторный двигатель серии УМТ

КПД универсальных двигателей при переменном токе ниже, чем при постоянном, что вызвано повышенными магнитными потерями. Области применения универсальных коллекторных двигателей доста-

точно широки: они применяются в автоматике, для привода различного электроинструмента, бытовых электроприборов и т. п.

#### 6.4. РЕПУЛЬСИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ДВУМЯ ОБМОТКАМИ НА СТАТОРЕ

В репульсионном двигателе электрическая связь между обмотками статора и якоря заменена трансформаторной связью. На статоре двигателя имеется две обмотки (рис. 6.5): обмотка возбуждения ОВ и компенсационная обмотка ОК. Обмотки сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол  $90^\circ$  (на рис. 6.5 предполагается конструкция с числом пар полюсов  $p = 1$ ).

На коллекторе репульсионного двигателя имеются щетки, но они замкнуты накоротко (на рис. 6.5 показаны условные щетки).

При включении двигателя в сеть переменного тока обе обмотки статора создадут пульсирующие магнитные потоки. Для объяснения взаимодействия этих потоков с обмоткой якоря эта обмотка условно изображена в виде катушки, концы которой замкнуты щетками. При этом ось щеток одновременно является осью обмотки якоря.

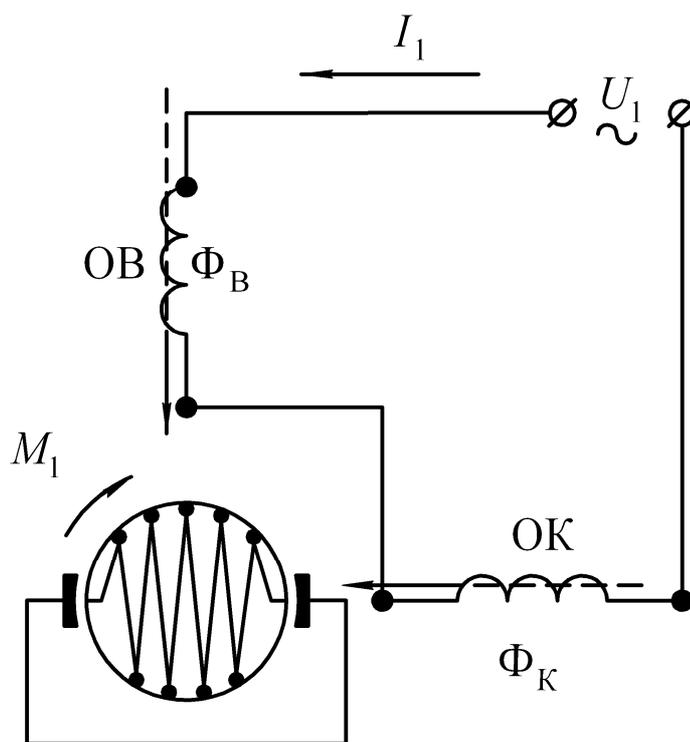


Рис. 6.5. Репульсионный двигатель с двумя обмотками на статоре

Магнитный поток обмотки возбуждения  $\Phi_B$  направлен перпендикулярно оси обмотки якоря, а поэтому не наводит в обмотке якоря ЭДС. Магнитный поток компенсационной обмотки  $\Phi_K$  направлен вдоль оси обмотки якоря и наводит в этой обмотке ЭДС  $E_T$ , называемую трансформаторной. Так как щетки двигателя замкнуты, то ЭДС  $E_1$  создаст в обмотке якоря ток  $I_a$ . В остальном работа репульсионного двигателя, в принципе, не отличается от работы однофазного коллекторного двигателя последовательного возбуждения: токи в активных проводниках обмотки якоря взаимодействуют с магнитным потоком обмотки возбуждения  $\Phi_B$  и создают на якоре электромагнитный момент  $M$ , величина которого с некоторым приближением равна

$$M \approx C_M \Phi_B I_a.$$

Отсутствие электрической связи между обмотками статора и ротора в репульсионном двигателе обеспечивает более надежную работу щеточного контакта. Дело в том, что обмотка якоря двигателя может быть выполнена на любое низкое напряжение, независимо от напряжения в питающей сети, что значительно облегчает процесс коммутации.

### 6.5. РЕПУЛЬСИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ОДНОЙ ОБМОТКОЙ НА СТАТОРЕ

В отличие от предыдущего этот двигатель имеет одну статорную обмотку, при этом короткозамкнутые щетки на якоре (см. рис. 6.6) могут поворачиваться относительно статорной обмотки. Взаимное положение осей обмоток статора и якоря определяется углом  $\alpha$ . При  $\alpha = 0$  обмотки статора и якоря взаимно перпендикулярны (рис. 6.6, а). В этом случае трансформаторная ЭДС обмотки якоря равна нулю, соответственно чему ток якоря  $I_a$  и вращающий момент  $M$  равны нулю.

При  $\alpha = 90^\circ$  обмотки статора с числом витков  $w_1$  и якоря с числом витков  $w_a$  располагаются по одной оси, при этом в обмотке якоря индуктируется трансформаторная ЭДС. Однако якорь будет оставаться неподвижным, так как взаимодействие тока в проводниках обмотки

якоря с потоком возбуждения не создает в данном случае вращающего момента (см. рис. 6.6, б). Указанное положение щеток называется положением короткого замыкания. Рабочий режим двигателя соответствует значениям  $0 < \alpha < 90^\circ$ . В этом случае рассматриваемый репульсионный двигатель с одной статорной обмоткой может быть приведен к репульсионному двигателю с двумя статорными обмотками:

- обмоткой возбуждения с числом витков  $w_B = w_1 \cos \alpha$ ;
- компенсационной обмоткой с числом витков  $w_K = w_1 \sin \alpha$ .

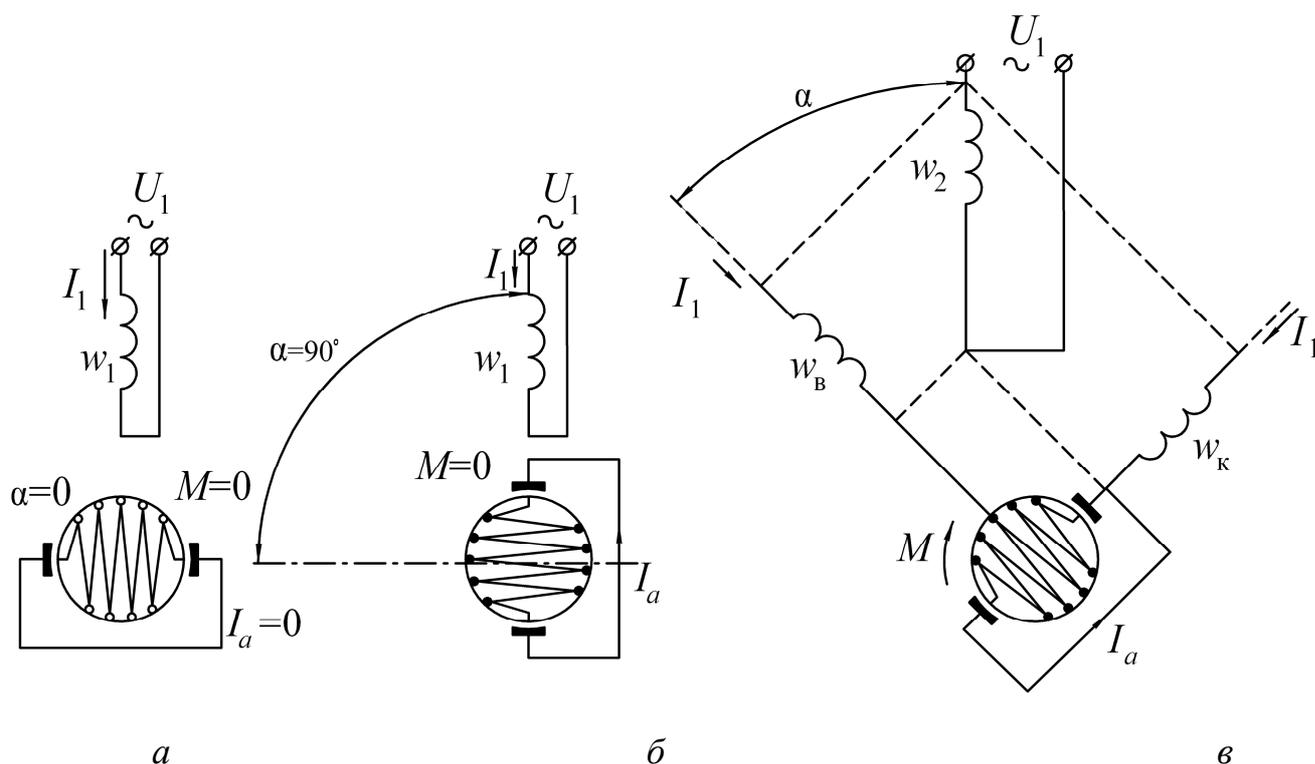


Рис. 6.6. Репульсионный двигатель с одной обмоткой на статоре

При этом предполагается, что в каждой из обмоток ток равен  $I_1$ . Магнитные потоки, создаваемые НС этих обмоток, соответственно равны  $\Phi_B = \Phi_1 \cos \alpha$  и  $\Phi_K = \Phi_1 \sin \alpha$ . Величина электромагнитного момента рассматриваемого двигателя равна

$$M \approx C_M \Phi_B I_a \approx C_M \Phi_1 I_a \cos \alpha.$$

Если магнитная система машины не насыщена, то магнитный поток обмотки статора пропорционален НС этой обмотки

$$\Phi_1 = K I_1 w_1,$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности;

$I_1$  – величина тока в обмотке статора.

Подставив полученное выражение, получим

$$M \approx C_M K w_1 I_1 I_a \cos \alpha.$$

Токи в обмотке якоря и компенсационной обмотке статора, имеющих трансформаторную связь, обратно пропорциональны числам витков этих обмоток

$$\frac{I_1}{I_a} = \frac{w_a}{w_1 \sin \alpha}.$$

Следовательно,

$$I_a = I_1 \frac{w_1 \sin \alpha}{w_a}.$$

Подставив выражение тока якоря в формулу момента, получим

$$M \approx C_M K I_1 w_1 I_1 \frac{w_1}{w_a} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \approx C'_M I_1^2 \sin 2\alpha,$$

где  $C'_M = C_M \frac{K w_1^2}{2 w_a}.$

Таким образом, электромагнитный момент репульсионного двигателя с одной обмоткой на статоре пропорционален квадрату тока, потребляемого двигателем из сети. Если при сдвиге щеток менять напряжение  $U_1$  так, чтобы ток  $I_1$ , оставался неизменным, то согласно полученному выражению наибольший электромагнитный момент будет соответствовать значению  $\alpha = 45^\circ$ . Но двигатель работает обычно при  $U_1 = const$ , поэтому поворот щеток сопровождается изменением тока  $I_1$ . В этом случае наибольшее значение электромагнитного момента соответствует  $\alpha = 70-80^\circ$  (см. рис. 6.7).

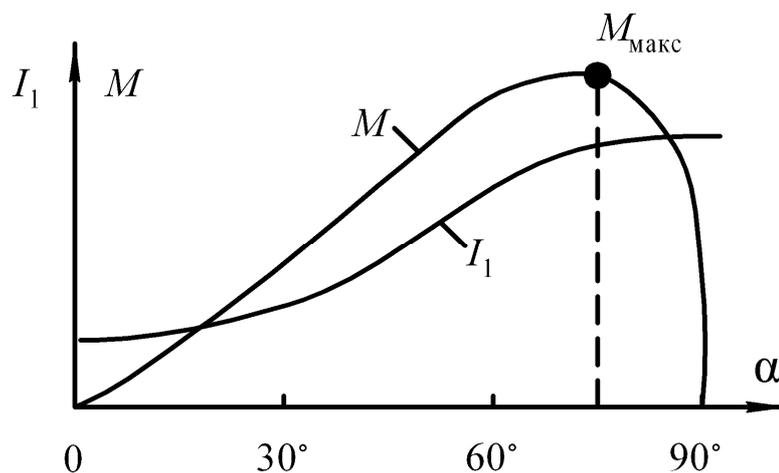


Рис. 6.7. Графики  $M = f(\alpha)$  и  $I_1 = f(\alpha)$  репульсионного двигателя с одной обмоткой на статоре

Так как репульсионный двигатель работает при изменяемом положении щеток на коллекторе, то применение в нем добавочных полюсов с целью улучшения коммутации невозможно.

#### **6.6. ТРЕХФАЗНЫЙ КОЛЛЕКТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ И $\cos\varphi_1$ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ВВЕДЕНИЕМ В ЦЕПЬ РОТОРА ДОБАВОЧНОЙ ЭДС**

Трехфазный коллекторный двигатель представляет собой трехфазный асинхронный двигатель с вращающимся магнитным полем, в фазный ротор которого вводится добавочная ЭДС  $E_d$  частотой  $f_2 = s \cdot f_1$ . Поэтому прежде чем переходить к изучению работы трехфазного коллекторного двигателя, рассмотрим процессы, происходящие в нормальном асинхронном двигателе при введении в цепь ротора добавочной ЭДС.

Как следует из принципа работы асинхронного двигателя, обмотка ротора не имеет электрической связи с обмоткой статора. Между этими обмотками существует только магнитная связь, и энергия из одной обмотки передается в другую посредством магнитного поля. В этом отношении асинхронный двигатель подобен трансформатору, в котором обмотка статора является первичной, а обмотка ротора – вторичной.

В процессе работы асинхронного двигателя токи в обмотках статора и ротора создают в машине две намагничивающие силы: НС статора и НС ротора. Совместным действием этих НС в двигателе создается результирующий магнитный поток, вращающийся относительно статора с синхронной скоростью  $n_1$ . Так же, как и в трансформаторе, этот магнитный поток можно рассматривать состоящим из основного потока  $\Phi$ , сцепленного как с обмоткой статора, так и с обмоткой ротора, и двух потоков рассеяния: потока рассеяния обмотки статора  $\Phi_{p1}$  и потока рассеяния обмотки ротора  $\Phi_{p2}$ .

Рассмотрим, какие ЭДС наводятся в обмотках двигателя.

*Обмотка статора.* Основной магнитный поток  $\Phi$ , вращающийся со скоростью  $n_1$ , наводит в неподвижной обмотке статора ЭДС  $E_1$ , величина которой определяется выражением

$$E_1 = 4,44 f \Phi w_1 K_1,$$

где  $K_1$  – обмоточный коэффициент обмотки ротора;

$w_1$  – число последовательно соединенных витков одной фазы обмотки статора.

Магнитный поток рассеяния статора  $\Phi_{p1}$  наводит в обмотке статора ЭДС рассеяния  $E_{p1}$ , величина которой определяется индуктивным падением напряжения в обмотке статора  $\dot{E}_{p1} = j\dot{I}_1 x_1$ , где  $x_1$  – индуктивное сопротивление рассеяния одной фазы обмотки статора. Кроме того, ток  $I_1$  в обмотке статора создает падение напряжения в активном сопротивлении  $\dot{E} = \dot{I}_1 r_1$ , где  $r_1$  – активное сопротивление одной фазы обмотки статора. Таким образом, напряжение сети  $U_1$ , подведенное к обмотке статора, уравнивается суммой ЭДС, наведенных в этой обмотке:

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + (-\dot{E}_{p1}) + \dot{E}_r = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1.$$

Последнее выражение представляет собой уравнение ЭДС обмотки статора асинхронного двигателя.

*Обмотка ротора.* В процессе работы двигателя ротор вращается в сторону вращения магнитного поля статора со скоростью  $n_2$ . Поэтому частота вращения поля статора относительно ротора равна разности частот вращения  $n_1 - n_2$ . Основной магнитный поток  $\Phi$  обмотки статора, обгоняя ротор с частотой вращения  $n_1 - n_2$ , индуцирует в обмотке ротора ЭДС:

$$E_{2s} = 4,44 f_2 \Phi w_2 K_2,$$

где  $K_2$  – обмоточный коэффициент обмотки ротора;

$w_2$  – число последовательно соединенных витков одной фазы обмотки ротора;

$f_2$  – частота ЭДС  $E_{2s}$ .

Частота  $f_2$  определяется частотой вращения магнитного поля статора относительно ротора  $n_1 - n_2$  и числом пар полюсов обмотки статора, т. е. пропорциональна скольжению:

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} = \frac{pn_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 s.$$

Для большинства асинхронных двигателей эта частота невелика и при  $f = 50$  Гц она не превышает нескольких герц. Так, при скольжении  $s = 0,05$  и  $f = 50$  Гц частота ЭДС в обмотке ротора равна  $f_2 = 2,5$  Гц.

Подставив полученное для частоты  $f_2$  выражение в формулу для ЭДС, получим

$$E_{2s} = 4,44 f_1 s \Phi w_2 K_2 = E_2 s.$$

Здесь  $E_2$  представляет собой ЭДС, наведенную в обмотке ротора при скольжении  $s = 1$ , т. е. при неподвижном роторе.

Поток рассеяния ротора  $\Phi_{p2}$  индуцирует в обмотке ротора ЭДС рассеяния  $E_{p2}$ , величина которой определяется индуктивным падением напряжения в этой обмотке:

$$-E_{p2} = jI_2 s x_2,$$

где  $x_2$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки при неподвижном роторе ( $s = 1$ ).

Так как в процессе работы двигателя обмотка ротора замкнута накоротко, то сумма ЭДС в цепи ротора равна нулю, т. е.

$$s\dot{E}_2 - j\dot{I}_2sx_2 - \dot{I}_2r_2 = 0,$$

где  $r_2$  – активное сопротивление цепи ротора.

Разделив все члены последнего равенства на  $s$ , получим уравнение ЭДС для цепи обмотки ротора

$$\dot{E}_2 - j\dot{I}_2x_2 - \frac{\dot{I}_2r_2}{s} = 0.$$

Учитывая, что скольжение асинхронного двигателя обычно очень мало, получим при первом приближении, приняв  $sx_2 = 0$  из уравнения ЭДС цепи ротора

$$s\dot{E}_2 = \dot{I}_2r_2.$$

Отсюда скольжение асинхронного двигателя при отсутствии в цепи ротора добавочной ЭДС ( $E_{\text{д}} = 0$ )

$$s = \frac{I_2r_2}{E_2}.$$

При введении в цепь ротора добавочной ЭДС  $E_{\text{д}}$  частоты  $f_2$  уравнение ЭДС изменится следующим образом:

$$s'\dot{E}_2 + \dot{E}_{\text{д}} = \dot{I}_2r_2.$$

Если  $E_{\text{д}}$  направлена согласно  $E_2$ , то  $s' = \frac{I_2r_2}{E_2} - \frac{E_{\text{д}}}{E_2} = s - \frac{E_{\text{д}}}{E_2}$ , т. е.

скольжение двигателя после введения в цепь ротора добавочной ЭДС  $E_{\text{д}}$  становится меньше первоначального скольжения  $s$  на величину  $\frac{E_{\text{д}}}{E_2}$  и частота вращения ротора при этом увеличивается. Если же  $E_{\text{д}}$

направлена встречно  $E_2$ , то  $s' = \frac{I_2r_2}{E_2} + \frac{E_{\text{д}}}{E_2} = s + \frac{E_{\text{д}}}{E_2}$ , т. е. скольжение

двигателя увеличивается по сравнению со скольжением  $s$ . Частота вращения ротора при этом уменьшается.

Добавочная ЭДС в цепи ротора  $E_d$  частоты  $f_2$  влияет на коэффициент мощности двигателя. Чтобы убедиться в этом, построим векторную диаграмму асинхронного двигателя (рис. 6.8) для случая введения в цепь ротора добавочной ЭДС  $\dot{E}_d$ , сдвинутой по фазе относительно  $E_2$  на угол  $\theta$ . Направление вектора  $\dot{I}'_2$ , как это видно из диаграммы, определяется положением вектора  $\dot{I}'_2 r'_2$ , построенного на основании уравнения. С изменением фазы или величины ЭДС  $E_d$  меняется направление вектора  $\dot{I}'_2$ , а следовательно, и  $\cos\varphi_1$ . При этом увеличению  $\cos\varphi_1$  обычно соответствует опережающий угол  $\theta$ , когда добавочная ЭДС  $E_d$  опережает по фазе ЭДС  $E_2$ .

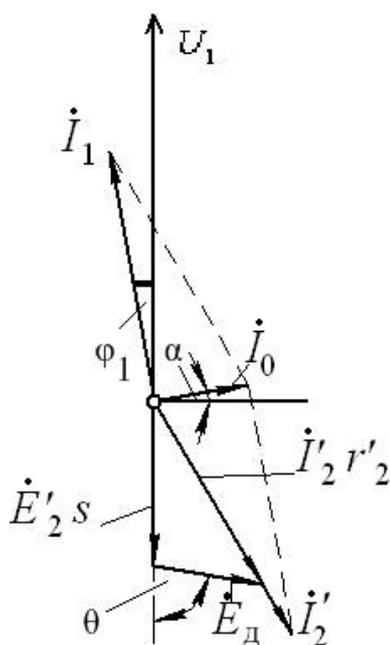


Рис. 6.8. Векторная диаграмма асинхронного двигателя при введении в цепь ротора добавочной ЭДС

### 6.7. ТРЕХФАЗНЫЙ КОЛЛЕКТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

На роторе этого двигателя имеется две обмотки (см. рис. 6.9, *a*): трехфазная обмотка 1, каждая фаза которой присоединена к контактному кольцу, и обмотка 2, выполненная аналогично якорной обмотке машины постоянного тока и присоединенная к коллектору. На статоре двигателя расположена трехфазная обмотка 3, каждая фаза кото-

рой присоединена к паре щеток, наложенных на коллектор. Двигатель имеет устройство, позволяющее в процессе работы сдвигать или раздвигать все щетки на коллекторе относительно друг друга, а также смещать всю систему щеток против направления вращения или по направлению вращения ротора.

Трехфазная обмотка ротора 1, включенная в сеть, создает вращающееся магнитное поле, которое, вращаясь с синхронной частотой вращения (относительно этой обмотки), индуцирует в обмотке статора 3 ЭДС  $E_2$ . Так как обмотка 3 замкнута, то в ней появляется ток, который, взаимодействуя с вращающимся полем обмотки ротора, создает на проводах обмотки статора электромагнитную силу  $F_{\text{ЭМ}}$ , направленную в сторону вращающегося поля (см. рис. 6.9, б).

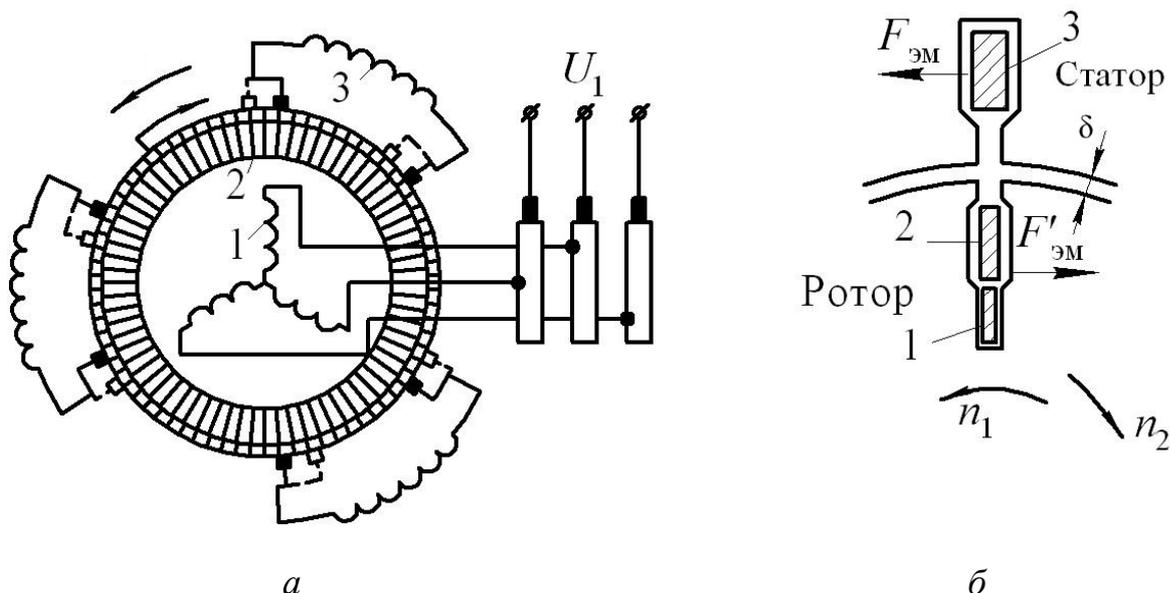


Рис. 6.9. Схема трехфазного коллекторного двигателя параллельного возбуждения

При этом на проводники обмотки ротора начинает действовать сила  $F'_{\text{ЭМ}}$ , направленная против вращающегося поля. В итоге ротор и создаваемое им магнитное поле вращаются в противоположные стороны. При этом ротор вращается с асинхронной частотой вращения  $n_2$ , а ЭДС статора имеет частоту  $f_2 = sf_1$ . Вращающееся поле ротора, создаваемое обмоткой 1, индуцирует в обмотке 2 ЭДС частоты сети  $f_1$  независимо от того, находится ли ротор в покое или же вращается, потому что ак-

тивные стороны этой обмотки уложены в тех же пазах, что и активные стороны обмотки 1 (см. рис. 6.9, б). ЭДС обмотки 2 через коллектор и щетки создает на зажимах фазных обмоток статора напряжение, имеющее такую же частоту, как и частота ЭДС  $E_2$ , индуктируемая в фазных обмотках статора вращающимся полем обмотки 1.

Таким образом, в цепь статора вводится добавочная ЭДС  $E_d$ , которая совместно с ЭДС статора  $E_2$  вызывает ток  $I_2$ . Взаимодействие этого тока с током ротора определяет величину вращающего момента, а следовательно, и скорость вращения двигателя.

Уравнение равновесия ЭДС цепи статора имеет вид

$$\dot{E}_2 \pm \dot{E}_d = \dot{I}_2 Z_2,$$

где  $Z_2$  – полное сопротивление цепи статора.

Знак «плюс» в этом равенстве соответствует согласному направлению ЭДС  $E_d$  и  $E_2$ , а знак «минус» – их встречному направлению.

ЭДС статорной обмотки

$$E_2 = 4,44 f s \Phi w_2 K_2.$$

Если между щетками каждой фазы находится  $w_x$  витков обмотки 2, то ЭДС этих витков (добавочная ЭДС)

$$E_d = 4,44 f_1 \Phi w_x K_1.$$

Пренебрегая малым значением  $\dot{I}_2 Z_2$ , получим  $\dot{E}_2 = \pm \dot{E}_d$  или, подставив значения  $\dot{E}_2$  и  $\dot{E}_d$ ,

$$w_2 s K_2 = \pm w_x K_1.$$

Отсюда скольжение двигателя

$$s = \pm \frac{w_x K_1}{w_2 K_2}.$$

Здесь знак «плюс» соответствует встречному направлению ЭДС, а знак «минус» – согласному направлению этих ЭДС.

Из рис. 6.10 видно, что величина  $w_x$  зависит от угла раствора щеток  $2\alpha$ .

При совмещении щеток  $2\alpha = 0$  (см. рис. 6.10, а). В этом случае двигатель работает как обычный асинхронный двигатель с частотой вращения  $n_2 \approx n_1$  в режиме холостого хода, с некоторым уменьшением частоты вращения по мере возрастания нагрузки. При увеличении угла  $2\alpha$  (см. рис. 6.10, б) количество витков  $w_x$  возрастает, и в фазных обмотках статора начинает действовать добавочная ЭДС. Предположим, что  $E_d$  действует встречно относительно ЭДС  $E_2$ . Тогда скольжение становится *положительным* (знак «плюс» в формуле), и двигатель работает с частотой вращения ниже синхронной. При положении щеток, показанном на рис. 6.10, в, добавочная ЭДС  $E_d$  изменит свое направление и будет действовать согласованно с ЭДС  $E_2$ . В этом случае скольжение становится *отрицательным* (знак «минус» в формуле). Частота вращения увеличивается и становится выше синхронной. Регулирование частоты вращения двигателя при изменении скольжения в диапазоне  $-0,5 < s < +0,5$  возможно в пределах 3:1.

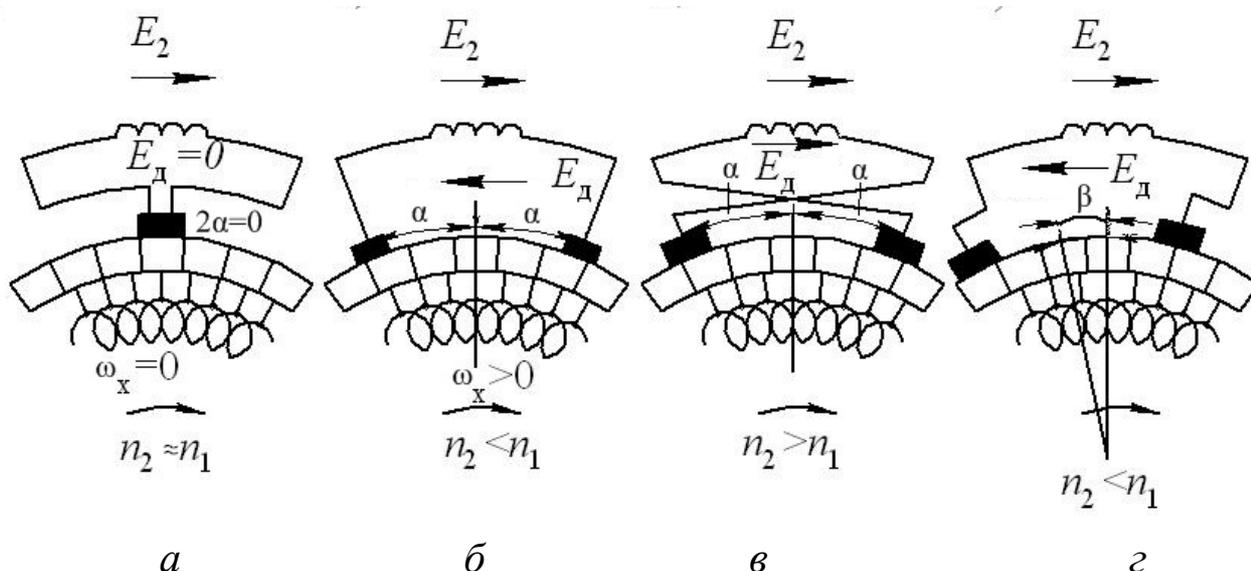


Рис. 6.10. Регулирование частоты вращения и коэффициента мощности трехфазного коллекторного двигателя параллельного возбуждения

Для улучшения коэффициента мощности двигателя, особенно при низких частотах вращения, не изменяя угла раствора щеток  $2\alpha$  у каждой фазы, сдвигают всю щеточную систему на угол  $\beta$  (см. рис. 6.10, г) навстречу вращающемуся ротору. В результате добавочная ЭДС  $E_d$  начинает опережать по фазе ЭДС  $E_2$  на угол  $\theta$ , что способ-

ствуется повышению  $\cos\varphi_1$  двигателя. При пуске двигателя в ход щетки раздвигают на наибольший угол  $2\alpha$  при встречном направлении ЭДС  $E_d$ , что соответствует минимальной частоте вращения. В этих условиях добавочная ЭДС ограничивает величину пускового тока, а пусковой момент сохраняет значительную величину.

Серьезным недостатком рассматриваемого двигателя является подача напряжения на щетки, что ограничивает допускаемую величину подводимого к двигателю напряжения, которое практически не может превышать 500 В.

Наличие в двигателе коллектора, контактных колец и двух обмоток на роторе снижает КПД двигателя, который даже в двигателях большой мощности не превышает 85%.

Трехфазные коллекторные двигатели применяются в электроприводах переменного тока при необходимости регулирования частоты вращения в широких пределах.

## Глава 7. ФАЗОКОМПЕНСАТОР

Фазокомпенсатор служит для повышения коэффициента мощности асинхронных двигателей с контактными кольцами. Фазокомпенсатор (ФК) имеет статор 1 без обмотки, который является только магнитопроводом машины, и ротор 2 с обмоткой и коллектором. На коллекторе 3 расположены три неподвижные щетки под углом  $120^\circ$  относительно друг друга (см. рис. 7.1). Подведенный от обмотки ротора асинхронного двигателя (АД) ток  $I_2$  (см. рис. 7.2) создает в ФК вращающийся магнитный поток  $\Phi_K$ , частота вращения которого зависит от частоты тока в роторе  $I_2$ . Посредством вспомогательного двигателя (ВД) ротор фазокомпенсатора вращают с частотой вращения  $n_K$  в направлении вращения потока  $\Phi_K$ . При этом в роторной обмотке ФК индуцируется ЭДС

$$E_K = 4,44(f_2 - f_K) w_K \Phi_K K_K,$$

где  $f_K = \frac{p_K n_K}{60}$  – частота вращения ротора фазокомпенсатора.

При  $f_k < f_2$  ЭДС  $E_k$  отстает по фазе от потока  $\Phi_k$  на  $90^\circ$ , а при  $f_k > f_2$  ЭДС  $E_k$  опережает  $\Phi_k$  на  $90^\circ$ . Если вспомогательный двигатель имеет такое же число полюсов, что и главный двигатель, то благодаря тому, что АД работает практически без нагрузки, частота вращения его ротора будет больше, чем у главного двигателя,  $n_k > n_2$ , а следовательно,  $f_k > f_2$ .

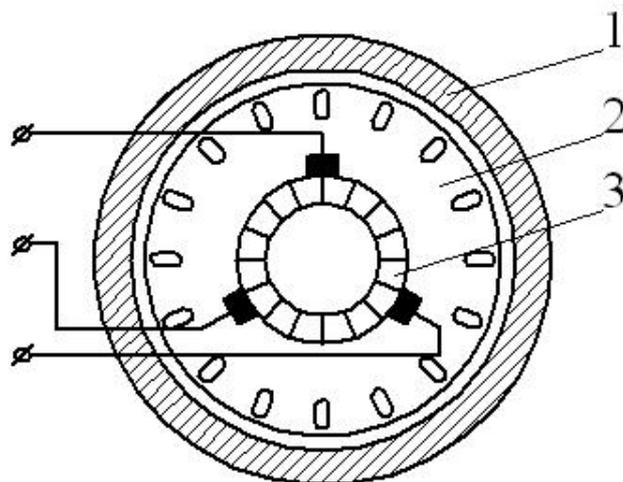


Рис. 7.1. Устройство фазокомпенсатора

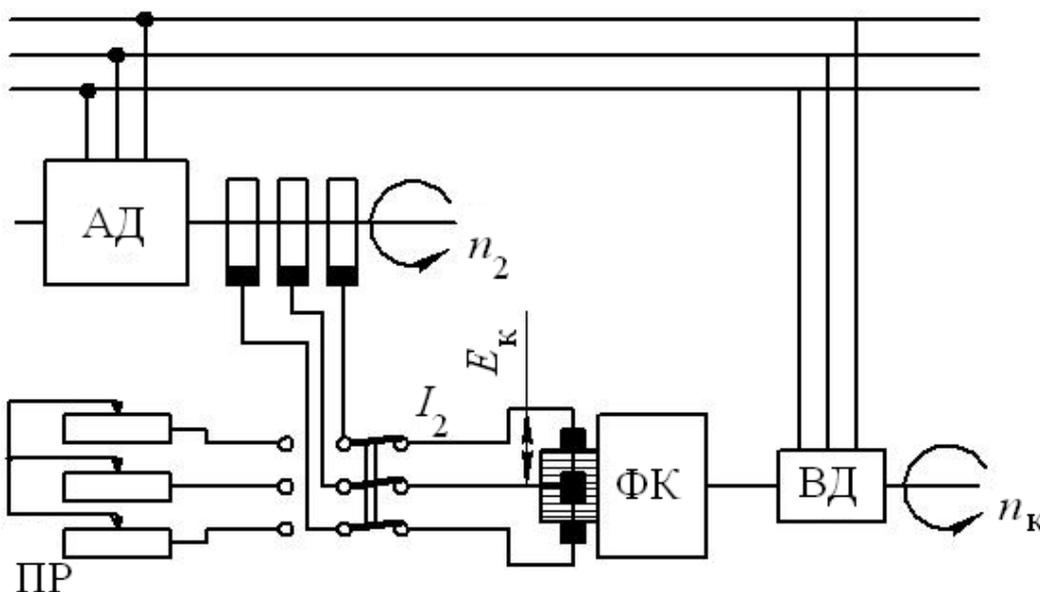


Рис. 7.2. Схема включения асинхронного двигателя с фазокомпенсатором

Таким образом, ЭДС компенсатора  $E_k$  опережает по фазе поток  $\Phi_k$  на угол  $90^\circ$ . Но так как поток  $\Phi_k$  создается током  $I_2$  и совпадает с ним по фазе, то ЭДС  $E_k$  является опережающей по отношению

к току ротора  $I_2$ . ЭДС  $E_K$  вводится в обмотку ротора асинхронного двигателя, т. е. является добавочной ЭДС в цепи ротора. Известно, что введение в цепь ротора асинхронного двигателя добавочной ЭДС, опережающей по фазе ток  $I_2$ , вызывает увеличение  $\cos\varphi_1$  двигателя. Фазокомпенсатор повышает  $\cos\varphi_1$  главного двигателя только при его нагрузке, так как при холостом ходе  $I_2 \approx 0$ , а частота вращения ротора асинхронного двигателя становится такой же, что и частота вращения компенсатора ( $n_2 \approx n_K$ ).

В результате частоты  $f_K$  и  $f_2$  оказываются одинаковыми, а ЭДС  $E_K = 0$ , т. е. компенсатор бездействует. На рис. 7.3 представлены кривые изменения  $\cos\varphi_1$  при работе асинхронного двигателя с фазокомпенсатором (кривая 1) и без него (кривая 2), из которых видно, что начиная с нагрузки 30% от номинальной  $\cos\varphi_1$  двигателя с компенсатором значительно повышается. При нагрузке свыше 60% от номинальной двигатель с фазокомпенсатором работает при  $\cos\varphi_1 = 1$ .

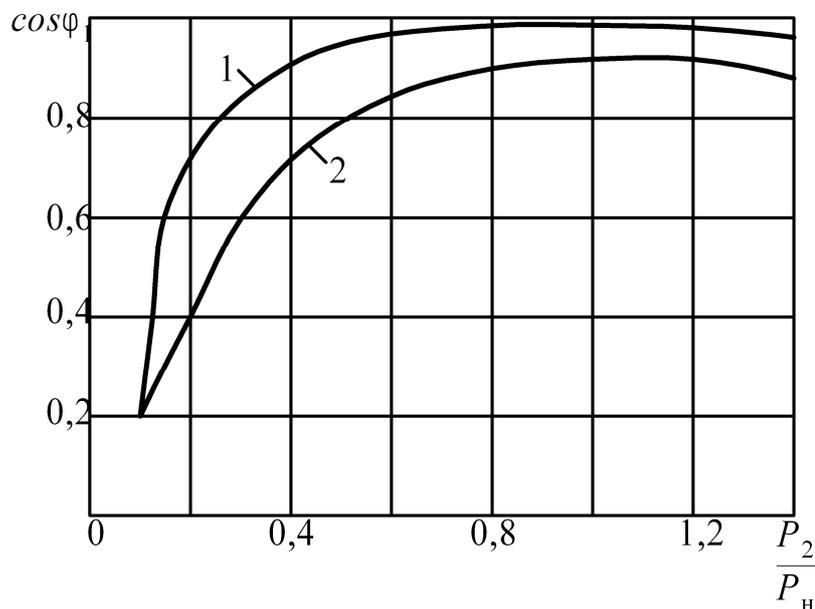


Рис. 7.3. Кривые  $\cos\varphi_1 = f(P_2)$  асинхронного двигателя с фазокомпенсатором

Следует отметить, что КПД асинхронного двигателя, работающего с фазокомпенсатором, при некоторых нагрузках может быть даже выше, чем у асинхронного двигателя без фазокомпенсатора. Что же

касается мощности вспомогательного двигателя, то ее активная составляющая чрезвычайно мала и определяется лишь величиной механических потерь в фазокомпенсаторе, так как он отдает в цепь ротора асинхронного двигателя чисто реактивную мощность.

## **Глава 8. СИНХРОННЫЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ (РЕАКТИВНЫЕ) ДВИГАТЕЛИ (СРД)**

Явнополюсная СМ при отсутствии возбуждения способна развивать в соответствии с угловой характеристикой добавочный электромагнитный момент и добавочную электромагнитную мощность. Не возбужденная явнополюсная СМ применяется в режиме синхронного параметрического реактивного двигателя, электромагнитный момент в котором возникает лишь при неравенстве его параметров, т.е.  $X_d \neq X_q$ .

Простота конструкции и высокая надежность, связанные с отсутствием скользящих контактов – главные преимущества СРД по сравнению с СД с электромагнитным возбуждением классического исполнения. Основным недостатком СРД является потребление из сети значительной реактивной мощности, что снижает энергетические показатели (КПД и  $\cos\varphi$ ). Электродвигатели этого типа применяются в схемах синхронной связи, звукозаписи, аппаратуре документальной связи, радиолокации и других устройствах.

При прочих равных условиях максимум мощности СРД будет при  $((X_d - X_q)/X_d X_q)_{\max}$ . Поэтому конструкцию ротора стремятся выполнить таким образом, чтобы получить максимальную степень явнополюсности  $k_{\text{яв.пол}} = X_d/X_q$ . Явнополюсный ротор обычной конструкции (см. рис. 8.1, а) для этой цели выполняют с  $\alpha = b_p/\tau \approx 0,5$ . Более высокую степень явнополюсности имеет слоистый ротор (см. рис. 8.1, б). Слои пластин электротехнической стали с высокой магнитной проницаемостью, ориентированные по продольной оси ротора, разделены слоями алюминия, образующими короткозамкнутую клетку, которая выполняет роль демпферной и пусковой обмотки.

Такая конструкция существенно увеличивает магнитное сопротивление для магнитного потока по поперечной оси, что приводит к снижению  $X_q$  и повышению степени явнополюсности. Для пуска СРД, так же как и для возбужденных СД, может применяться частотный и асинхронный способы пуска.

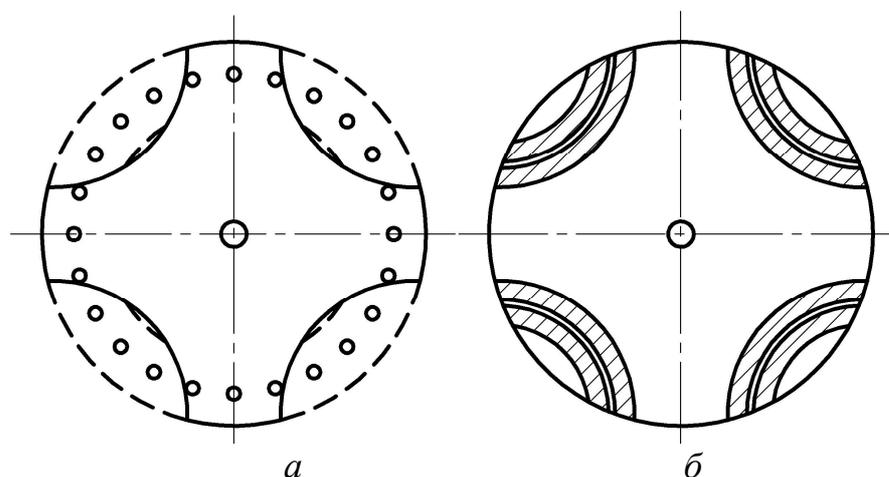


Рис. 8.1. Роторы реактивного синхронного двигателя:

*a* – традиционной конструкции; *б* – слоистой (с повышенным отношением  $X_d/X_q$ )

Рабочие статические характеристики  $(n, M, \cos\varphi, \eta)$  в функции полезной мощности  $P_2$  определяют свойства СРД в установившемся синхронном режиме и аналогичны рабочим характеристикам СД с возбуждением. Однако значения  $\cos\varphi$  и  $\eta$  для СРД значительно ниже, чем СД с возбуждением. Кривая  $\cos\varphi = f(P_2)$  монотонно возрастает, так как СРД является предельным случаем недовозбужденного СД ( $I_B = 0$ ), и при холостом ходе потребляемый ток является практически реактивным намагничивающим током. Активная составляющая тока лишь компенсирует потери холостого хода. При номинальной нагрузке  $\cos\varphi$  СРД тем больше, чем больше степень явнополюсности  $k_{\text{яв.пол.}}$ .

### 8.1. КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ РЕАКТИВНЫХ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ

Синхронными реактивными называют микродвигатели с переменным вдоль окружности воздушного зазора магнитным сопротивлением и невозбужденным ротором. Вращающееся магнитное поле

таких микродвигателей создается только МДС статора. Электромагнитный момент возникает в результате изменения энергии магнитного поля в зазоре при рассогласовании осей поля и ротора.

Изменение магнитного сопротивления вдоль окружности воздушного зазора двигателя осуществляют путем выбора соответствующей формы и материала ротора.

Ротаторы, схематически изображенные на рис. 8.2, *а* и *б*, отличаются от обычного короткозамкнутого ротора типа «беличьей клетки» асинхронного микродвигателя только наличием внешних открытых (явнополюсная конструкция, рис. 8.2, *а*) или внутренних (неявнополюсная конструкция, рис. 8.2, *б*) пазов, которые обеспечивают изменение магнитного сопротивления вдоль окружности. У ротора, показанного на рис. 8.2, *в*, такой же эффект получают за счет выполнения его из двух разнородных по магнитным свойствам материалов.

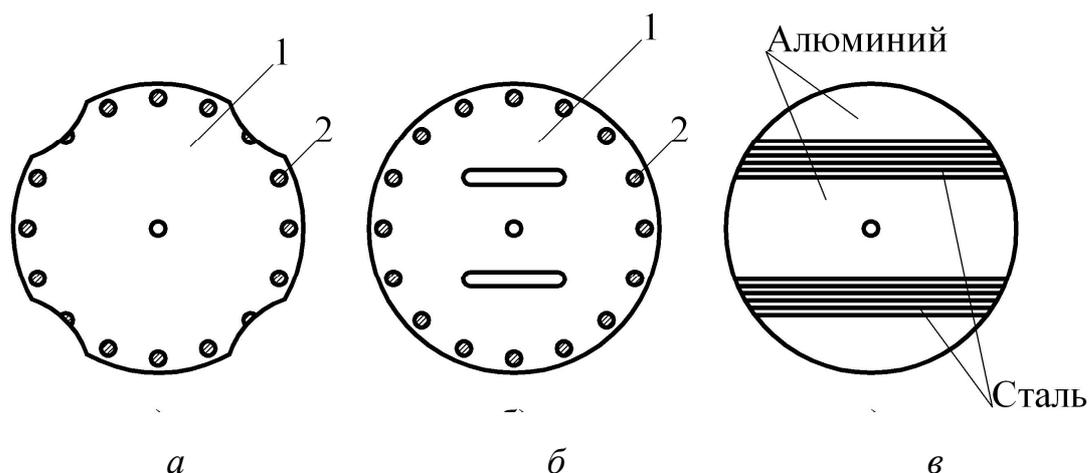


Рис. 8.2. Конструкции роторов синхронных реактивных микродвигателей:  
1 – сердечник из электротехнической стали; 2 – стержни короткозамкнутой обмотки

На рис. 8.3 представлен синхронный реактивный микродвигатель СД-09М с ротором, соответствующим рис. 8.2, *а*.

Принцип действия реактивного микродвигателя рассмотрим на статической модели рис. 8.4. Вращающееся поле статора заменим постоянным магнитом. Угол между осью МДС статора и продольной осью  $d$  ротора обозначим  $\gamma$ . Будем считать, что на модели направления МДС и потока статора  $\Phi_1$  совпадают.

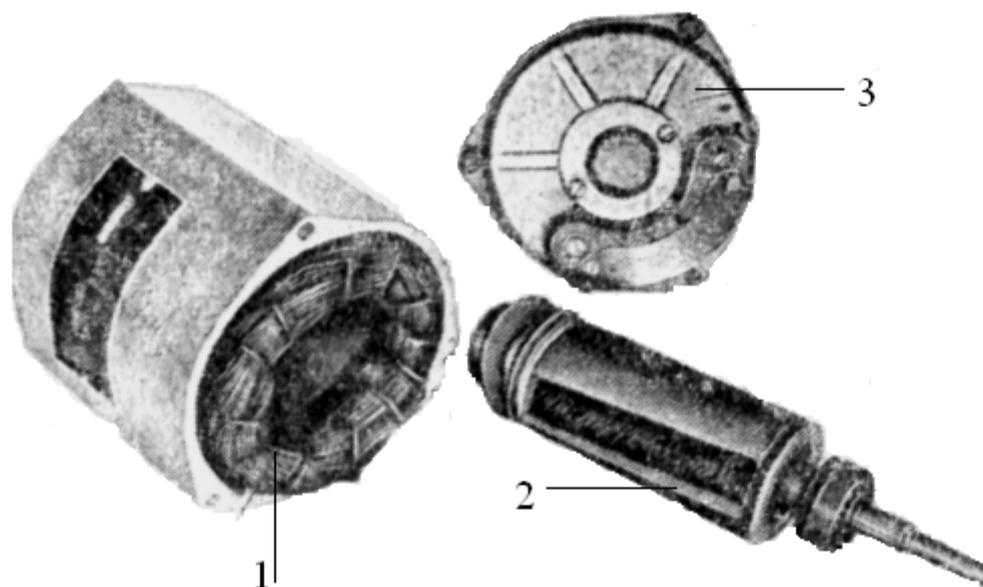


Рис. 8.3. Синхронный реактивный микродвигатель СД-09М:  
1 – статор с двухфазной обмоткой; 2 – ротор; 3 – подшипниковый щит

На рис. 8.4, *а* показано положение ротора в том случае, когда угол между осями ротора и потока статора, т. е. угол рассогласования  $\gamma = 0$ . Магнитные силовые линии проходят по пути наименьшего сопротивления и не деформируются.

Реактивный вращающий момент  $M_p = 0$ . Ротор занимает положение устойчивого равновесия. Если принудительно повернуть ротор на угол  $\gamma$  по часовой стрелке (см. рис. 8.4, *б*), то магнитные силовые линии изогнутся. Деформация магнитного поля вызовет вследствие упругих свойств силовых линий реактивный вращающий момент, стремящийся повернуть ротор против часовой стрелки. Очевидно, что ротор установится под таким углом  $\gamma$  к оси потока статора, при котором внешний момент уравнивается реактивным моментом двигателя.

При устранении внешнего момента ротор снова вернется в положение устойчивого равновесия, при котором  $\gamma = 0$ . При повороте ротора на  $90^\circ$  (см. рис. 8.4, *в*) силовые линии поля будут вновь проходить прямолинейно, не изгибаясь, но магнитное сопротивление в этом случае больше, чем при  $\gamma = 0$ . Реактивный момент  $M_p = 0$ , т. е. ротор находится в равновесии.

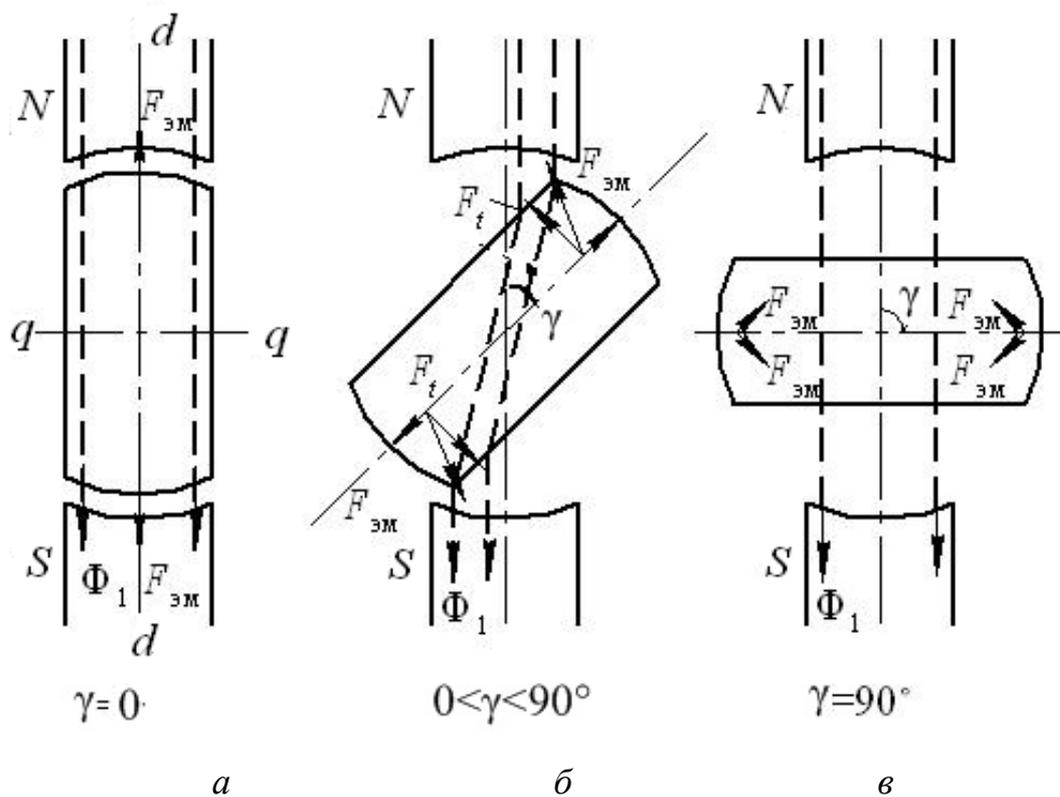


Рис. 8.4. Принцип действия реактивного микродвигателя

Между положениями равновесия при  $\gamma = 0$  и  $\gamma = 90^\circ$  имеется существенное различие. В первом случае равновесие устойчиво, так как при всяком отклонении от него ротор стремится вернуться в первоначальное положение, а во втором случае равновесие неустойчиво и достаточно малейшего возмущения, чтобы ротор вернулся в устойчивое положение максимальной магнитной проводимости, показанное на рис. 8.4, а или отличающееся от него на  $180^\circ$ .

Таким образом, реактивный момент всегда стремится установить ротор в положение минимального магнитного сопротивления на пути потока двигателя. Положение устойчивого равновесия ротора будет при  $\gamma = 0$ , или  $\gamma = 180^\circ$  и неустойчивого – при  $\gamma = 90$  или  $270^\circ$  (электрических).

В реальных синхронных реактивных микродвигателях обмотки статора 1 создают магнитное поле, вращающееся в пространстве с постоянной или переменной скоростью, а ротор 2 увлекается реактивным моментом вслед за полем и вращается со скоростью поля (рис. 8.5).

Аналитические выражения реактивного момента через угол  $\gamma$  весьма громоздки. Поэтому при расчетах используют угол  $\theta_u$  между пространственной волной напряжения статора и поперечной осью  $q$  ротора, величина которого тоже зависит от момента нагрузки.

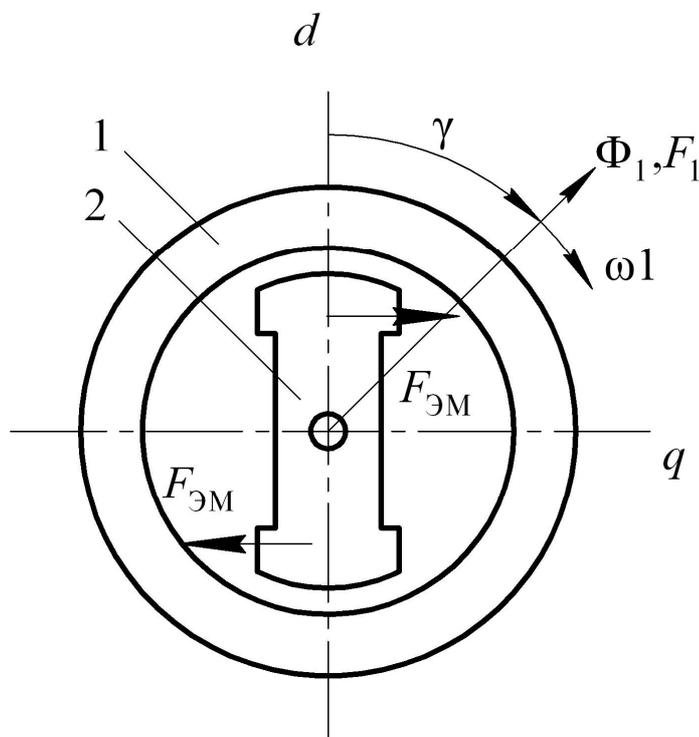


Рис. 8.5. Модель синхронного реактивного микродвигателя

Вид угловой характеристики реактивного двигателя определяется законом изменения магнитного сопротивления вдоль окружности статора. Момент, соответствующий основной (второй) гармонике переменной составляющей магнитного сопротивления, без учета активного сопротивления обмотки статора находят по формуле, известной из общей теории явнополюсных электрических машин

$$M_p = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta_u,$$

где  $X_d$  и  $X_q$  — синхронные индуктивные сопротивления соответственно по продольной и поперечной осям.

Реактивный вращающий момент  $M_p$  в отличие от активного изменяется в функции угла по закону  $\sin 2\theta_u$  (сплошная линия на рис. 8.6). Установившийся режим в микродвигателе наступает при определен-

ном угле  $\theta_u$ , обеспечивающем равенство  $M_p = M_{CT}$ , где  $M_{CT}$  – статический момент сопротивления на валу двигателя.

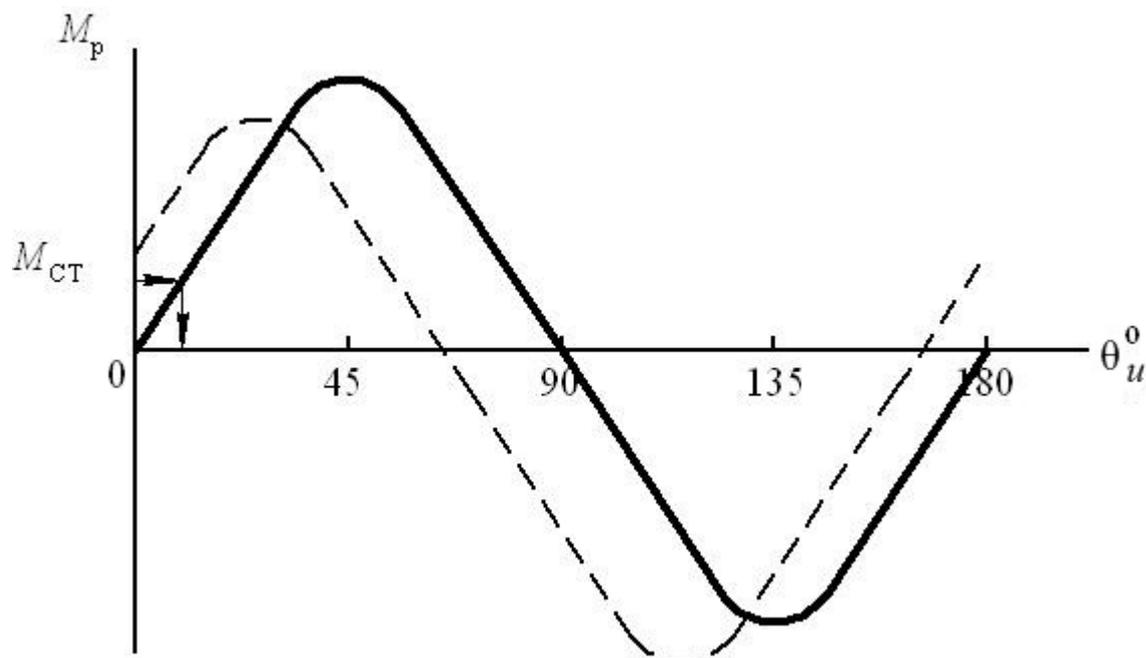


Рис. 8.6. Угловая характеристика синхронного реактивного микродвигателя

У реальных синхронных микродвигателей активное сопротивление обмотки статора  $R_1$  относительно велико и соизмеримо с  $X_d$  и  $X_q$ . Поэтому для расчета реактивного момента нужно пользоваться уточненными формулами.

Максимум момента смещается с  $45^\circ$  в сторону меньших углов  $\theta_u = (30-40^\circ)$  (пунктирная линия на рис. 8.6).

Угловые характеристики не синусоидальны, но при углах  $\gamma = 0, 90, 180$  и  $270^\circ$  момент  $M_p = 0$ . При неравенстве частот вращения ротора и поля угол  $\theta_u$  становится периодической функцией времени и среднее значение реактивного момента равно нулю. Поэтому у синхронных реактивных микродвигателей применяют асинхронный метод пуска. В качестве пусковой служит либо обмотка типа «белчьей клетки» (см. рис. 8.2, *a* и *б*), либо алюминиевые части ротора (см. рис. 8.2, *в*). В двигателях с ротором, изображенным на рис. 8.2, *б*, сохранение полного комплекта стержней обмотки приводит к улучшению пусковых свойств, в частности к повышению момента входа в синхронизм.

У реактивных микродвигателей в процессе пуска вследствие изменения магнитного сопротивления появляется переменная составляющая магнитного потока, наводящая добавочную ЭДС в обмотке статора. Как у двигателей с постоянными магнитами, создается тормозной момент  $M_T$ . Однако влияние этого момента на пусковые свойства реактивного микродвигателя обычно значительно слабее, так как ротор невозбужденный.

Синхронные реактивные микродвигатели имеют невысокие энергетические показатели. Причиной низкого значения коэффициента мощности  $\cos\varphi$  является то, что магнитный поток реактивного микродвигателя создается исключительно намагничивающим током статора, который имеет индуктивный характер. Увеличению намагничивающего тока способствует повышенное сопротивление магнитной цепи из-за наличия впадин на роторе. Соответственно низок и КПД реактивных двигателей за счет значительных электрических потерь мощности в обмотках статора.

Таким образом, усиление неравенства магнитных и индуктивных сопротивлений по осям  $d$  и  $q$  способствует увеличению момента  $M_p$ , но ухудшает энергетические характеристики двигателя. Практически у синхронных реактивных микродвигателей отношение ширины полюсной дуги ротора к полюсному делению выполняют примерно равным 0,5-0,6, а максимального воздушного зазора к минимальному – 10-12.

## **Глава 9. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ (СД) С ПОНИЖЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ**

Существует проблема получения низких частот вращения ротора у синхронных микродвигателей стандартной частоты без применения промежуточных механических редукторов. Синхронные микродвигатели классического типа при стандартной частоте напряжения питания 50, 400 и 1000 Гц развивают частоту вращения ротора порядка 1 тыс. об/мин и более. В автоматических системах и приборах частота

вращения часто требуется только в несколько единиц или десятков оборотов в минуту. Применение для снижения частоты вращения механических редукторов со значительным передаточным отношением усложняет систему привода, снижает общую надежность, повышает уровень звуковых шумов, габариты и вес. Кроме того, при работе в ряде устройств, например в условиях вакуума или высоких температур, надежность микродвигателей, имеющих быстровращающиеся подшипники, резко падает. В синхронных микродвигателях, рассматриваемых в настоящей главе, частота вращения ротора не равна, а меньше частоты вращения поля статора в определенное число раз. При этом соотношение частот вращения в синхронном режиме не зависит от внешних факторов (момента нагрузки, напряжения и т. д.). Такое редуцирование частоты вращения достигается либо за счет внутренних возможностей синхронных машин (редукторные двигатели, двигатели с катящимся ротором), либо в результате выполнения синхронного микродвигателя в виде гармоничной комбинации электрической машины и редуктора (волновые двигатели).

Синхронные микродвигатели с пониженной частотой вращения ротора по системе возбуждения бывают в основном двух типов:

- индукторные* – с подмагничиванием ротора со стороны статора постоянным магнитным потоком;
- реактивные* – с невозбужденным ротором.

### 9.1. РЕДУКТОРНЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ

В синхронных редукторных микродвигателях осуществляется электромагнитное редуцирование частоты вращения ротора по отношению к частоте вращения первой гармоники поля статора. Это достигается путем использования в качестве рабочих не первой, а высших, зубцовых гармоник магнитного поля, которые усиливаются за счет определенной конфигурации поверхностей статора и ротора. Как известно, число полюсов поля высшей пространственной гармо-

ники прямопропорционально, а частота вращения обратнопропорциональна ее порядку. Машины такого типа называют редукторными.

Особенность конструкции и принципа действия синхронных редукторных микродвигателей наиболее удобно рассмотреть на примере машины реактивного типа (см. рис. 9.1). Ротор 1 и статор 2 набирают из листов электротехнической стали. Статор выполняется в виде кольца и имеет полукруглые пазы на внутренней поверхности; ротор – в виде диска и имеет такие же пазы на внешней поверхности. Числа зубцов статора  $Z_C$  и ротора  $Z_P$  различны; причем обычно  $Z_P > Z_C$ . На статоре укладывается обмотка, предназначенная для питания от трехфазной или однофазной сети и создающая вращающееся магнитное поле  $\Phi_C$ .

Природа возникновения вращающегося момента в реактивных двигателях известна. Если в определенный момент времени поток  $\Phi_C$  занимает положение А, то реактивный вращающий момент заставит повернуться ротор в положение наибольшей магнитной проводимости, т. е. против статорных зубцов 1 и 4 будут находиться роторные зубцы 1' и 5'. При перемещении потока  $\Phi_C$  в положение Б, т. е. на угол  $360^\circ/Z_C$ , ротор под действием реактивного момента повернется на такой угол, чтобы магнитная проводимость снова стала наибольшей. Это наступит тогда, когда против зубцов статора 2 и 5 встанут зубцы ротора 2' и 6', т. е. ротор повернется на угол  $\frac{360^\circ}{Z_C} - \frac{360^\circ}{Z_P}$ .

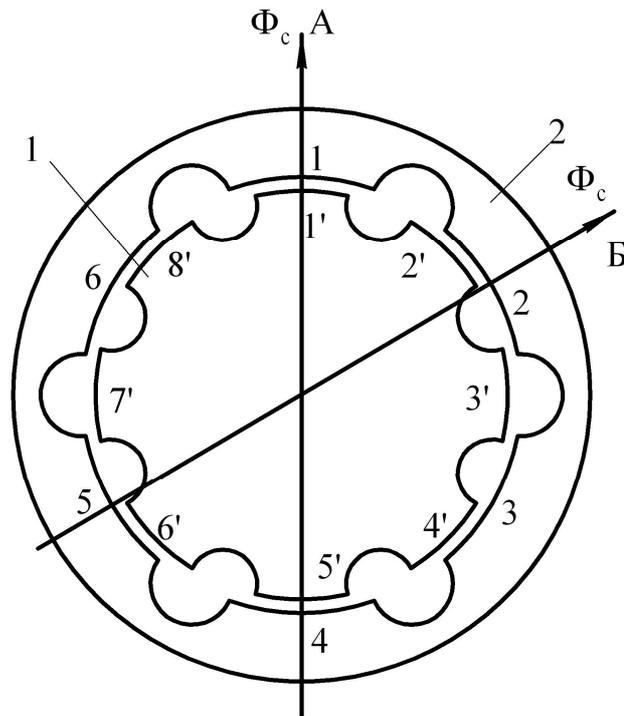


Рис. 9.1. Схема конструкции синхронного реактивного редукторного микродвигателя

Следовательно, угловая частота вращения ротора  $\omega_2$  меньше уг-

ловой частоты вращения поля статора  $\omega_1$  в  $\frac{360^\circ}{\frac{Z_C}{360^\circ} - \frac{360^\circ}{Z_P}} = \frac{Z_P}{Z_P - Z_C}$  раз.

Это значит, что

$$\omega_2 = \frac{Z_P - Z_C}{Z_P} \omega_1,$$

где  $\omega_1 = 2\pi \frac{f}{p_C}$ ;

$f$  – частота напряжения сети;

$p_C$  – число пар полюсов обмотки статора.

Для двигателя, изображенного на рис. 9.1,

$$\omega_2 = \frac{8 - 6}{8} \omega_1 = \frac{1}{4} \omega_1.$$

Если выбрать  $Z_P = 100$  и  $Z_C = 98$ , то

$$\omega_2 = \frac{1}{50} \omega_1.$$

Следует иметь в виду, что число зубцов, которое можно разместить на окружности определенного диаметра, ограничено минимальной по технологическим соображениям толщиной зубца.

Из уравнения видно, что чем меньше разность чисел зубцов  $Z_p - Z_c$ , тем меньше при данном  $Z_p$  частота вращения ротора. Наибольшее редуцирование скорости происходит при  $Z_p - Z_c = 1$ , но в этом случае точно друг против друга могут находиться только по одному зубцу статора и ротора, что приводит к уменьшению магнитной проводимости зазора и ухудшению использования двигателя. Поэтому для получения возможно меньшего магнитного сопротивления разность  $Z_p - Z_c$  выбирают обязательно четной и равной  $2p_c k$ , где  $k = 1, 2, 3, \dots$ .

Реактивные редукторные микродвигатели, являясь простыми по конструкции, имеют в то же время недостатки, характерные для всех синхронных реактивных микродвигателей по сравнению с активными: малый вращающий момент, низкие энергетические и весовые показатели. Эти показатели существенно выше у редукторного микродвигателя индукторного типа (см. рис. 9.2), у которого конструкция статора и ротора в основном такая же, как у реактивного редукторного микродвигателя. Однако в торце двигателя на статоре расположен кольцевой постоянный магнит с осевой намагниченностью.

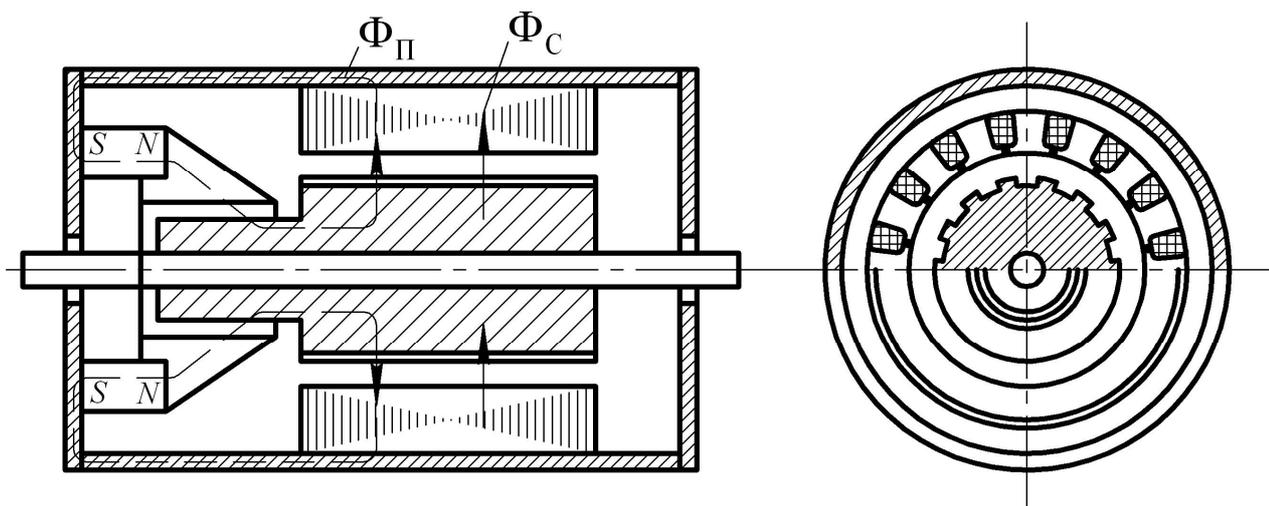


Рис. 9.2. Схема конструкции синхронного редукторного микродвигателя индукторного типа

Постоянный магнитный поток подмагничивания  $\Phi_{\text{П}}$  замыкается по ротору в осевом направлении, а в воздушном зазоре между статором и ротором – в радиальном. Этот поток униполярный, т. е. имеет одно направление по всей окружности ротора, но величина индукции  $B_{\text{П}}$  в различных точках зазора разная и зависит от магнитного сопротивления. На рис. 9.3 показано, как влияет на величину индукции зубчатость хотя бы одной из поверхностей (статора или ротора). Результатом влияния являются высшие гармоники поля ротора, которые во взаимодействии с высшими гармониками вращающегося поля статора  $\Phi_{\text{С}}$  создают вращающий момент при пониженной (относительно  $\omega_1$ ) частоте вращения ротора.

Синхронные редукторные двигатели индукторного типа имеют хорошие рабочие характеристики при четной и нечетной разности чисел зубцов статора и ротора, т. е. можно выбирать  $Z_{\text{Р}} - Z_{\text{С}} = p_{\text{СК}}k$ , где  $k = 1, 2, 3$ . Это означает, что при одинаковом с реактивными числе зубцов и соответственно диаметре ротора они могут обеспечить вдвое больший коэффициент редуцирования скорости. КПД таких микродвигателей ниже, чем у синхронных двигателей без редуцирования скорости, что естественно при работе не на основной, а на высших гармониках поля.

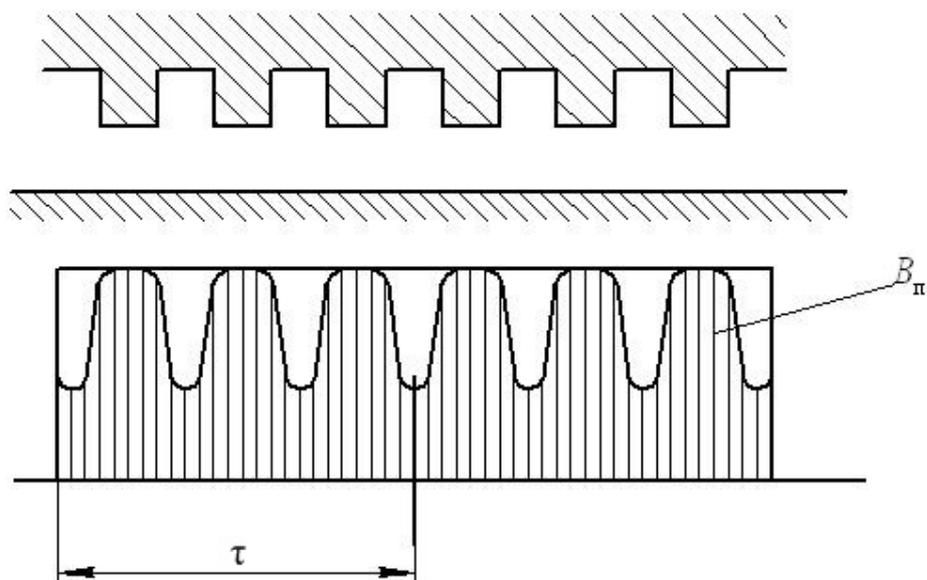


Рис. 9.3. Влияние зубчатости поверхности статора или ротора на величину индукции

Амплитуда угловых качаний роторов редукторных микродвигателей несколько меньше, чем у синхронных микродвигателей непрерывного вращения, так как они являются как бы многополюсными за счет работы на высших пространственных гармониках. При частоте вращения ротора 100-200 об/мин она составляет 1-5 угл. минут. Однако сильный состав высших гармоник приводит одновременно к тому, что раскачивание ротора происходит с высокой частотой. Уменьшается отношение периода качаний к времени одного оборота, что приводит к повышению неустойчивости  $N$  мгновенной скорости вращения ротора. У реактивных редукторных микродвигателей неустойчивость достигает  $N = (40-80) \cdot 10^{-3}$ .

## 9.2. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С КАТЯЩИМСЯ РОТОРОМ (ДКР)

Синхронные ДКР имеют частоту вращения в соответствии с соотношением  $n = k_p n_1$ , где  $n_1$  – синхронная частота вращения поля,  $k_p$  – коэффициент редукции частоты вращения.

При достаточно высокой частоте питающей сети  $f$  и малом значении коэффициента  $k_p$  представляется возможным получать низкие частоты вращения вала без применения внешних механических ре-

дукторов. В этом смысле ДКР выполняет функцию редукторного двигателя и обладает рядом преимуществ: хорошие пусковые свойства, высокое быстродействие при включении и реверсе, самоторможение и др. Синхронные ДКР могут использоваться как реактивные и шаговые двигатели.

На рис. 9.4 представлена конструктивная схема синхронного ДКР с катушками осевого униполярного подмагничивания. В пазах статора 1 располагается двухполюсная  $m$ -фазная распределенная обмотка 2, питающаяся от сети переменного тока. По торцам пакета статора расположены две тороидальные катушки 3, обтекаемые постоянным током и создающие осевой униполярный магнитный поток. Магнитопровод поперечного униполярного потока состоит из двух шихтованных пакетов 6, расположенных на торцах статора, двух шихтованных пакетов 5, расположенных на сердечнике ротора, и корпуса магнитопровода 7. Ротор 8 представляет собой пакет, набранный из листов электротехнической стали и насаженный на сердечник 4 из магнитомягкого материала, и не имеет обмоток. В отличие от обычных электрических машин ротор ДКР расположен эксцентрически относительно расточки статора, т.е. оси ротора и расточки статора не совпадают.

При включении обмотки униполярного подмагничивания (катушек 3) на постоянное напряжение вследствие эксцентриситета возникает сила одностороннего магнитного притяжения, направленная в сторону минимального воздушного зазора, которая прижимает ротор к статору. При включении  $m$ -фазной обмотки статора в  $m$ -фазную сеть переменного тока происходит сложение магнитных полей и возникает результирующая сила одностороннего магнитного притяжения, вектор которой будет вращаться синхронно с магнитным полем статорной  $m$ -фазной обмотки переменного тока.



ра, некоторый угол. Этот вектор может быть разложен на две составляющие:  $F_x$  и  $F_y$ . Сила  $F_x$  определяет электромагнитное давление на опору, а сила  $F_y$  создает электромагнитный вращающий момент относительно оси, перпендикулярной плоскости рисунка и проходящей через место соприкосновения статора и ротора. Точка  $A$  на плоскости является мгновенным центром вращения, который перемещается синхронно с полем.

При обкатывании ротором внутренней поверхности статора электромагнитный вращающий момент на валу двигателя определяется как  $M_2 = 0,5 F_y D_2$ .

Поскольку ось симметрии ротора вращается вокруг оси статора синхронно с полем, электромагнитный момент относительно оси статора численно равен электромагнитному моменту на расточке

$$M_1 = F_y \varepsilon = \frac{dW_\delta}{d\theta},$$

где  $W_\delta$ , – энергия магнитного поля воздушного зазора;

$\theta$  – угол между осью  $x$  и осью МДС обмотки переменного тока статора.

Ось  $x$ , жестко связанную с синхронной скоростью вращающейся точкой соприкосновения поверхностей ротора и статора  $A$ , можно рассматривать как продольную ось  $d$ , а ось  $y$  – как поперечную ось  $q$ . При этом угол  $\theta$  можно рассматривать как угол между осью поля ротора, создаваемого униполярным подмагничивающим потоком, и осью поля статора, создаваемого МДС  $m$ -фазной статорной обмотки.

Таким образом, угол  $\theta$  ДКР является аналогом рабочего угла синхронной машины, если униполярный поток ДКР считать аналогом основного потока возбуждения  $\Phi_0$  синхронной машины. Электромагнитный момент ДКР, действующий внутри статора, аналогичен электромагнитному моменту возбужденной неявнополюсной синхронной машины.

Момент на валу многократно возрастает по сравнению с электромагнитным моментом на статоре и зависит от коэффициента редукции:

$$M_2 = M_{\text{эм}} \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{M_{\text{э}}}{k_p}.$$

Обычно конструкция ДКР выполняется таким образом, что ротор не имеет непосредственного соприкосновения с внутренней поверхностью статора. Между активными частями двигателя предусматривается минимальный зазор  $\delta$ . Обкатывание происходит по специальным направляющим посредством катков, жестко связанных с ротором. Эксцентрическое вращение ротора ДКР обуславливает появление центробежной силы и нежелательных вибраций. Поэтому для уменьшения вибраций применяют различные виды эластичной подвески статора.

Выполняться ДКР может не только с электромагнитным возбуждением от униполярного подмагничивающего потока, но и с возбуждением от постоянных магнитов. ДКР относятся к тихоходным исполнительным двигателям, для которых особенно важны пусковые режимы. Они обладают значительно лучшими пусковыми свойствами по сравнению с обычными СД. В большинстве случаев ДКР не требуют специальных пусковых устройств или частотного пуска. Как правило, ДКР пускаются при номинальной частоте питающей сети. Главным образом это связано с малыми значениями момента инерции ротора и момента сопротивления, приведенными к оси статора. Ротор ДКР с униполярным подмагничиванием при отключении напряжения статора практически не имеет выбега и четко фиксируется в определенном положении за счет потока униполярного подмагничивания.

Рассмотрим реальный микродвигатель с катящимся ротором, в котором редуцирование скорости вращения ротора по отношению к скорости магнитного поля объясняется тем, что ротор располагается эксцентрически в расточке статора и имеет возможность катиться вдоль окружности статора. При этом основной электромагнитный вращающий момент создается за счет сил одностороннего магнитного притяжения ротора к статору несимметричным вращающимся магнитным полем.

Конструкция реальных микродвигателей с катящимся ротором в значительной мере определяется методом получения несимметрич-

ного вращающегося поля, устройством поверхностей обкатывания и механизма передачи несоосного вращения ротора.

На рис. 9.5 изображена схема конструкции микродвигателя с катящимся ротором индукторного типа. В корпусе 1 закреплены сердечник статора 2, постоянные магниты 4 и направляющие статора 9. Статор не отличается по конструкции от статора классической синхронной машины, и его обмотки 3 предназначены для создания симметричного вращающегося потока  $\Phi_c$ . Постоянные магниты имеют радиальную намагниченность и создают униполярный поток подмагничивания  $\Phi_p$ . Иногда для этой цели используют обмотку с постоянным током. Направляющие статора имеют гладкую или зубчатую поверхность.

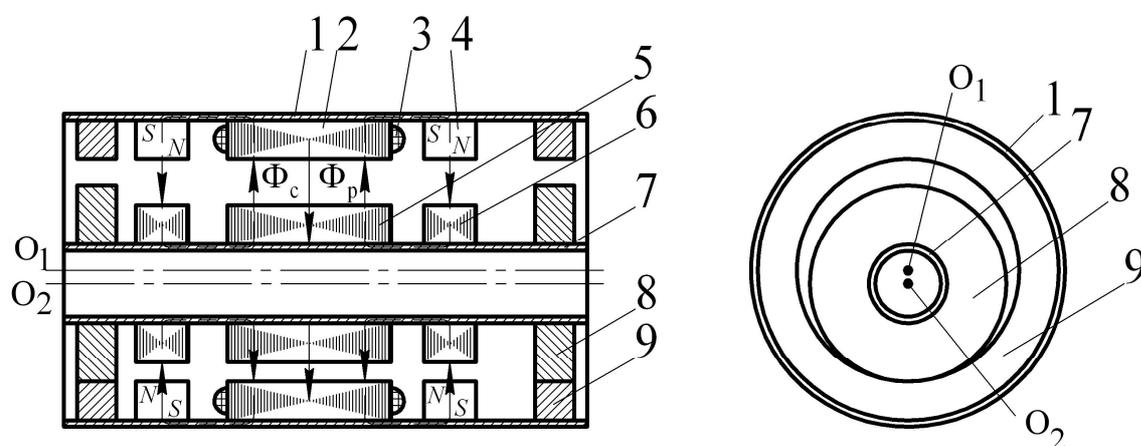


Рис. 9.5. Схема конструкции синхронного микродвигателя с катящимся ротором индукторного типа

Ротор двигателя монтируют на полый втулке 7, которая одновременно служит магнитопроводом для потока подмагничивания. Основной сердечник 5 ротора собирается из листовой электротехнической стали и не имеет обмоток. Кольцевые сердечники (тороиды) 6, набранные из листовой электротехнической стали, уменьшают магнитное сопротивление на пути потока подмагничивания. Катки 8 ротора имеют гладкую или зубчатую поверхность. Их наружный диаметр несколько больше диаметра ротора, что предохраняет поверхности ротора и статора от непосредственного соприкосновения и износа. Внутри полый втулки размещают кинематический механизм передачи несоосного вращения ротора типа Сешерона, Альстома или Кардана.

Когда катки опираются на направляющие, оси статора  $O_1$  и ротора  $O_2$  не совпадают, т. е. имеет место эксцентриситет.

В воздушном зазоре между статором и ротором происходит наложение униполярного потока подмагничивания  $\Phi_{\Pi}$  на вращающийся поток  $\Phi_C$ , распределенный вдоль окружности по закону, близкому к синусоидальному (см. рис. 9.6).

Результирующее вращающееся поле в зазоре  $\Phi_{\delta}$  становится несимметричным.

Электромагнитную силу притяжения, действующую на элемент поверхности ротора, определим по соотношению Максвелла

$$F_{\text{ЭМ}} = \frac{B_{\Pi}^2}{2\mu_0},$$

где  $B_{\Pi}$  – нормальная к поверхности ротора составляющая вектора магнитной индукции;

$\mu_0$  – магнитная проницаемость воздушного зазора.

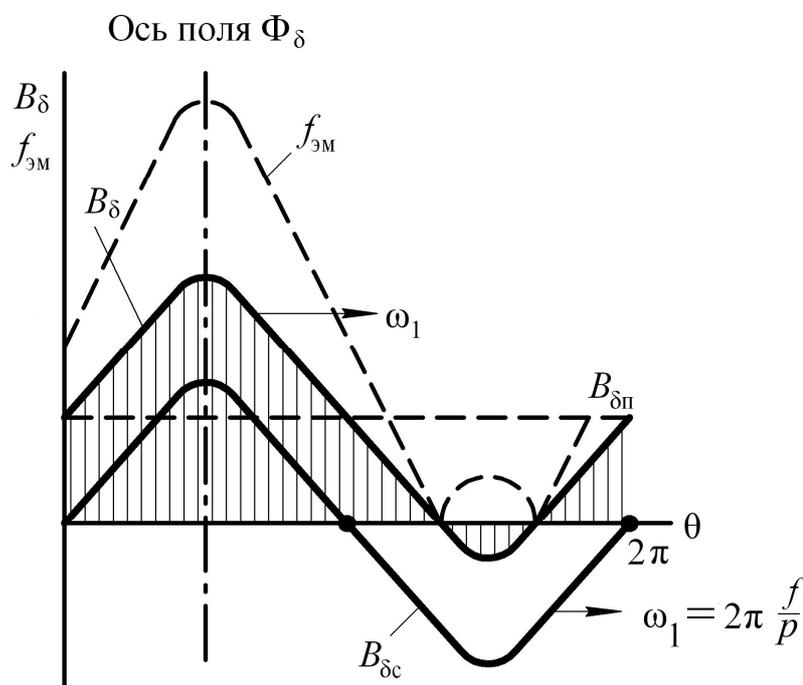


Рис. 9.6. Распределение индукции вдоль окружности воздушного зазора для поля статора  $B_{\delta C}$ , подмагничивания  $B_{\delta \Pi}$  и результирующего  $B_{\delta}$

Следовательно, результирующая сила магнитного притяжения ротора к статору направлена вдоль максимума волны индукции  $B_{\delta}$ , т. е. по оси результирующего вращающегося поля  $\Phi_{\delta}$ .

Принцип действия синхронного микродвигателя с катящимся ротором можно рассмотреть на модели, изображенной на рис. 9.7. В расточке статора, имеющей диаметр  $D_1$  эксцентрически расположен ферромагнитный ротор с наружным диаметром  $D_2$ . При качественном анализе на модели принимаем, что оси МДС статора  $F_C$ , потока статора  $\Phi_C$  и результирующего потока  $\Phi_\delta$  совпадают. Координатную ось, проходящую через центр статора  $O_1$  и точку минимального зазора, считаем продольной  $d$ , а перпендикулярную ей – поперечной  $q$ .

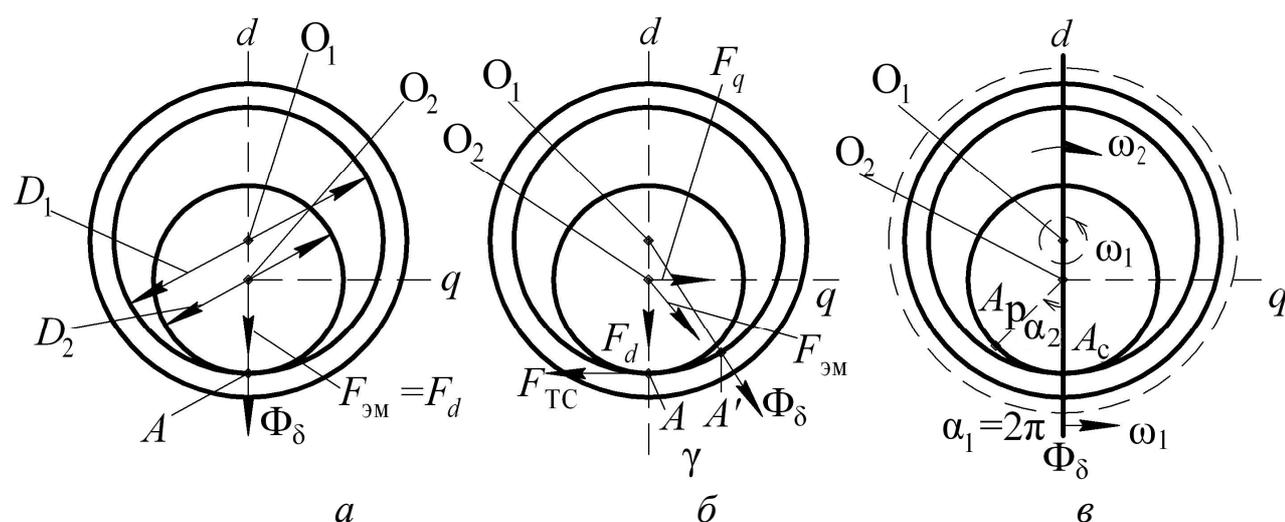


Рис. 9.7. Принцип действия синхронного микродвигателя с катящимся ротором

В исходном положении (см. рис. 9.7, *a*) ось потока  $\Phi_\delta$  проходит через точку  $A$  соприкосновения статора и ротора. Сила  $F_{ЭМ}$  притяжения ротора к статору направлена по оси  $d$ , составляющая по оси  $q$  равна нулю, и ротор находится в положении устойчивого равновесия.

При смещении потока  $\Phi_\delta$  (см. рис. 9.7, *б*) относительно точки соприкосновения  $A$  появляется составляющая силы притяжения по оси  $q$ . Сила  $F_q$  создает относительно точки  $A$ , как относительно мгновенного центра вращения, электромагнитный вращающий момент

$$M_{ЭМ2} = 0,5 F_q D_2.$$

Под действием момента  $M_{ЭМ2}$  ротор перекачивается по поверхности статора до тех пор, пока точка соприкосновения ротора и статора переместится в  $A'$  и центр ротора  $O_2$  окажется на оси потока  $\Phi_\delta$ .

Если поле совершит полный оборот  $\alpha_1 = 2\pi$  (см. рис. 9.7, в), то за счет разности длин окружностей катания статора и ротора ( $\pi D_1 - \pi D_2$ ) в исходную точку  $A_C$  на поверхности статора придет точка ротора, смещенная по полю относительно исходной  $A_P$  на величину этой разности. Значит, ротор повернется вокруг своего центра  $O_2$  против направления вращения поля на угол

$$\alpha_2 = 2\pi \frac{D_1 - D_2}{D_2} = \alpha_1 \frac{D_1 - D_2}{D_2}.$$

При непрерывном вращении поля с синхронной скоростью  $\omega_1$  в двигателе синхронно с полем в сторону поля вращаются точка соприкосновения ротора со статором и центр ротора  $O_2$  относительно центра статора  $O_1$ . Ротор вращается вокруг своей оси  $O_2$  против поля с частотой  $\omega_2 = \omega_1 \frac{D_1 - D_2}{D_2}$ , которая является выходной частотой вращения двигателя. Если диаметры статора и ротора выбраны близкими по величине, то  $\frac{D_1 - D_2}{D_2} \ll 1$  и  $\omega_2 \ll \omega_1$ , т. е. в двигателе осуществляется значительное редуцирование частоты вращения. У современных микродвигателей коэффициент редуцирования достигает 1500.

Как указывалось выше, в реальном двигателе происходит обкатывание не ротора по статору, а катков ротора по направляющим статора. Поэтому выражение принимает вид

$$\omega_2 = \omega_1 \frac{D_H - D_K}{D_K},$$

где  $D_H$  и  $D_K$  – диаметры окружностей катания направляющих и катков.

Для определения вращающего момента на выходном валу двигателя необходимо найти силу

$$F_q = \int_0^{2\pi} f_q ds,$$

где  $f_q$  – проекция силы  $f_{ЭМ}$  на ось  $q$ ;

$ds$  – элемент активной поверхности ротора.

В общем виде для рассматриваемой конструкции двигателя формула вращающего момента может быть записана следующим образом:

$$M_{\text{ЭМ2}} = k_{\varepsilon} \Phi_{\text{П}} \Phi_{\text{С}} \sin \gamma ,$$

где  $k_{\varepsilon}$  – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров и величины эксцентриситета (при отсутствии эксцентриситета  $k_{\varepsilon} = 0$ );

$\gamma$  – угол между осью потока  $\Phi_{\text{С}}$  и продольной осью ротора  $d$ .

Как видно, момент  $M_{\text{ЭМ2}} = 0$  при отсутствии потока подмагничивания  $\Phi_{\text{П}}$  (вращающееся поле симметричное) или эксцентриситета ротора и статора.

У синхронных микродвигателей с катящимся ротором другой конструкции электромагнитный момент может иметь, кроме активной, реактивную составляющую, изменяющуюся по закону  $\sin 2\gamma$ .

Как у всех синхронных микродвигателей, при увеличении момента сопротивления  $M_{\text{СТ}}$  ротор продолжает вращаться с прежней частотой, но точка соприкосновения отстает от оси поля на больший угол. Если момент  $M_{\text{СТ}}$  превысит максимум  $M_{\text{ЭМ2}}$ , то ротор выходит из синхронизма.

У микродвигателей с катящимся ротором, имеющих гладкие катки и направляющие, возможен еще один случай выхода из синхронизма. Соотношение скоростей справедливо при качении без проскальзывания. Если поверхности направляющих и катков зубчатые, то проскальзывание невозможно. При гладкой поверхности проскальзывание отсутствует в случае, если  $F_q \leq F_{\text{ТС}}$ , где  $F_{\text{ТС}}$  – сила трения скольжения в точке соприкосновения (см. рис. 9.7, б).

Значит, если момент сопротивления  $M_{\text{СТ}}$  достигает такой величины, что для создания вращающего момента  $M_{\text{ЭМ2}} = M_{\text{СТ}}$  требуется сила  $F_q$ , большая чем  $F_{\text{ТС}}$ , то начинается проскальзывание катков по направляющим и двигатель переходит в асинхронный режим:

$$\omega_2 < \omega_1 \frac{D_{\text{Н}} - D_{\text{К}}}{D_{\text{К}}} .$$

Микродвигатели с катящимся ротором имеют хорошие динамические характеристики. При частоте  $f = 50$  Гц время пуска составляет порядка 0,01 с, а время реверса – (0,015-0,025) с, так как электро-механическая постоянная времени двигателя, пропорциональная мо-

менту инерции вращающихся частей и их скорости, весьма мала. Объясняется это тем, что ротор вращается относительно своего центра с очень малой частотой  $\omega_2$ . Центр ротора вращается вокруг центра статора с большой частотой  $\omega_1$ , но при малом эксцентриситете радиус вращения и, соответственно, момент инерции незначительный.

При остановке двигателя выключением переменного напряжения статора происходит самоторможение ротора за счет большой силы притяжения к статору, создаваемой полем подмагничивания в точке соприкосновения.

Наряду с преимуществами следует отметить некоторые недостатки микродвигателей с катящимся ротором. Конструкция двигателя вообще и механизма передачи вращения в частности довольно сложная, что связано со специфическим несоосным вращением ротора. Центробежные силы, возникающие за счет вращения центра ротора относительно центра статора, вызывают вибрации, шумы и неравномерность мгновенной скорости вращения ротора.

### 9.3. ВОЛНОВЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ

Синхронные волновые микродвигатели представляют собой конструктивное объединение электрической машины и волновой зубчатой передачи. Особенность конструкции таких двигателей заключается в том, что они имеют гибкий, деформирующийся в радиальном направлении ротор, непосредственно на поверхность которого крепится гибкий зубчатый венец волновой передачи.

Электромашинная часть волнового двигателя создает вращающий момент и является электромагнитным генератором механических волн деформации для волновой передачи.

Конструкцию и принцип действия синхронного волнового двигателя рассмотрим на примере машины реактивного типа.

На рис. 9.8 изображена схема конструкции синхронного волнового реактивного двигателя с радиально-осевым замыканием магнитного потока. В корпусе 1 укреплены П-образные ферромагнитные сердечники 2 статора. На сердечниках расположены сосредоточенные

катушки 3, образующие двух– или трехфазную обмотку переменного тока, предназначенную для создания в воздушном зазоре вращающегося магнитного поля. Жесткий зубчатый венец 8 волновой передачи закреплен на внутренней поверхности статора. Ротор 4 представляет собой гибкий тонкостенный стакан, выполненный из металла или пластмассы и укрепленный на выходном валу 9. На внешней поверхности ротора крепится гибкий зубчатый венец 7 волновой передачи. Внутренний магнитопровод состоит из отдельных ферромагнитных секторов 5, которые могут перемещаться в радиальном направлении и деформировать ротор. К внутренней поверхности ротора они прижимаются центрирующими эластичными кольцами 6.

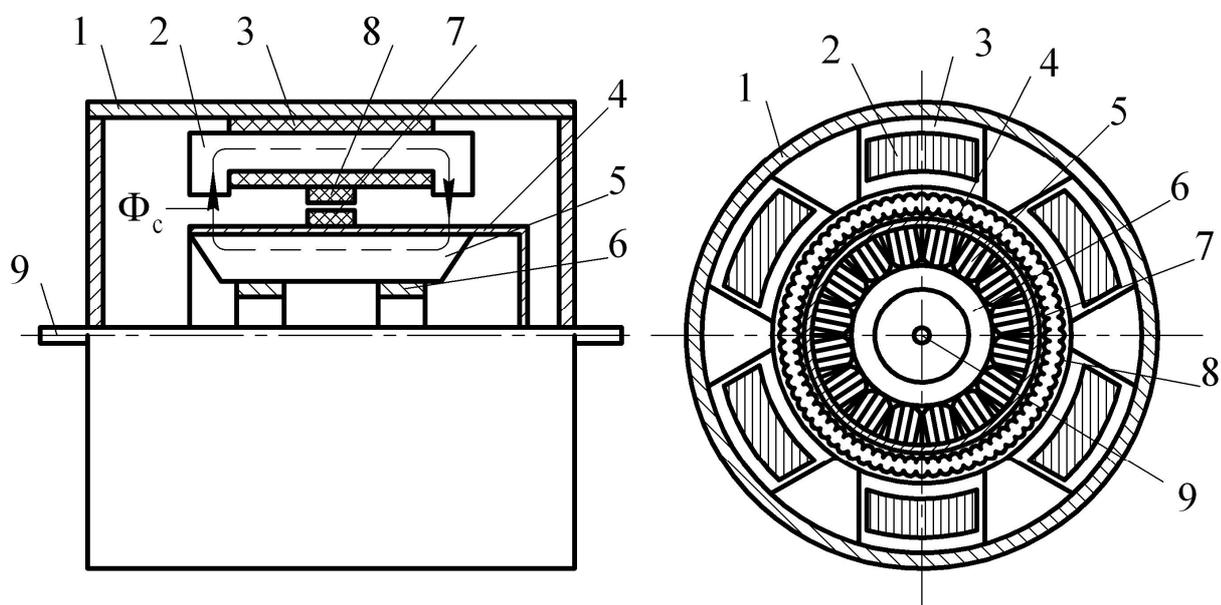


Рис. 9.8. Схема конструкции синхронного волнового микродвигателя реактивного типа с радиально-осевым замыканием магнитного потока

При подаче переменного напряжения на обмотки статора в воздушном зазоре создается вращающееся с угловой частотой  $\omega_1 = 2\pi \frac{f}{p}$  магнитное поле  $\Phi_c$ . Первая гармоника индукции  $B_{\delta c}$  этого поля при числе пар полюсов обмотки  $p = 1$  изображена на рис. 9.9, а. В поле на секторы внутреннего магнитопровода действуют силы электромагнитного притяжения к статору. Эпюра сил электромагнитного притяжения  $f_{эм}$  также изображена на рис. 9.9, а.

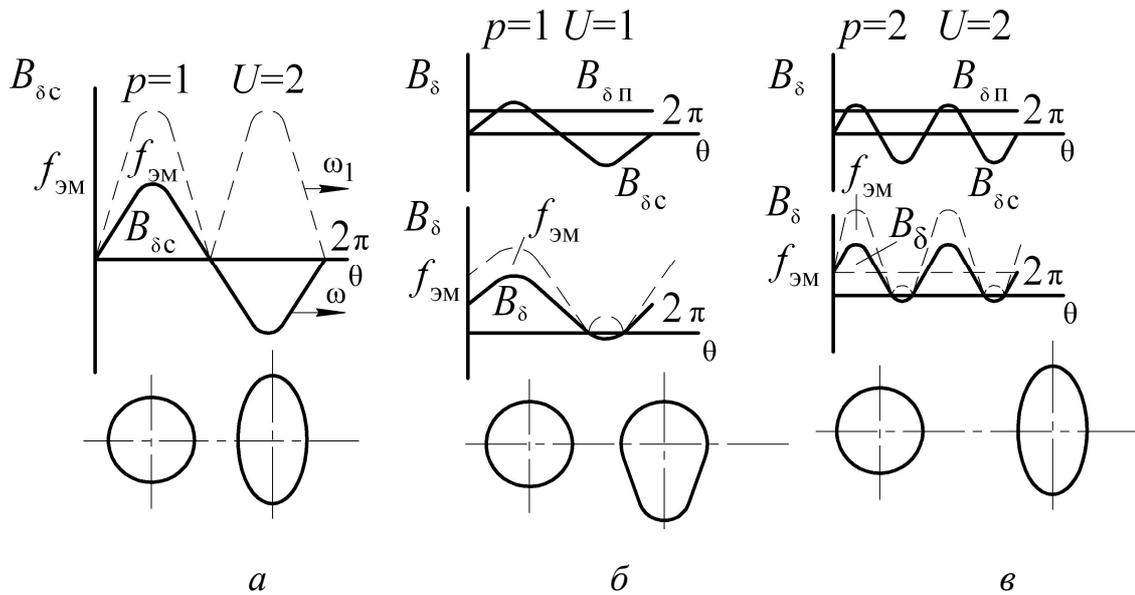


Рис. 9.9. Распределение индукции и сил притяжения вдоль окружности ротора волнового двигателя

Секторы смещаются в радиальном направлении, деформируя ротор и находящийся на нем гибкий венец волновой передачи (рис. 9.10). Зубцы гибкого венца входят в зацепление с зубцами жесткого венца, расположенного на статоре. Число волн  $\nu$  механической деформации ротора в двигателях реактивного типа равно числу полюсов ( $\nu = 2p$ ).

Волны механической деформации ротора вращаются синхронно с полем со скоростью  $\omega_1$ , и гибкий венец катится по поверхности жесткого. В волновой передаче происходит редуцирование частоты вращения, и гибкий венец вместе с ротором медленно вращается относительно своей оси в сторону, противоположную полю, с постоянной частотой

$$\omega_2 = \omega_1 / i_B,$$

где  $i_B = \frac{Z_\Gamma}{Z_\text{ж} - Z_\Gamma}$  — коэффициент редукиции волновой передачи;

$Z_\text{ж}$  и  $Z_\Gamma$  — число зубцов соответственно жесткого и гибкого венцов, причем  $Z_\text{ж} > Z_\Gamma$ .

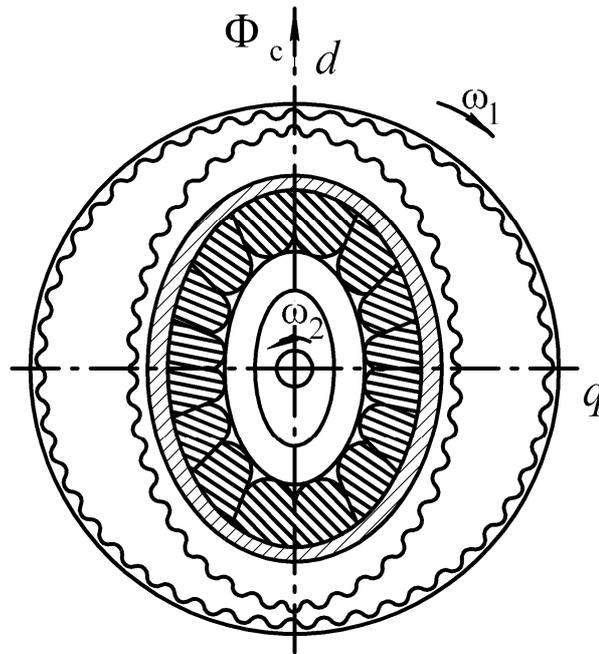


Рис. 9.10. Деформация ротора волнового двигателя

При деформации ротора в двигателе возникает неравенство воздушных зазоров по продольной  $d$  и поперечной  $q$  осям, а значит, и неравенство магнитных  $R_{Md} \neq R_{Mq}$  и индуктивных  $X_d \neq X_q$  сопротивлений по этим осям. Как известно, при этих условиях в машине создается реактивный вращающий момент. Без учета активного сопротивления обмотки статора уравнение реактивного момента

$$M_p = M_{pmax} \sin 2\theta_u,$$

где  $\theta_u$  – угол между осью пространственной волны напряжения статора и поперечной осью  $q$  деформированного ротора.

Величина угла  $\theta_u$ , как у всех синхронных машин, зависит от момента сопротивления.

Максимальное значение реактивного момента  $M_{pmax}$  пропорционально разности индуктивных сопротивлений  $X_d$  и  $X_q$ . В волновом двигателе эта разность зависит от степени деформации ротора:

$$X_d - X_q = f(a/\delta),$$

где  $a$  – максимальное значение радиальной деформации;

$\delta$  – средний воздушный зазор.

В волновой передаче происходит редуцирование (повышение) момента на валу двигателя:

$$M_2 = M_p i_B \eta_B,$$

где  $\eta_B$  – КПД волновой передачи и подшипников.

Волновой микродвигатель индукторного типа можно выполнить по той же конструктивной схеме, что и реактивный (см. рис. 9.8), разместив на сердечниках 2 дополнительные обмотки постоянного тока, которые будут создавать униполярный поток подмагничивания. Волновые двигатели индукторного типа за счет взаимодействия вращающегося поля и поля подмагничивания развивают больший, чем реактивные, момент. Кроме того, они имеют лучшие энергетические показатели. У них, в отличие от реактивных, число волн деформации равно числу пар полюсов ( $\nu = p$ ). Это наглядно подтверждают графики индукции и сил притяжения на рис. 9.9, б, в. Поэтому, чтобы сохранить динамическую уравновешенность ротора, необходимо выполнять волновые двигатели индукторного типа с числом пар полюсов  $p > 2$ .

На рис. 9.11 показана схема конструкции синхронного волнового реактивного микродвигателя с радиальным замыканием магнитного потока. Статор имеет классическую для машин переменного тока конструкцию: шихтованный цилиндрический сердечник 1 с многофазной обмоткой 2, создающей вращающееся магнитное поле  $\Phi_c$ . Жесткий зубчатый венец 3 укреплен на поверхности статора. Гибкий зубчатый венец 4 находится на поверхности гибкого деформирующегося ротора 5. Внутренний магнитопровод 6 представляет собой упругое гибкое кольцо, навитое из ленты пермаллоя. Он служит для замыкания магнитного потока вдоль окружности ротора и деформации ротора под действием сил притяжения к статору.

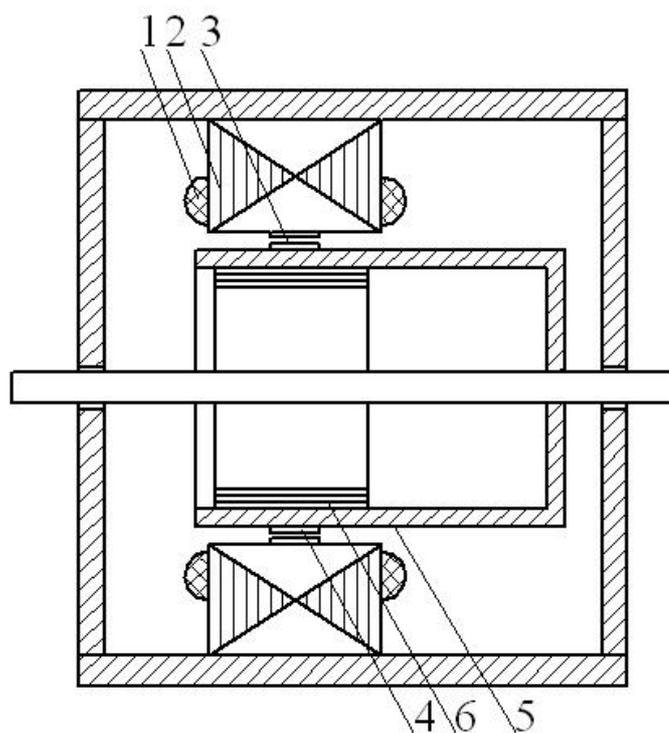


Рис. 9.11. Схема конструкции синхронного волнового микродвигателя реактивного типа с радиальным замыканием магнитного потока

Волновые двигатели имеют хорошие динамические характеристики. Время пуска микродвигателей с номинальной частотой питания  $f = 50$  Гц достигает 3-4 мс. Ротор имеет довольно малый момент инерции, вращается с низкой скоростью и быстродействие двигателя зависит в основном не от кинетической энергии вращения ротора, а от величины кинетической энергии перемещающихся в радиальном направлении масс деформирующегося ротора. Это значит, что время пуска определяется практически временем деформации ротора до зацепления венцов волновой передачи. При отключении напряжения питания волна деформации исчезает очень быстро, и ротор останавливается практически без выбега. В волновых двигателях при числе волн деформаций  $\nu > 2$  вращающиеся массы динамически уравновешены, что обеспечивает более низкий уровень вибрации, чем у двигателей с катящимся ротором. Недостатком волновых микродвигателей является сложность конструкции и технологии изготовления, связанная в основном с требованием обеспечения необходимой эластичности ротора. Энергетические и весовые показатели волновых двигателей невысоки, особенно у двигателей реактивного типа, вследствие

больших немагнитных зазоров на пути магнитного потока и особенностей конструкции внешнего и внутреннего магнитопроводов.

Существенное преимущество всех рассмотренных микродвигателей заключается в отсутствии быстровращающихся частей и подшипников, что значительно повышает их надежность. Например, гарантируемый срок службы синхронных редукторных микродвигателей (серия ДСР) в три-четыре раза больше, чем у синхронных микродвигателей с механическими редукторами, обеспечивающих одинаковую скорость вращения выходного вала (серия ДСД).

КПД и вес на единицу развиваемой мощности у рассмотренных микродвигателей сильно зависят от реализуемого коэффициента редуцирования скорости. Чем больше коэффициент редуцирования, тем хуже эти показатели. Например, у серии синхронных микродвигателей с катящимся ротором при одних габаритах и частоте  $f = 50$  Гц (частота вращения поля 3000 об/мин) с изменением номинальной частоты вращения ротора от 2 до 200 об/мин мощность меняется примерно от 0,4 до 22 Вт, а КПД от 0,7 до 36%. Синхронные редукторные микродвигатели индукторного типа мощностью порядка 1 Вт при частоте  $f = 50$  Гц и коэффициенте редукции 10-30 имеют КПД 5-8%.

Коэффициент мощности  $\cos\varphi$  у индукторных микродвигателей достигает 0,7-0,85, а при конденсаторной схеме включения 0,95.

Низкая частота вращения, большой вращающий момент и высокие динамические показатели волновых микродвигателей и микродвигателей с катящимся ротором способствуют их применению для привода различных точных механизмов (нониусы копировальных станков, часовые устройства и т. д.), а также в электромеханических манипуляторах систем дистанционного управления (вакуумные, радиационные установки и т. п.).

## **Глава 10. СИНХРОННЫЕ МУФТЫ**

В различных приборах, в автоматизированном электроприводе, в тахометрии, в системах автоматического регулирования применяются синхронные муфты, осуществляющие жесткую упругую связь

двух валов, механически не связанных друг с другом, т. е. передачу момента с вала на вал при синхронном их вращении или синхронном повороте. В ряде случаев синхронные муфты используются в качестве элементов, ограничивающих максимальный момент, передаваемый от двигателей к исполнительным механизмам, т. е. в качестве элементов защиты двигателей от перегрузок.

Ведущая и ведомая части синхронных муфт разделены между собой воздушным зазором либо немагнитной перегородкой (экраном). Перегородка применяется в случае необходимости синхронной передачи вращения внутрь изолированной полости, заполненной агрессивной средой под высоким давлением.

## **Глава 11. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ**

В настоящее время сформировалась новая ветвь электроэнергетики – импульсная электроэнергетика. Наряду с установками для научных исследований: устройствами для получения сверхсильных магнитных полей, ускорителями заряженных частиц, плазмотронами – импульсная электроэнергетика находит применение для испытания высоковольтной коммутационной аппаратуры, в технике и технологии промышленного производства и др. Круг потребителей импульсной мощности непрерывно расширяется. Для многих потребителей генераторы ударной мощности оказываются самыми целесообразными источниками энергии, так как накопление энергии во вращающихся маховых массах является наиболее эффективным и экономичным.

Преобразование кинетической энергии, запасенной маховыми массами, в электромагнитную энергию обычно осуществляется с помощью электрических машин. Для этой цели могут быть использованы стандартные машины постоянного и переменного тока. Однако с целью повышения эффективности преобразования становится целесообразным создание специальных электрических машин, предназначенных для работы в импульсном режиме. Среди таких машин в практике импульсной электроэнергетики нашли применение униполярные и синхронные ударные генераторы.

## 11.1. УНИПОЛЯРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

В настоящее время одним из важных направлений развития униполярных генераторов является разработка машин, предназначенных для работы в импульсном режиме – ударных униполярных генераторов. Перспективной областью применения таких генераторов является техника получения сильных магнитных полей. Здесь они успешно конкурируют с другими источниками импульсного питания.

Наиболее крупный из существующих униполярных генераторов построен в Австралии для питания обмотки возбуждения протонного синхротрона. Ротор генератора состоит из четырех дисков диаметром 3,53 м и массой 20 т каждый. Диски вращаются с частотой 15 об/с, причем направление вращения дисков встречное. Индукция в зазоре машины 1,8 Тл, а масса машины 1500 т. Диски изолированы от вала и соединены последовательно, что позволяет получить результирующее напряжение 720 В. Накапливаемая дисками кинетическая энергия составляет 600 МДж, а ток в импульсе при замыкании генератора на обмотку электромагнита синхротрона равен  $1,7 \cdot 10^6$  А.

Первоначально коммутация тока генератора осуществлялась с помощью жидкого контакта, при этом за один цикл через коммутирующее устройство протекало 2,5 т сплава натрия–калий. В дальнейшем для коммутации были использованы медные щетки. На наружной стороне каждого диска было установлено по 864 щетки, а на внутреннем диаметре по 576 щеток. Площадь каждой щетки  $10^{-4}$  м<sup>2</sup>. Расчетная скважность импульсов порядка 10 мин, длительность фронта импульса 0,7 с. При достижении максимума ток падает до нуля за 1,5 с.

Импульсные униполярные генераторы большой мощности могут обеспечить высокую удельную энергию. Однако, несмотря на простоту конструкции, они не находят широкого применения. Это объясняется, во-первых, сложностью токосъема; во-вторых, низким напряжением, что требует большого сечения токопроводящих шин и, кроме того, в ряде случаев не может обеспечить необходимой скорости нарастания тока в цепях, содержащих индуктивность.

## 11.2. УДАРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

В современной литературе ударными генераторами называют как генераторы ударной мощности, так и генераторы разрывной мощности.

Под ударной мощностью понимают максимум мгновенной мощности за время первой полуволны тока внезапного короткого замыкания. В генераторе ударной мощности, являющемся преимущественно однофазной машиной, используется, как правило, только первый максимальный пик тока с учетом апериодической составляющей, при этом рабочий цикл генератора при частоте 50 Гц длится около 0,02 с.

Генераторы разрывной мощности служат для испытания отключающей аппаратуры. Разрывная мощность, определяемая как произведение действующего значения разрываемого тока на действующее значение восстанавливающегося напряжения, представляет собой условную величину.

В генераторах разрывной мощности, являющихся трехфазными машинами, используются главным образом симметричный ток короткого замыкания и восстанавливающееся напряжение. Длительность процесса замыкания при этом доходит до 10-20 периодов тока.

Первый генератор ударной мощности, с помощью которого П.Л. Капица проводил исследования сильных магнитных полей в лаборатории Резерфорда, был построен по проекту М.П. Костенко фирмой «Метрополитен-Виккерс» в 1925 г.

Основные данные генератора Капицы–Костенко следующие: синхронный, однофазный, двухполюсный, типа турбогенератора, мощность 1,5 МВ·А, наружный диаметр статора 1,022 м, внутренний диаметр статора 0,535 м, активная длина статора 0,763 м, воздушный зазор  $6,35 \cdot 10^{-3}$  м, максимальное напряжение 2250 В, максимальный ток 72000 А, ударная плотность тока в обмотке статора – до  $270 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>, ударная плотность тока в обмотке ротора– до  $16 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>. На статоре расположено 60 полузакрытых пазов, имеющих отношение глубины паза к его ширине 1,8. При этом в 36 пазах уложена однофазная однослойная обмотка. Конструктивной особенностью обмотки статора является усиленное крепление лобовых частей с помощью бронзовых капп.

Обмотка возбуждения состоит из двух частей: одна имеет шаг, практически равный полюсному делению, а вторая – половине полюсного деления. Каждая часть обмотки имеет независимое питание и регулирование, что дает возможность получать постоянное максимальное значение импульса тока статора в течение небольшого промежутка времени.

Отличительной особенностью ротора является наличие мощной демпферной обмотки, расположенной как в основных, так и в специальных пазах, профрезерованных в больших зубцах. При этом все пазы расположены равномерно по окружности ротора. Сильная демпферная обмотка практически полностью экранирует обратное синхронное поле, имеющее место в однофазных машинах, и обеспечивает синусоидальную форму поля. Полная масса машины – 13 т, масса ротора – 2,5 т.

Отечественная промышленность начала выпускать генераторы разрывной мощности с 1939 г. Заводом «Электросила» по заказу Уральского физико-технического института был изготовлен генератор ударной мощности типа ТО-12-2, предназначенный для получения магнитных полей напряженностью до  $10^8$  А/м. Конструкция статора и ротора генератора типа ТО-12-2 подобна конструкции генератора Капицы–Костенко.

Основные данные генератора типа ТО-12-2: мощность 15 МВ·А, наружный диаметр статор 1,77 м, внутренний диаметр статора 0,85 м, активная длина статора 1,8 м, воздушный зазор  $12,5 \cdot 10^{-3}$  м. Максимальное напряжение 2375 В, максимальный ток 280000 А, мгновенная максимальная мощность 570 МВ·А, сверхпереходное индуктивное сопротивление 0,045.

Хорошие энергетические показатели имеет однофазный ударный генератор фирмы СЭМ (Франция), изготовленный в качестве модели импульсных генераторов на энергию  $10^7$  Дж.

Генератор характеризуется следующими данными: диаметр ротора 0,32 м, активная длина 1,2 м, масса 5800 кг. Массивный двухполюсный ротор имеет обмотку возбуждения и демпферную обмотку, представ-

ляющую собой сложное проводящее покрытие ротора. Энергия, передаваемая в индуктивную нагрузку, равна 480 кДж, максимальная индукция в зазоре 2,4 Т, амплитуда тока 65 кА, амплитуда напряжения 4 кВ, максимальная плотность тока в обмотке статора  $565 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>, максимальная плотность тока в обмотке возбуждения  $340 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>. Нагрев меди обмотки статора за один импульс тока составляет 25°С. Кинетическая энергия ротора достигает 1720 кДж, коэффициент передачи энергии в нагрузку 23,4%. Удельная преобразуемая энергия достигает 84 Дж/кг при длительности импульса 6,25 мс. Особенностью генератора является применение форсированного самовозбуждения. В процессе самовозбуждения к моменту замыкания на нагрузку частота вращения ротора снижается с 6150 об/мин до 5100 об/мин. Конечная частота вращения ротора – 2760 об/мин.

В отличие от генераторов ударной мощности генераторы разрывной мощности получили более широкое распространение. Генераторы разрывной мощности начали строить с 1916 г. Характерными особенностями первых генераторов были многополюсное исполнение и относительно высокие значения сверхпереходного индуктивного сопротивления. Поэтому крупнейший из таких генераторов мощностью 100 МВ·А давал в переходном режиме лишь 500 МВ·А.

Первые отечественные генераторы разрывной мощности типа ТИ-12-2 были построены заводом «Электросила» в 1938-1939 гг. для ВЭИ и Ленинградского завода «Электроаппарат». Основные данные генераторов: трехфазные типа двухполюсных турбогенераторов, мощность 15 МВ·А, основные размеры такие же, как у генератора ударной мощности типа ТО-12-2, максимальное напряжение 8000 В, максимальный ток 45500 А, мгновенная мощность трехфазного симметричного короткого замыкания 630 МВ·А, сверхпереходное индуктивное сопротивление 0,026. Обмотка статора двухслойная, уложена в открытые пазы с отношением глубины к ширине 2,8. Лобовые части обмотки расположены вдоль оси машины и закреплены немагнитными кольцами. В дальнейшем были изготовлены генераторы типов ТИ-25-2 и ТИ-75-2 в габаритах турбогенераторов 31,25 и 75 МВ·А. Мощность короткого замыка-

ния соответственно равна 500 и 1200 МВ·А. В 1957 г. изготовлен генератор типа ТИ-100-2 в габаритах турбогенератора на 100 МВ·А, имеющий наружный диаметр статора 2,32 м, внутренний диаметр статора 1,08 м, активную длину статора 5,67 м, максимальное напряжение 12 кВ, максимальный ток 330 кА, сверхпереходное индуктивное сопротивление 0,03. Мощность короткого замыкания генератора 3200 МВ·А, мощность включения на испытуемый объект 2500 МВ·А при индуктивном сопротивлении шинпровода 0,01.

Среди генераторов разрывной мощности, изготовленных зарубежными фирмами, видное место занимает генератор фирмы «Сименс-Шуккерт», построенный в габаритах восьмиполюсного синхронного генератора на 300 МВ·А с симметричной мощностью короткого замыкания 4300 МВ·А. Для привода генератора применен асинхронный двигатель с фазным ротором. Общая масса генератора 680 т, масса ротора 225 т. Ударный момент вращения при коротком замыкании  $78 \cdot 10^4$  Нм. Для уменьшения ударных нагрузок на фундамент и уменьшения вибраций здания предусмотрены пружинные амортизаторы и отделение фундамента генератора от фундамента здания.

Общим при создании генераторов разрывной и ударной мощности является стремление получить по возможности малое сверхпереходное индуктивное сопротивление, определяющее ток короткого замыкания. Это достигается тем, что ударные генераторы по сравнению с синхронными машинами нормального исполнения имеют меньшее число витков обмотки статора, меньшую глубину и большую ширину паза статора, уменьшенный воздушный зазор и приближенные к зазору обмотки статора и ротора, экранированные лобовые части, полную демпферную обмотку на роторе. Ударные генераторы выполняют с эластичным креплением активной части статора. Между шихтованным пакетом стали и корпусом имеется упругий элемент, благодаря чему корпус статора и фундамент освобождаются от воздействий колебаний пакета статора, вызванного магнитным тяжением ротора, особенно в режиме внезапного короткого замыкания.

Основные принципы получения больших мгновенных мощностей с помощью ударных генераторов, а также их конструктивное исполнение разработаны достаточно полно и являются общими для зарубежных и отечественных фирм.

Основным режимом работы ударных генераторов является внезапное короткое замыкание или замыкание на нагрузку, сопротивление которой соизмеримо со сверхпереходным сопротивлением генератора. Например, при испытании высоковольтной масляной аппаратуры на коммутирующую способность на первом этапе процесса ударный генератор, как правило, работает в режиме трехфазного внезапного короткого замыкания. Обмотка статора замкнута накоротко контактами испытуемого выключателя.

К настоящему времени ударные генераторы развивают мощность трехфазного короткого замыкания около 5000 МВ·А. Дальнейшее увеличение ударной мощности может быть достигнуто как за счет совершенствования конструкции генераторов, так и различного рода схемных решений.

Следует отметить, что основные достоинства электромашинных схем накопления и передачи энергии состоят в следующем:

- в возможности получения неограниченной энергии (с использованием добавочных маховых масс);
- в небольшой потребляемой из сети мощности, которая необходима только для покрытия потерь холостого хода;
- в возможности передачи энергии из обмотки генератора в индуктивную нагрузку и обратно;
- в небольшой средней мощности синхронных генераторов по сравнению с их импульсной мощностью;
- в уменьшении стоимости единицы энергии по мере увеличения импульсной мощности.

Поэтому можно ожидать, что наряду с широким применением ударных генераторов в лабораториях они найдут достойное применение как накопители и источники энергии там, где требуются большие энергии, измеряемые десятками миллионов джоулей, за короткие промежутки времени: от миллисекунд до нескольких секунд.

## **Глава 12. СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ (СПЭМ)**

Работы по созданию сверхпроводниковых (СП) ЭМ постоянного и переменного тока перешли из стадии разработки основ теории рабочего процесса, проектирования и исследования лабораторных моделей в стадию изготовления опытных образцов СПЭМ. При этом целью изготовления является отработка конструктивных элементов систем криогенной техники, определяющих возможность создания надежных мощных промышленных образцов СПЭМ переменного тока нормальной и повышенной частот; разноименнополюсных и униполярных машин постоянного тока (МПТ); МГД-генераторов и накопителей.

### **12.1. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СПЭМ**

Во всех разноименнополюсных электрических машинах (ЭМ) постоянного и переменного тока кондуктивного типа магнитное поле возбуждения создается электромагнитами постоянного тока или постоянными магнитами, а в обмотке якоря (ОЯ) протекает переменный ток, который при необходимости выпрямляется при помощи коллектора или полупроводниковых приборов.

Возможности снижения относительной массы и повышения предельной мощности генератора в значительной мере лимитируются объемом обмотки возбуждения (ОВ) или постоянным магнитом. Ниже рассматриваются ЭМ с электромагнитным возбуждением.

Сверхпроводники СП-С1 пригодны для работы в постоянных и переменных магнитных полях при постоянных и переменных токах. Они теряют сверхпроводимость при относительно малых значениях магнитной индукции (плотности тока) и практически неприменимы для использования в системах сильных постоянных и переменных токов.

Сверхпроводники СП-С2 практически пригодны для работы только в постоянных полях и при постоянном токе, где они сохраняют СП и при больших значениях магнитной индукции (большой плотности тока).

Выполнение ОВ из СП-С2, допускающих большие плотности тока и сильные магнитные поля при отсутствии тепловых (джоулевых) потерь, открывает новые горизонты перед электромашиностроением.

Возникает возможность снижения относительных масс, повышения предельных мощностей и КПД, выполнения ЭМ без ферромагнитопровода, увеличения напряжения ОЯ, повышения перегрузочной способности, снижения инерционности ротора и т. д.

Таким образом, СП-С2 применяют в сверхпроводниковых электрических машинах: генераторах, компенсаторах, двигателях и преобразователях. При этом речь идет лишь о СП системе возбуждения при нормальной не сверхпроводниковой ОЯ. Исключением является лишь униполярная машина постоянного тока, в которой поле якоря постоянно, и якорь принципиально может быть выполнен как СП элемент. Однако по условиям токосъема якоря униполярных машин также выполняются не сверхпроводниковыми.

В условиях энергосистемы уже испытывались СП униполярный двигатель постоянного тока (Англия) и СП МГД-генератор (СССР); СП синхронные машины пока в системе не испытывались.

## 12.2. СТЕПЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЭМ

Идеальным по использованию сверхпроводимости в электрических генераторах постоянного и переменного тока были бы машины, у которых обмотки якоря и возбуждения выполнены из СП, а магнитная цепь в активной зоне неферромагнитна.

В этом случае расчетную индукцию в рабочем зазоре (между первичной и вторичной обмотками) можно было бы повысить до  $B_{СП} \approx 2 \text{ Тл}$ , а линейную нагрузку  $A_{СП}$  за счет повышения плотности тока и сечения провода в ОЯ до  $1,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}$ . Предполагается, что при этом максимальная индукция в СП ОВ достигает 10 Тл, что принципиально возможно в случае применения стабилизированного композиционного СП провода на базе  $Nb_3Sn$ .

В рассматриваемом случае степень использования машин возросла бы по сравнению с достигнутым уровнем в двухполюсных турбогенераторах мощностью порядка 1000 МВт и электромагнитными нагрузками  $A = 3 \cdot 10^5$  А/м,  $B \approx 1,0$ Тл:

$$\frac{(AB_{\delta})_{СП}}{(AB_{\delta})} \approx 10.$$

Это означает, что с активного объема современного турбогенератора мощностью 1000 МВт можно снять мощность порядка 10000 МВт. Реально достижимый уровень повышения мощности будет значительно ниже, так как криогенная система потребует места для своего размещения и возникнет ряд ограничений, которые снижают возможности повышения  $B_{\delta}$  и  $A$ . Конкретные расчеты показывают, что степень использования может быть повышена примерно в 5 раз, что также достаточно высоко. Очевидно, реализация сверхпроводимости в электромеханических генераторах в указанном направлении исключается, так как создание одновальной турбины с частотой вращения 50 об/с мощностью порядка 2000 МВт является сложной задачей и пока не ясны рациональные пути повышения мощности одновальной турбины выше 2000 МВт при частоте вращения 50 об/с. Видимо, подобное решение принципиально мыслимо лишь в случае применения МГД-генератора. Следовательно, рационально соответственно снижать размеры СП генераторов, выполняя их предельными по мощности, исходя из возможности привода.

Основным препятствием реализации СП ОЯ является отсутствие проводов, способных сохранять СП в сильных магнитных полях переменного тока при допустимых минимальных гистерезисных потерях.

Как было отмечено ранее, в ЭМ используются СП-С2 только для ОВ постоянного тока. В этом случае линейная нагрузка и индукция (при  $P_H = 2000$  МВт) находятся на уровне:  $A \approx 4,5 \times 10^5$  А/м;

$$B \approx 1,0 \text{Тл} \text{ и } \frac{(AB_{\delta})_{СП}}{(AB_{\delta})} \approx 2.$$

### 12.3. КЛАССИФИКАЦИЯ СПЭМ

Ниже приведена классификация СПЭМ переменного и постоянного тока.

По форме исполнения (рис. 12.1): классическая конструкция СМ и обращенная конструкция МПТ (зоны 1 и 2); обращенная конструкция СМ и классическая конструкция МПТ (зоны 3 и 4).

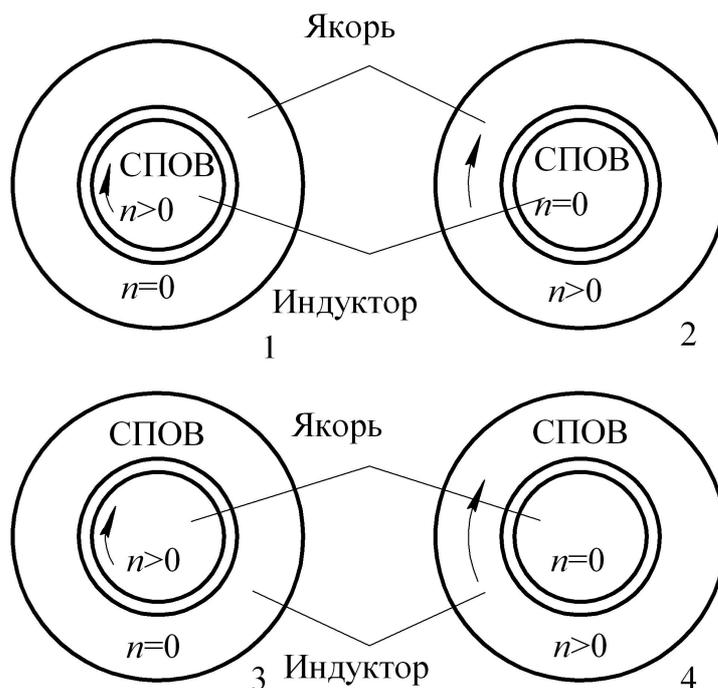


Рис. 12.1. Формы исполнения ЭМ

По конструктивному исполнению активной зоны (см. рис. 12.2):

- замена обычной ОВ сверхпроводниковой (см. рис. 12.2, зона 1);
- исключение стальных зубцов якоря и стальных полюсов возбуждения; обмотки возбуждения и якоря располагаются в зазоре между коаксиальными стальными сердечниками статора и ротора (см. рис. 12.2, зона 2);
- машина без внутреннего ферромагнитопровода, но с внешним ферромагнитным экраном ФМЭ (см. рис. 12.2, зоны 2 и 3);
- машина без ферромагнитопровода (см. рис. 12.2, зоны 2 и 4).

По типу обмоток:

- СП ОВ и СП ОЯ;
- СП ОВ, а ОЯ из криогенных проводников;

- СП ОВ, а ОЯ из обычных проводников.

*По системе возбуждения:*

- обмотка возбуждения питается от источника постоянного тока, и ток возбуждения регулируется;
- обмотка возбуждения короткозамкнута, поток возбуждения «заморожен», и ток возбуждения не регулируется.

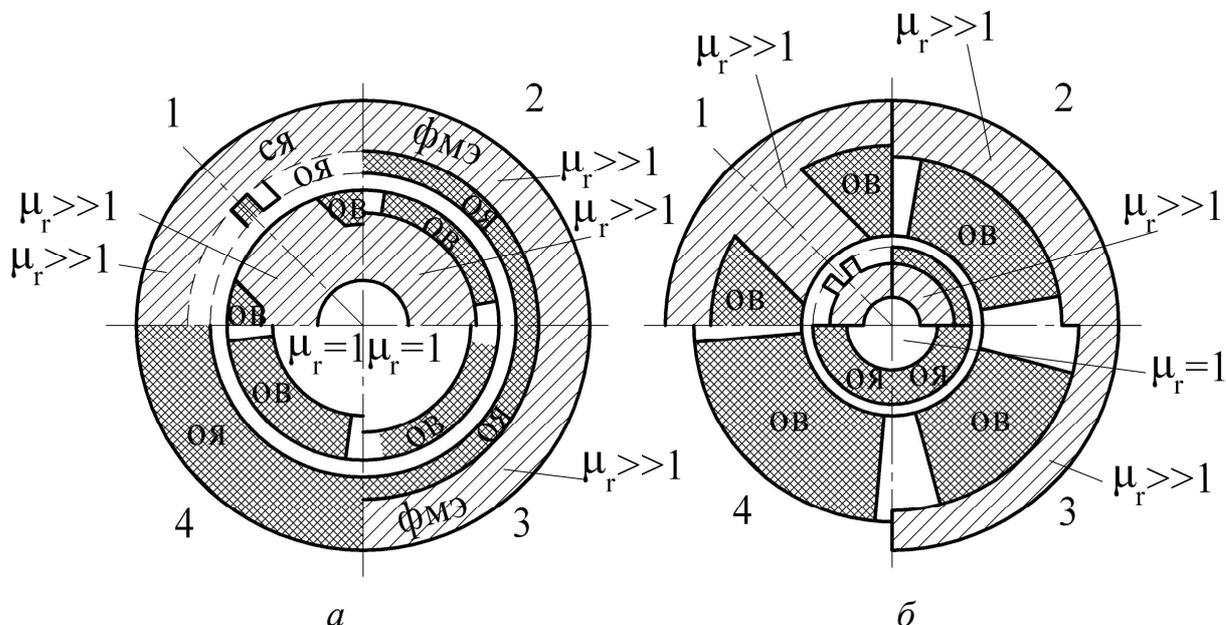


Рис. 12.2. Типы СП активных зон:

*а* – индуктор внутри якоря – классическое исполнение СМ или обращенное исполнение МПТ; *б* – якорь внутри индуктора – классическое исполнение МПТ или обращенное исполнение СМ; СЯ – сердечник якоря; ОЯ – обмотка якоря; ФМЭ – ферромагнитный экран; ОВ – обмотка возбуждения

## Глава 13. ОСОБЕННОСТИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Материалы этой главы подобраны по патентному фонду Российской Федерации за 2006-2008 гг.

### 13.1. АСИНХРОННО-СИНХРОННЫЙ ДВУХЧАСТОТНЫЙ ГЕНЕРАТОР

Современная промышленность выпускает электрифицированный инструмент и электроприборы на различную частоту тока. На фер-

мерских подворьях, удаленных пастбищах и в других условиях одновременно могут быть востребованы электроинструменты и приборы на частоту 50 и 200 Гц. Типовым решением задачи электрификации в таких условиях является применение электрического автономного генератора на частоту тока 50 Гц и преобразователя частоты с 50 на 200 Гц. При этом возможны другие варианты решения задачи.

Рассмотрим преобразователь на базе асинхронного двигателя с фазным ротором (регистрационный номер заявки 2313889), который представляет собой совмещенные в общем магнитопроводе две машины:  $2p_1$  – полюсный асинхронный двигатель и  $2p_2$  – полюсный синхронный генератор, трехфазные статорные обмотки которых расположены в общих пазах сердечника статора. Ротор – фазный, традиционной конструкции, общий для двигателя и генератора. Двигатель имеет трехфазные обмотки на статоре и на роторе, а генератор – якорную обмотку на статоре и обмотку возбуждения на роторе. Между разнополюсными обмотками взаимная индуктивная связь отсутствует. При подключении обмотки статора к трехфазному источнику частоты  $f_1$  в якорной обмотке наводится ЭДС частоты  $f_2 = p_1 f_1 (1-s)/p_2$ , где  $s$  – скольжение двигателя.

Совмещение в общем магнитопроводе взаимно неиндуктивных обмоток широко известно.

В предлагаемом изобретении решается техническая задача упрощения источника электроэнергии в автономных электроустановках с двумя частотами тока и снижения потерь энергии в таком источнике.

Техническая новизна предложенной электрической машины заключается в изменении цикла преобразования энергии в электроустановке при сокращении числа ступеней преобразований энергии.

Сущность предложенного генератора поясняется рис. 13.1.

На статоре 1 генератора в общих пазах расположены обмотки 2 с числом пар полюсов  $p_1$  и 3 с числом пар полюсов  $p_2$ , подключенные к выходным клеммам 4 и 5, к которым подключаются электроприемники (не показаны). На роторе 6 размещены трехфазная закороченная обмотка 7 с числом пар полюсов  $p_1$  и обмотка возбуждения 8 с числом пар

полюсов  $p_2$ , присоединенная к контактным кольцам 9, напряжение на эту обмотку подается через щетки 10. Ротор 6 приводится во вращение первичным двигателем 11, валы первичного двигателя 11 и генератора соединены муфтой 12. Первичный двигатель 11 является источником механической мощности; им может быть двигатель внутреннего сгорания, ветроколесо, гидротурбина и другие известные источники механической мощности. Параллельно обмотке 2 подключен трехфазный конденсатор 13 самовозбуждения машины на частоте  $f_1$ .

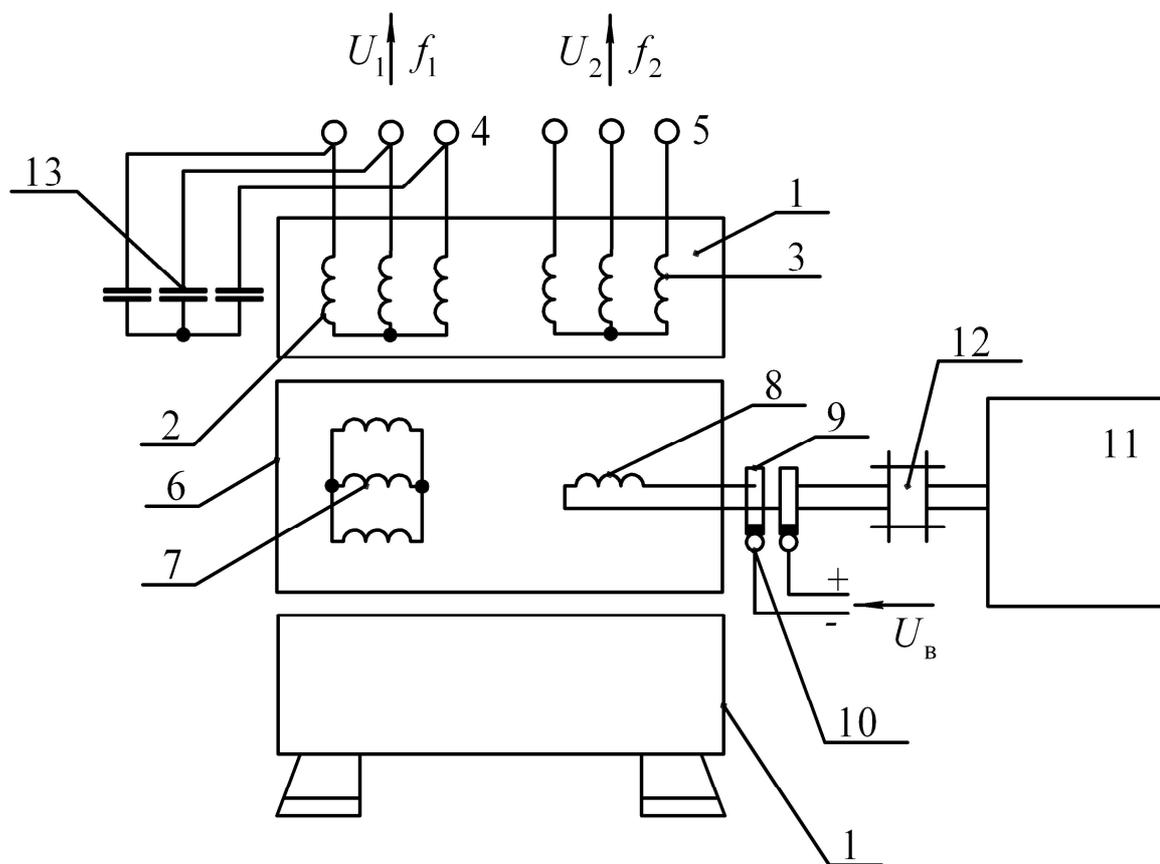


Рис. 13.1. Асинхронно-синхронный двухчастотный генератор

При вращении ротора генератора 6 первичным двигателем 11 и подаче тока возбуждения в обмотку 8 в обмотке статора 3 под действием поля возбуждения, вызываемого обмоткой ротора 8, наводится ЭДС частотой  $f_2$ . В обмотке статора 2 наводится малая ЭДС под действием остаточного поля ротора с числом пар полюсов  $p_1$ . Далее происходит процесс конденсаторного самовозбуждения при участии конденсатора 13, аналогичный самовозбуждению обычного асинхронного генератора, и в обмотке 2 наводится ЭДС частотой  $f_1$ . Ча-

стота ЭДС в обмотках 2 и 3 определяется числами пар полюсов этих обмоток  $p_1$  и  $p_2$ . При этом  $f_1 = p_1 n(1-s)$ , а  $f_2 = p_2 n$ . Вследствие того, что ротор совмещенных машин общий, а числа пар полюсов  $p_1$  и  $p_2$  обмоток 2 и 3 различны, различна и частота в этих обмотках.

Упрощение источника электроэнергии автономной электроустановки и увеличение КПД позволяет улучшить эксплуатационные характеристики, в частности сократить расход топлива, расходы на обслуживание, повысить надежность, что позволяет расширить область применения таких установок в различных областях деятельности.

### 13.2. РЕГУЛИРУЕМЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Рассмотрим регулируемый двигатель переменного тока (регистрационный номер заявки 2303325), который может быть использован при производстве электропривода, необходимого для плавного и экономичного регулирования частоты вращения вала в широких пределах ее изменения с сохранением достаточно высокого пускового момента.

Существенными недостатками коллекторного двигателя переменного тока, который рассматривался в главе 6, являются конструктивная сложность и наличие тяжелых условий коммутации, что ограничивает широкое применение его на практике.

Создание регулируемого электродвигателя переменного тока без коллектора упрощает его конструкцию и устраняет тяжелые условия коммутации.

Статор рассматриваемого двигателя включает в себя две части: асинхронную 1 и магнитную 2 с явно выраженными полюсами, оси которых расположены в параллельных плоскостях и под углом  $\alpha$  друг к другу (рис. 13.2). Асинхронная часть сектора имеет наконечники обычной формы, а магнитная – клювообразную форму, обеспечивающую уменьшение воздушного зазора. На рис. 13.2 они показаны соответственно сплошной и пунктирной линиями.

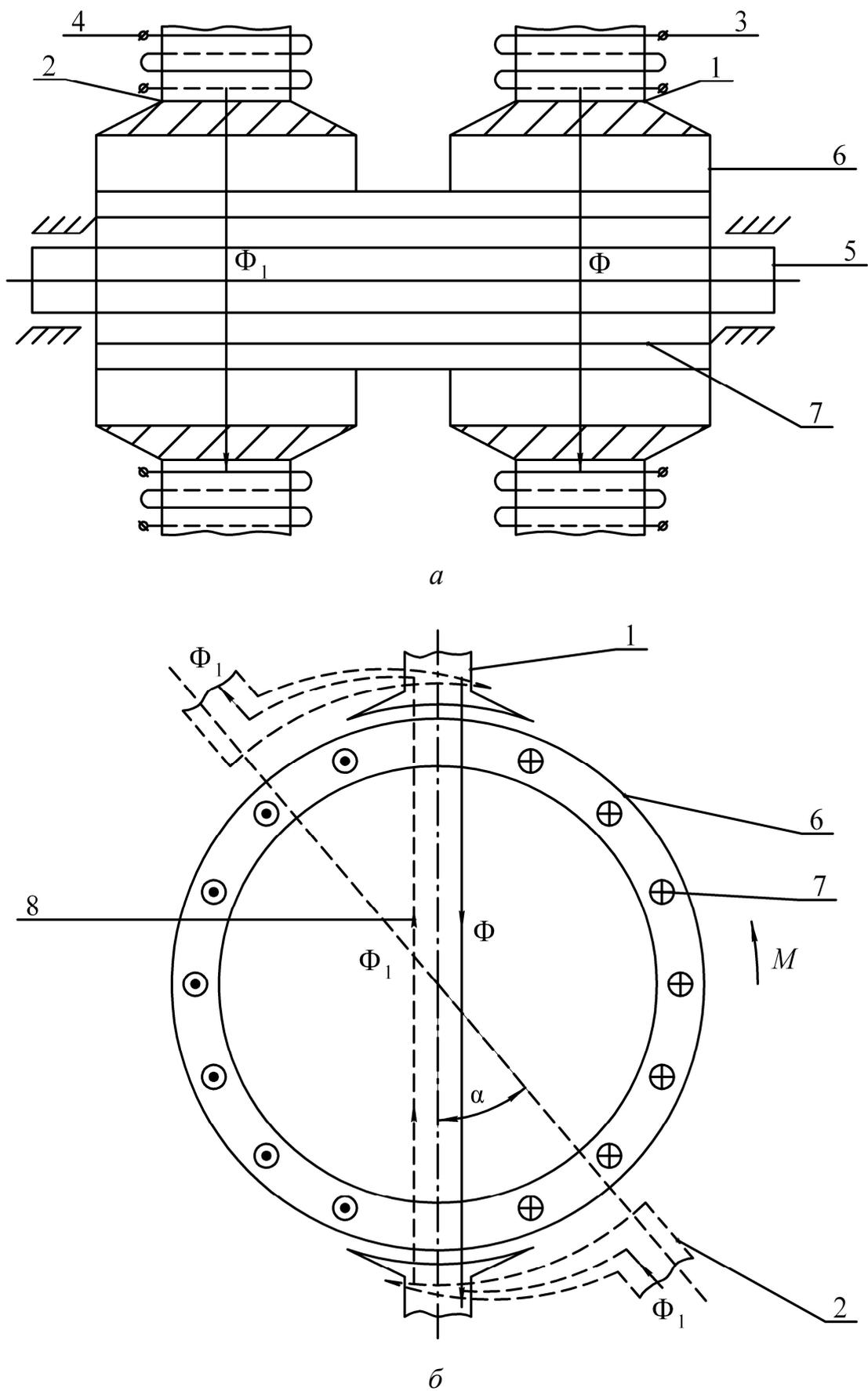


Рис. 13.2. Эскиз продольного (а) и поперечного (б) разрезов электродвигателя переменного тока

На полюсах асинхронной и магнитной частей статора установлены независимые друг от друга обмотки возбуждения 3 и 4, и тем самым они представляют собой два независимых друг от друга магнитопровода.

На валу 5, вращающемся в опорах в корпусе статора, жестко установлен якорь 6 с короткозамкнутыми обмотками 7.

Электродвигатель работает следующим образом.

При подключении обмоток 3 к источнику напряжения в асинхронной части статора 1 возникнет главный магнитный поток  $\Phi$  (см. рис. 13.2), который в свою очередь индуцирует в короткозамкнутых обмотках 7 якоря ЭДС. Мгновенное направление последних показано на рис. 13.2 попарно крестиками и точками. Указанные ЭДС будут возбуждать в магнитной части статора 2 поток  $\Phi_1$ , который, взаимодействуя с ее полюсами, создает вращающий якорь момент  $M_1$ . Поток  $\Phi_1$ , стремясь укоротить свою протяженность, будет поворачивать якорь 6 против часовой стрелки.

Для увеличения вращающего момента  $M_1$  подают на обмотки 4 ток возбуждения, направление которого выбирается таким образом, чтобы направление возникающего под действием этого тока в полюсах 2 магнитного потока совпадало с потоком  $\Phi_1$ .

Асинхронная часть статора совместно с якорем представляет собой асинхронный двигатель с явно выраженными полюсами без начального момента. С увеличением частоты вращения якоря 6 и под действием магнитного потока  $\Phi_1$  в асинхронном двигателе будет возникать возрастающий момент  $M_2$ . Таким образом, якорь двигателя вращается под действием результирующего момента ( $M$ ), равного сумме моментов, создающихся за счет потока  $\Phi_1$  в магнитной части статора ( $M_1$ ) и асинхронном двигателе ( $M_2$ ).

На рис. 13.3 представлены графики изменения указанных моментов (механические характеристики) в зависимости от частоты вращения  $n$  и скольжения  $s$  для четырехполюсного двигателя. Здесь  $M_{\text{П}}$  – пусковой момент, создаваемый потоком  $\Phi_1$ . Механическая характеристика предлагаемого двигателя является жесткой, что обеспечивает высокопроизводительную работу всего электропривода, например, в транспортных средствах.

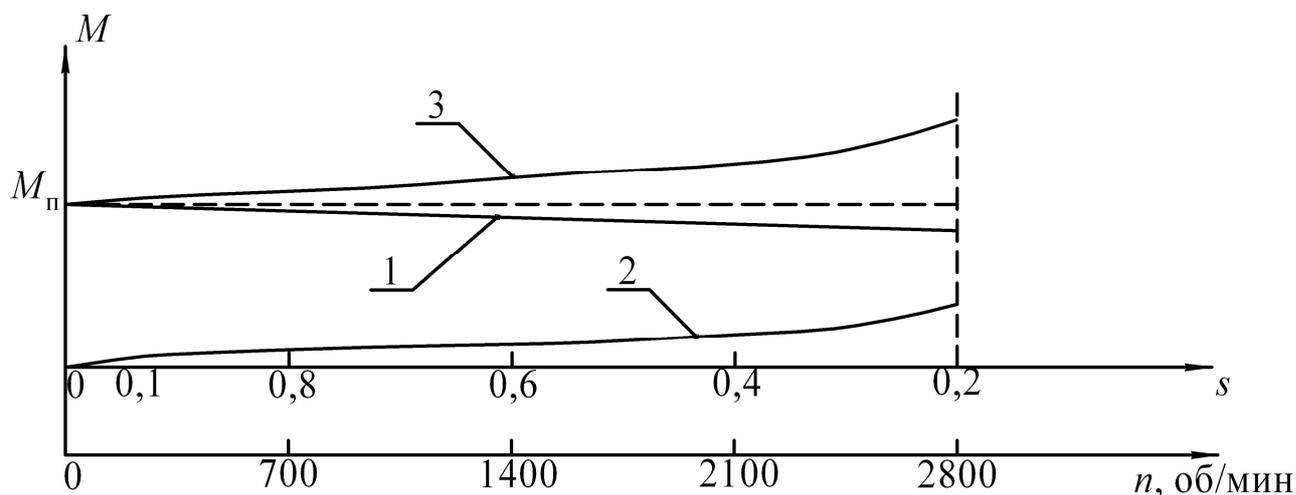


Рис. 13.3. Механические характеристики электродвигателя переменного тока:

$$1 - M_1 = f_1(n); 2 - M_2 = f_2(s); 3 - M = M_1 + M_2$$

Регулируемые частоты вращения якоря двигателя можно производить тремя способами:

- изменением напряжения только в обмотках полюсов асинхронной части статора;
- изменением напряжения только в обмотках полюсов магнитной части статора;
- одновременным изменением напряжений в вышеуказанных обмотках.

Возможно создание двигателей переменного тока с достаточно простой конструкцией практически любой мощности, с экономичным и плавным регулированием частоты вращения вала в широких пределах ее изменения, с сохранением при этом необходимого высокого пускового момента.

Рассмотрим другую конструкцию электродвигателя однофазного переменного тока. Электродвигатель однофазного переменного тока содержит корпус со станиной, закрытый передней и задней крышками, клеммовую коробку. В отверстие передней крышки пропущен вал, на котором закреплен ротор и полюса с обмотками. Вал установлен в подшипниках передней крышки и промежуточной опоры. Ротор, набранный из пластин, запрессован в пластмассу. Ротор выполнен в форме стакана, имеющего снаружи на дне втулку, а на внешней

поверхности продольные пазы, в которые уложены медные стержни. Положительные выводы всех медных стержней соединены с медным кольцом, расположенным в задней части ротора, соосно ему. Отрицательные выводы всех медных стержней соединены с медным кольцом, расположенным в передней части ротора, также соосно ему. Внутри корпуса размещен трансформатор, имеющий одинаковые по конструкции подвижную и неподвижную части. Неподвижная часть трансформатора содержит магнитопровод, набранный из пластин, запрессованных в пластмассу, и выполненный в форме стакана, имеющего внутри в центре стержень, на который надета первичная обмотка, концы которой подключены к клеммам клеммовой коробки. Неподвижная часть трансформатора привернута болтами к внутренней поверхности задней крышки, установлена соосно валу электродвигателя. Подвижная часть трансформатора содержит магнитопровод, набранный из пластин, запрессованных в пластмассу, и выполненный в форме стакана, который имеет внутри в центре стержень с надетой на него вторичной обмоткой и закреплен на заднем конце вала. Подвижная и неподвижная части трансформатора обращены друг к другу своими открытыми частями и установлены с небольшим зазором между собой. Кроме того, выводы вторичной обмотки через выпрямляющее устройство, закрепленное на валу, соединены с отрицательным и положительным медными кольцами ротора. Две пары полюсов возбуждения имеют обмотки, которые соединены через выпрямляющее устройство с входными клеммами клеммовой коробки. Полюсы охватывают ротор изнутри и снаружи. Северные полюсы выполнены выпуклыми, расположены внутри ротора и обращены к нему своей выпуклой поверхностью. Южные полюсы выполнены вогнутыми, расположены снаружи и обращены своей вогнутой поверхностью к наружной поверхности ротора, причем одна пара полюсов развернута относительно другой пары полюсов на  $180^\circ$ . Рассматриваемая конструкция позволяет изменять частоту и направление вращения вала электродвигателя переменного тока.

### 13.3. ВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ВНУТРЕННИМ СТАТОРОМ

Волновые электродвигатели осуществляют вращение ротора с пониженной скоростью под действием магнитного поля, создаваемого обмоткой статора.

Решим задачи повышения технологичности при изготовлении, упрощения конструкции и повышения электромагнитного момента волнового электродвигателя (регистрационный номер заявки 2292107).

Волновой электродвигатель с внутренним статором (см. рис. 13.4) состоит из цилиндрического сердечника статора 1 и ротора 5, выполненного в виде полого цилиндра, охватывающего сердечник статора 1 по наружной поверхности 6, и гибкого магниточувствительного элемента 7, расположенного между сердечником статора 1 и ротором 5. Каждая секция обмотки состоит из пары противоположно размещенных обмоток, каждая из которых размещена в двух смежных пазах сердечника статора.

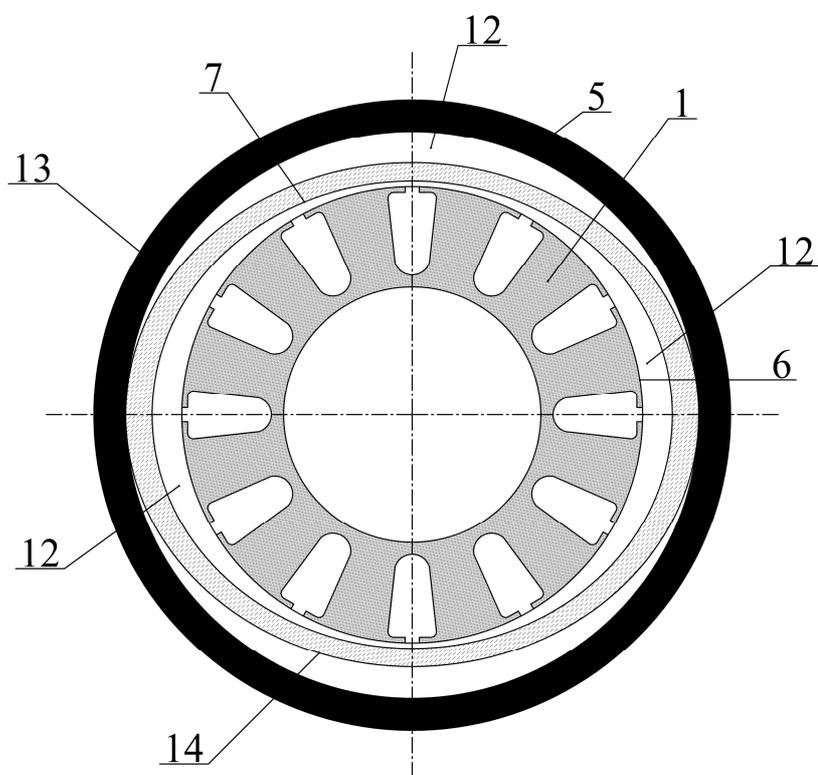


Рис. 13.4. Поперечное сечение волнового электродвигателя с внутренним статором

Гибкий магниточувствительный элемент 7 выполнен с возможностью изгиба в радиальном направлении без изменения своей длины.

Наружная поверхность 14 магниточувствительного элемента 7 и внутренняя поверхность 13 полого ротора 5 выполнены с большим коэффициентом трения.

В частности, наружная поверхность 14 магниточувствительного элемента 7 и внутренняя поверхность 13 полого ротора 5 выполнены рифлеными с насечкам (не показаны).

В наружных пазах статора уложена трехфазная обмотка, состоящая из секций 2, 3 и 4.

На рис. 13.5 показано поперечное сечение волнового электродвигателя, у которого запитанные током секции обмотки статора отмечены темным тоном. Стрелками показано направление вращения магнитного поля статора при переключении секций обмотки и направление вращения ротора.

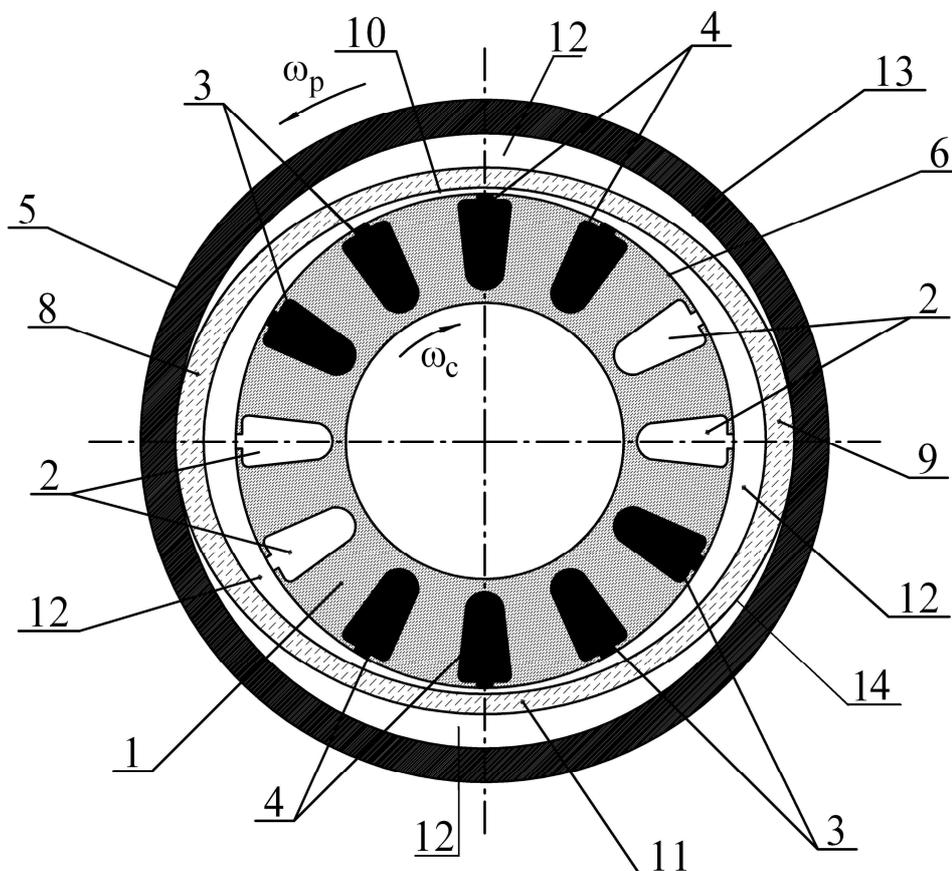


Рис. 13.5. Поперечное сечение волнового электродвигателя с внутренним статором и запитанными обмотками статора

Гибкий магниточувствительный элемент 7 контактирует без проскальзывания с полым ротором 5 и с наружной поверхностью 6 сердечника статора 1, причем между участками 8 и 9 магниточувствительного элемента 7 и сердечника статора 1, а также между участками 10 и 11 элемента 7 и ротором 5 имеется зазор 12.

Контактирующие с наружной поверхностью 6 сердечника статора 1 участки 10 и 11 магниточувствительного элемента 7 расположены между контактирующими с внутренней поверхностью 13 ротора 5 участками 8 и 9 магниточувствительного элемента 7.

Волновой электродвигатель работает следующим образом.

Осуществляется последовательная запитка током секций 2, 3 и 4 трехфазной обмотки статора. Вследствие этого происходит последовательное изгибание магниточувствительного элемента 7 в радиальном направлении с притяжением одних его участков к сердечнику статора 1 и прижиманием других его участков к внутренней поверхности ротора с передачей на него электромагнитного момента.

Так, при запитке секций 3 и 4 обмотки статора током происходит притяжение участков 10 и 11 магниточувствительного элемента 7 к наружной поверхности 6 сердечника статора 1. Поскольку элемент 7 выполнен с возможностью изгибания в радиальном направлении без изменения своей длины, то участки 8 и 9 магниточувствительного элемента 7 прижимаются к внутренней поверхности 13 полого ротора 5. При этом между участками 10 и 11 магниточувствительного элемента 7 и внутренней поверхностью 13 полого ротора 5, а также между участками 8 и 9 элемента 7 и наружной поверхностью 6 сердечника статора 1 образуется зазор 12.

Поскольку между контактирующими участками магниточувствительного элемента с внутренней поверхностью ротора и наружной поверхностью сердечника статора отсутствует проскальзывание, а наружная поверхность элемента 7 и внутренняя поверхность полого ротора 5 выполнены с большим коэффициентом трения, то происходит передача электромагнитного момента от элемента 7 к ротору при последовательной запитке током секций 2, 3 и 4 трехфазной обмотки статора.

При последовательном переключении секций 2, 3, 4 обмотки статора создается вращающееся с частотой  $\omega_c$  магнитное поле. При этом формируется волна изгиба магниточувствительного элемента, вследствие чего обеспечивается вращение ротора с частотой  $\omega_p$  значительно ниже частоты вращения магнитного поля в направлении, показанном стрелкой.

Предлагаемый волновой электродвигатель с внутренним статором технологичен в изготовлении, обладает простой и надежной конструкцией сердечника статора и ротора, характеризуется легкостью соединения внешней поверхности ротора с приводимым в действие механизмом, обеспечивая передачу значительного электромагнитного момента на ротор.

Расположение полого ротора снаружи магниточувствительного элемента позволяет:

- устранить зазор между этим элементом и наружной поверхностью сердечника статора, что приводит к увеличению силы притяжения между ними при питании обмотки током, а значит, и к увеличению электромагнитного момента двигателя;
- выполнить ротор из любого электротехнического материала – магнитного или немагнитного;
- выполнить ротор со значительной толщиной стенок; толсто-стенный ротор позволяет передавать значительный электромагнитный момент без механических деформаций;
- присоединять к наружной поверхности ротора нагрузку, например шкив приводного устройства.

#### **13.4. ЛИНЕЙНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ**

Линейные асинхронные двигатели предназначены для электроприводов с прямолинейным или возвратно-поступательным движением рабочих органов и электрического транспорта.

Рассмотрим конкретное выполнение ЛАД на примере (регистрационный номер заявки 2294047).

ЛАД (см. рис. 13.6) содержит индуктор, включающий сердечник 1 с многофазной обмоткой 2 и вторичный элемент 3, выполненный из магнитопроводящего сердечника 4, в пазах которого расположены один над другим изолированные электропроводящие стержни 5, замкнутые с одной стороны общей электропроводящей шиной 6, а с другой – замыкающим цилиндром 7, состоящим из электропроводящей 8 и изоляционной 9 частей, установленным с возможностью поворота вокруг своей оси, например при помощи рукоятки 10. Вторичный элемент 3 содержит дополнительно еще одну обмотку, состоящую из изолированных друг от друга электропроводящих стержней 11 и размещенную в пазах дополнительного сердечника 12, примыкающую с одной стороны к замыкающему цилиндру 7, а с другой стороны закороченную дополнительной электропроводящей шиной 13. Над дополнительной обмоткой установлен еще один дополнительный индуктор, содержащий сердечник 14 с многофазной обмоткой 15.

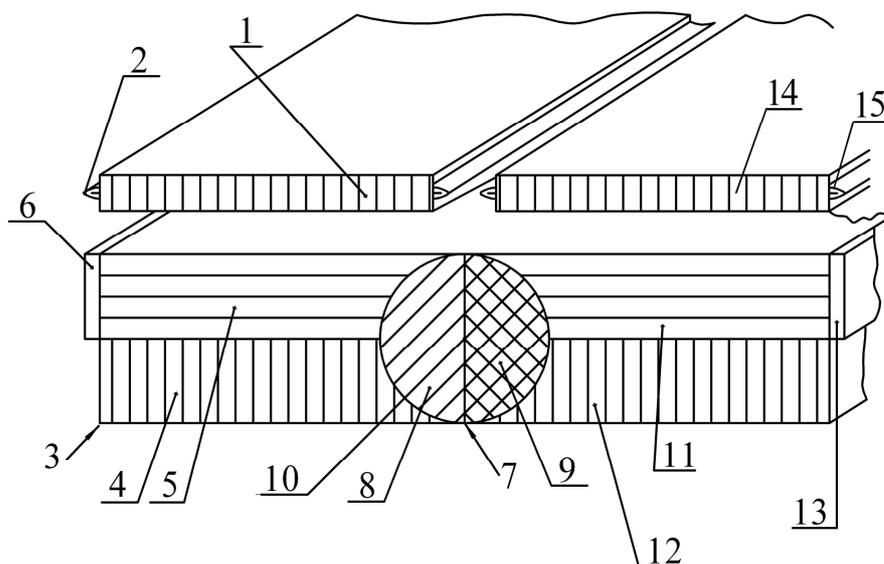


Рис. 13.6. Общий вид ЛАД

На рис. 13.7 показано поперечное сечение вторичного элемента для случая, когда основная и дополнительная короткозамкнутые обмотки полностью закорочены электропроводящей частью замыкающего цилиндра. Все обозначения такие же, как и на рис. 13.6.

На рис. 13.8 представлено то же, что и на рис. 13.7, но основная и дополнительная короткозамкнутые обмотки разомкнуты (они сопря-

гаются с изоляционной частью 9 замыкающего цилиндра 7). Все обозначения такие же, как на рис. 13.6 и 13.7.

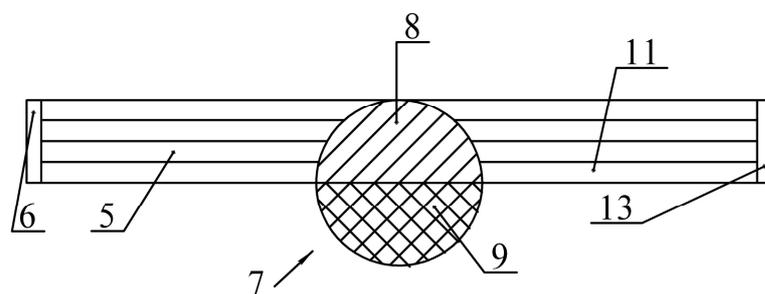


Рис. 13.7. Поперечное сечение вторичного элемента для случая, когда основная и дополнительная короткозамкнутые обмотки полностью закорочены электропроводящей частью замыкающего цилиндра

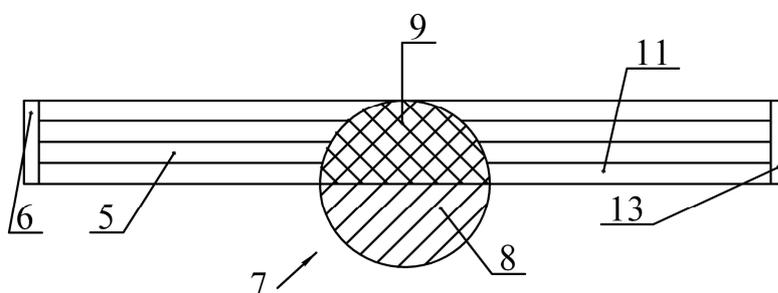


Рис. 13.8. Поперечное сечение вторичного элемента для случая, когда основная и дополнительная короткозамкнутые обмотки разомкнуты и сопрягаются с изоляционной частью замыкающего цилиндра

Рис. 13.9 показывает, что стержни основной обмотки полностью закорочены электропроводящей частью 8 замыкающего цилиндра 7, а стержни 11 дополнительной короткозамкнутой обмотки лишь частично закорочены электропроводящей частью. Все обозначения такие же, как на рис. 13.6-13.8.

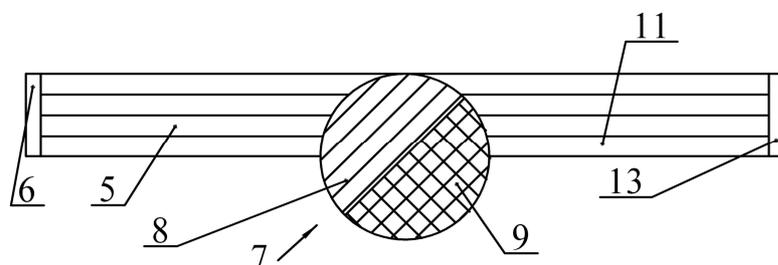


Рис. 13.9. Поперечное сечение вторичного элемента для случая, когда стержни основной обмотки полностью, а стержни дополнительной короткозамкнутой обмотки частично закорочены электропроводящей частью замыкающего цилиндра

Рассмотрим принцип работы данного линейного асинхронного двигателя.

При подключении многофазной (трехфазной) обмотки 2 к источнику трехфазного напряжения создается бегущее магнитное поле, пересекающее стержни 5 короткозамкнутой обмотки вторичного элемента и наводящее в них электродвижущие силы. Под действием ЭДС в стержнях 5 потекут переменные токи, взаимодействующие с бегущим магнитным полем. В результате этого взаимодействия создается тяговое усилие, перемещающее индуктор в сторону, противоположную направлению перемещения бегущего магнитного поля. Для увеличения пускового усилия увеличивают активное сопротивление обмотки вторичного элемента, замыкая, например, по одному стержню 5 в каждом пазу вторичного элемента. Для этого замыкающий цилиндр 7 при помощи рукоятки 10 поворачивают вокруг своей оси так, чтобы он замыкал по одному стержню 5. Для регулирования скорости движения индуктора, состоящего из сердечника 1 и обмотки 2, изменяют число закороченных стержней 5 вращением замыкающего цилиндра 7. Замыкающий цилиндр 7 может замыкать одновременно все стержни 5 основной и стержни 11 дополнительной короткозамкнутых обмоток (см. рис. 13.7). При этом основной индуктор, состоящий из сердечника 1 с обмоткой 2, и дополнительный индуктор, состоящий из сердечника 14 с обмоткой 15, будут двигаться с одинаковыми скоростями. Для этого к источнику трехфазного напряжения подключается обмотка 15 дополнительного индуктора. При этом создается бегущее магнитное поле, пересекающее стержни 11 и наводящее в них ЭДС и токи. При взаимодействии этих токов с бегущим магнитным полем дополнительного индуктора будет создаваться тяговое усилие, перемещающее дополнительный индуктор в сторону, противоположную бегущему магнитному полю. Если обе короткозамкнутые обмотки (стержни 5 и стержни 11) будут замкнуты полностью электропроводящей частью 8 цилиндра 7 (см. рис. 13.7), то основной и дополнительный индуктор будут двигаться с одинаковыми скоростями.

Для остановки обоих индукторов поворачивают цилиндр 7 так, что стержни 5 и 11 короткозамкнутых обмоток сопрягаются изоляционной частью 9 цилиндра 7 (см. рис. 13.8).

Если поворотный цилиндр 7 установить так, что его электропроводящая часть 8 будет замыкать в короткозамкнутых обмотках, состоящих из стержней 5 и 11, не одинаковое количество стержней (см. рис. 13.9), то основной и дополнительный индуктор будут двигаться с разными скоростями. Основной индуктор будет двигаться с большей скоростью, так как его короткозамкнутая обмотка, состоящая из стержней 5, имеет меньшее активное сопротивление, чем дополнительная обмотка, которая состоит из стержней 11, у которой при этом замкнуто меньшее число стержней 11 и которая имеет большее активное сопротивление (см. рис. 13.9).

Таким образом, ЛАД позволяет одновременно регулировать скорости движения двух индукторов при помощи одного замыкающего цилиндра.

Рассмотрим еще одну конструкцию ЛАД (регистрационный номер заявки 2312448).

Линейный асинхронный двигатель (см. рис. 13.10) содержит индуктор, состоящий из сердечника 1 с трехфазной обмоткой 2, и вторичный элемент 3, содержащий сердечник 4 с пазами. В пазы вторичного элемента уложены изолированные друг от друга электропроводящие стержни 5, замкнутые с одной стороны общей шиной 6, а с другой стороны подвижным замыкающим элементом 7. Замыкающий элемент состоит из электропроводящей и изолированной частей, примыкающей к зубчатой рейке 8, связанной с зубчатым колесом 9.

На рис. 13.11 изображен фрагмент поперечного сечения вторичного элемента 3 ЛАД, в сердечнике 4 которого расположены основные пазы 10 и дополнительные пазы 11.

На рис. 13.12 показана часть 12 подвижного элемента 7 (вид сверху), у которого чередуются выступы 13, равные по ширине основным пазам 10, с выступами 14, равными по ширине дополнительным пазам 11, причем высота выступов 13 и 14 равна удвоенной высоте

паза  $2h_{\pi}$ . При этом части выступов, равные по ширине основным пазам, на высоте от  $h_{\pi}$  до  $2h_{\pi}$  электропроводны, а на высоте от 0 до  $h_{\pi}$  покрыты слоем изоляции 15. Части выступов, равные по ширине дополнительным пазам, на высоте от 0 до  $h_{\pi}$  электропроводны, а на высоте от  $h_{\pi}$  до  $2h_{\pi}$  покрыты слоем изоляции 16. Электропроводящая полоса, соединяющая выступы 13 и 14, покрыта слоем изоляции 17.

На рис. 13.13, а, б показана соответственно часть 12 подвижного элемента 7 в поперечных сечениях А-А и В-В, основу которой составляет электропроводящая гребенка 18.

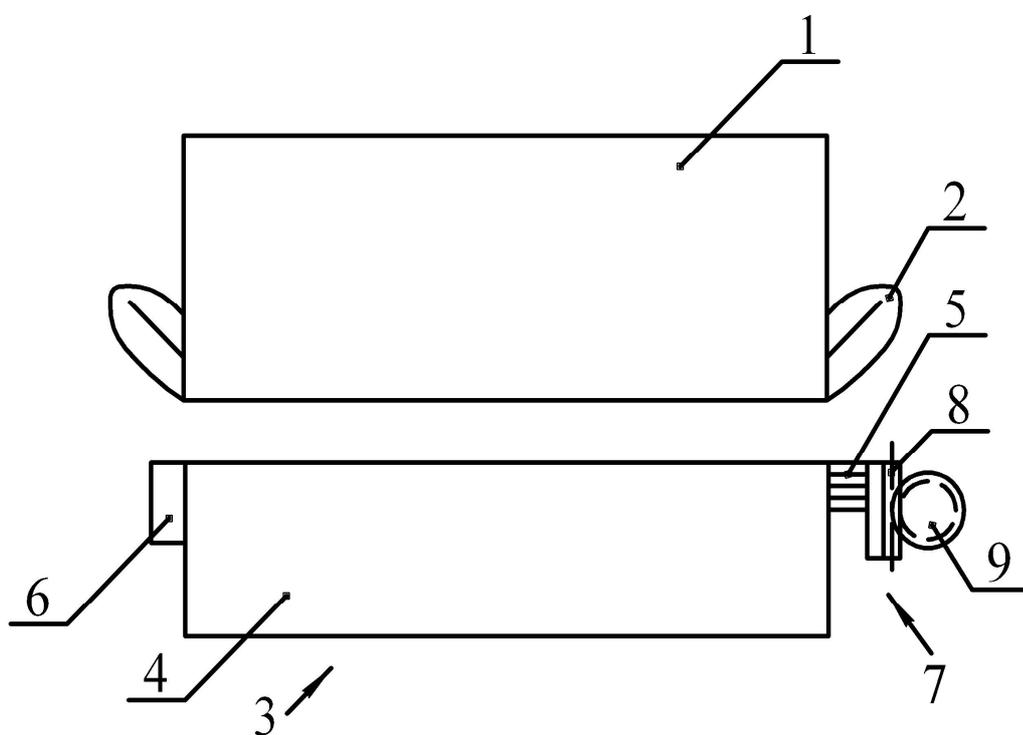


Рис. 13.10. Конструкция линейного асинхронного двигателя

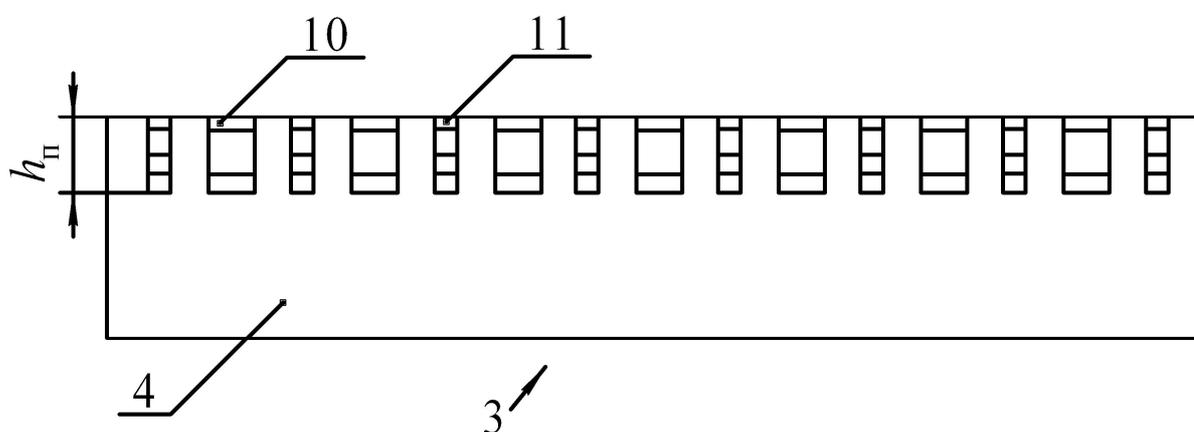


Рис. 13.11. Фрагмент поперечного сечения вторичного элемента ЛАД

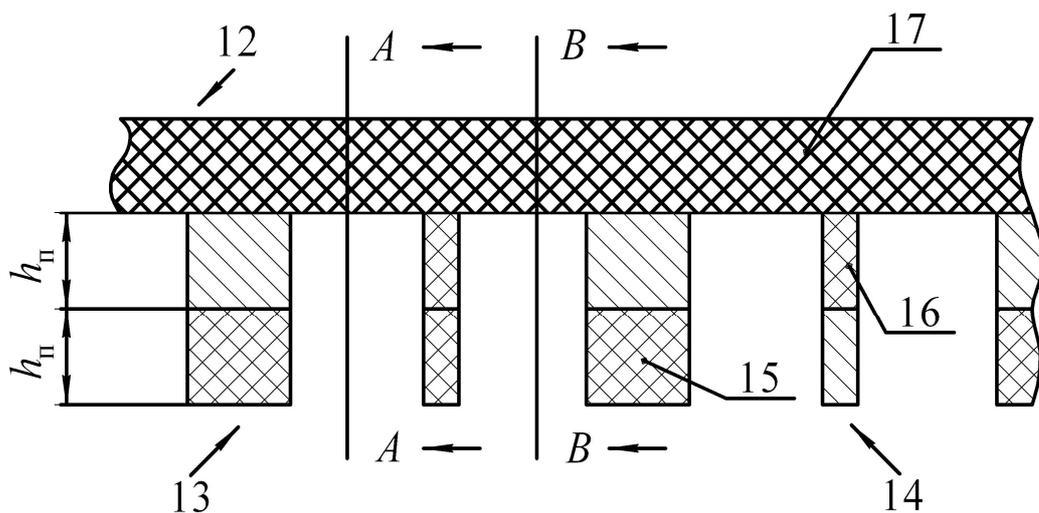


Рис. 13.12. Вид спереди части подвижного элемента ЛАД

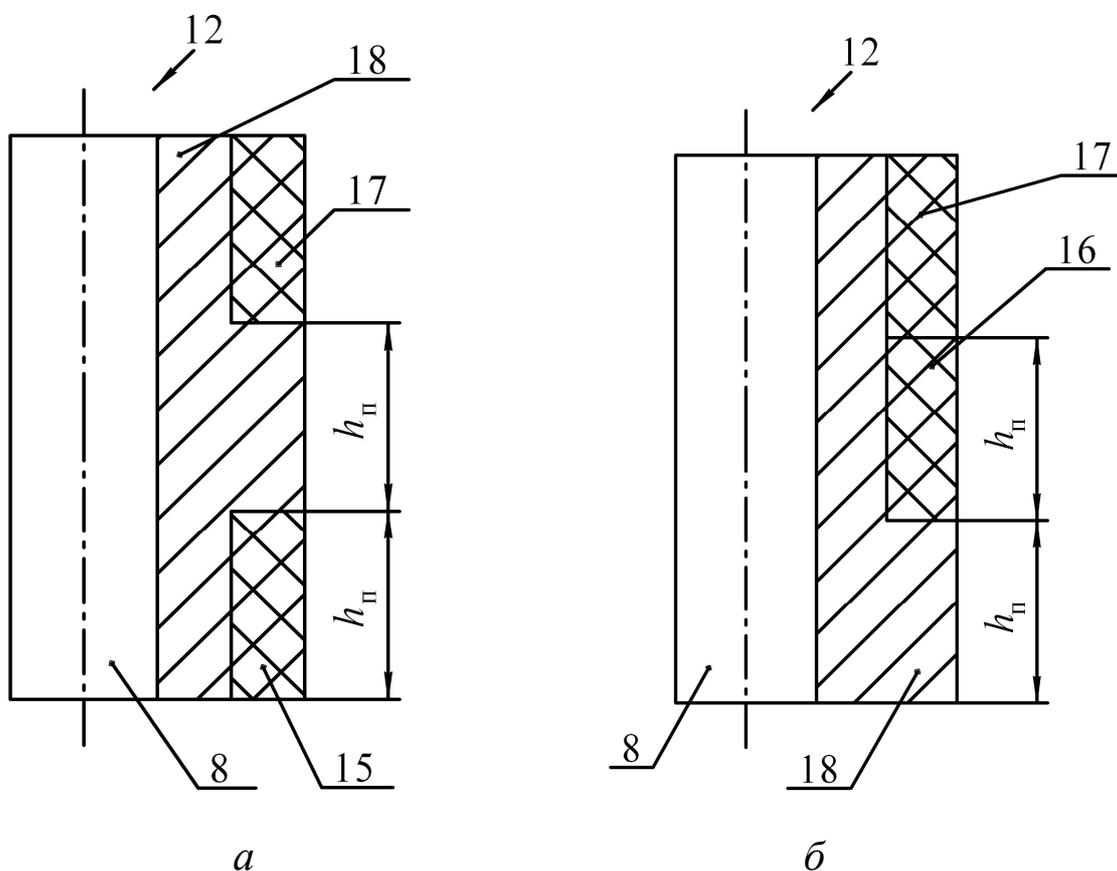


Рис. 13.13. Поперечные сечения *A-A* и *B-B* подвижного элемента ЛАД

Рассмотрим работу линейного асинхронного двигателя.

При подключении обмотки 2 к источнику трехфазного напряжения возбуждается бегущее магнитное поле, пересекающее стержни обмотки вторичного элемента 3 и наводящее в них ЭДС. Под действием ЭДС в стержнях протекают переменные токи, вступающие во взаимодействие с бегущим магнитным полем. В результате этого

взаимодействия создается тяговое усилие, перемещающее индуктор в сторону, противоположную направлению перемещения магнитного поля. Для расширения диапазона регулирования скорости перемещения индуктора изменяется площадь контакта между изолированными друг от друга электропроводящими стержнями 5 и подвижным замыкающим элементом 7. При этом поочередно замыкают стержни 5 вторичного элемента 3. Для этого приводят в движение зубчатое колесо 9, которое, поворачиваясь, перемещает вверх зубчатую рейку 8, а вместе с ней и подвижный замыкающий элемент 7, электропроводящая часть которого выполнена в виде гребенки. Выступы 13 гребенки, не покрытые изоляцией, замыкают, например, только по одному электропроводящему стержню. В каждом основном пазу 10 вторичного элемента 3 создается короткозамкнутая обмотка, в которой протекает ток за счет действия электродвижущей силы, наведенной бегущим магнитным полем. При взаимодействии бегущего магнитного поля с токами в стержнях создается усилие, перемещающее индуктор ЛАД в сторону, противоположную направлению перемещения бегущего магнитного поля. При дальнейшем перемещении подвижного элемента 7 вверх выступы 13 будут замыкать большее число электропроводящих стержней в каждом основном пазу 10. Сопротивление короткозамкнутой обмотки, образованной электропроводящими стержнями, лежащими в основных пазах сердечника 4 вторичного элемента 3, общей шиной 6 и общей шиной электропроводящей части 18 подвижного элемента 7, покрытой слоем изоляции 17, будет уменьшаться. Следовательно, будет увеличиваться скорость движения ЛАД. При дальнейшем перемещении вверх подвижного элемента 7 в областях, занятых основными пазами 10, окажутся части выступов 13, покрытые слоем изоляции 15. Цепь обмотки вторичного элемента разомкнется, т.к. электропроводящие стержни, лежащие в пазах 10, не будут замкнуты. При этом выступы 14 будут примыкать своими неизолированными частями к электропроводящим стержням, лежащим в дополнительных пазах 11. Будет образована новая короткозамкнутая обмотка, в которую входят электропроводящие стержни, лежащие в дополнительных пазах 11 и замкнутые с од-

ной стороны общей шиной 6, а с другой стороны электропроводящими (неизолированными) частями выступов 14 и общей шиной электропроводящей части 18 подвижного элемента 7. Изменяя число замкнутых электропроводящих стержней в каждом дополнительном пазу 11 сердечника 4 вторичного элемента 3, регулируют скорость движения ЛАД и величину тягового усилия. Диапазон регулирования расширяется, т.к. получено как бы два ЛАД в одной конструкции.

### 13.5. ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР

Для генерирования электрической энергии могут применяться линейные электрические генераторы.

Рассмотрим одну из конструкций линейного электрогенератора (регистрационный номер заявки 2304341).

Сущность изобретения иллюстрирует рис. 13.14, на котором схематично показан предлагаемый линейный электрогенератор в разрезе. В корпусе 1 смонтирована электромагнитная система с кольцевой (круглой) индуктивной катушкой (соленоидом) 2 с цилиндрическим подвижным магнитом 3 внутри нее. Этот магнит помещен с радиальным зазором в соосную катушке немагнитную, токонепроводящую (например, пластиковую) трубку 4 с выступающими за пределы катушки концами. На торцах трубки установлены ограничительные элементы 5, определяющие крайние положения магнита при его челночном перемещении (показаны штрихами). Эти элементы, выполненные в конкретном случае в виде упругих неметаллических дисков (например, резиновых шайб), демпфируют ударные нагрузки на конструкцию электрогенератора и способствуют возвратному движению магнита в направлении катушки. В электронном блоке 6 с контактами для подсоединения потребителя может предусматриваться накопитель.

Относительные размеры составных элементов в представленном электрическом генераторе находятся в следующих пределах:  $D_C/d_C = 1,5-2,5$ ;  $L_M/D_M = 0,75-1,25$ ;  $L_C/L_M = 0,75-1,25$ ;  $L_F/L_M = 0,75-1,5$ . При этом численные значения параметра  $L_F$  для правого и левого торцов трубки могут различаться.

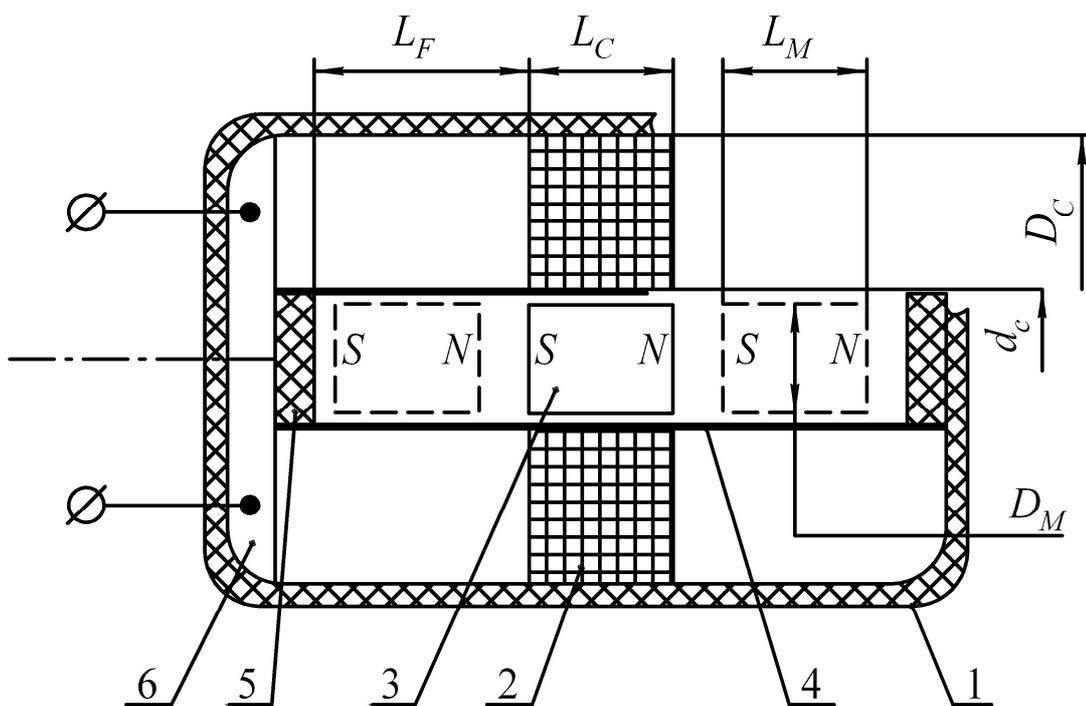


Рис. 13.14. Поперечный разрез линейного электрогенератора

Для получения электрических импульсов необходимо челночное движение магнита относительно катушки, которое можно осуществить, например, силовым воздействием на корпус электрогенератора: ручной встряской, колебаниями при ходьбе (беге) или при движении транспортного средства (велосипеда, автомобиля) и т.д. Можно также непосредственно воздействовать на магнит от специального приводного устройства.

Образцы электрогенератора, изготовленные в соответствии с заявленными геометрическими характеристиками, продемонстрировали легкость в обращении, наряду с эффективной и надежной работой, осуществимость быстрого челночного движения генерирующего магнита без перекосов и заклинивания.

Примером является изготовленный образец электрогенератора с катушкой из 2350 витков медной проволоки диаметром 0,2 мм с абсолютными размерами составных элементов (в мм):  $D_C = 36$ ,  $d_c = 17$ ,  $L_C = 15$ ,  $L_M = 12$ ,  $D_M = 14$ ,  $L_F = 15$  (соотношение размеров:  $D_C/d_c = 2,12$ ;  $L_M/D_M = 0,86$ ;  $L_C/L_M = 1,25$ ;  $L_F/L_M = 1,25$ ). При длине 60 мм этот образец легко умещается в руке; им легко манипулировать (трясти) для выработки импульсов тока. За 30 секунд такой операции выраба-

тывается электроэнергия, достаточная для питания светодиодного комнатного светильника, в течение нескольких минут.

Генерирующий магнит изготавливается из обладающего большой магнитной силой сплава (например, самарий-кобальт, неодим-железобор). Тело магнита может быть сплошным или состоять из нескольких частей с различными характеристиками (это определяется, в частности, возможностями изготовления магнита). Для большинства применений целесообразно изготавливать соленоид из медной проволоки диаметром от 0,15 мм до 0,5 мм, наматывая его в количестве от 2000 до 5000 витков (минимальному диаметру соответствует наибольшее из этих чисел, а максимальному диаметру – наименьшее).

Представленная выше конструкция линейного электрогенератора может быть усовершенствована. В частности, ограничительный элемент для генерирующего магнита может размещаться как непосредственно в трубке 4, так и вне ее. Он может выполняться в виде упругой диафрагмы, пружины (например, пластинчатой) или магнита, обращенного к генерирующему одноименным полюсом. Ограничительным элементом может быть непосредственно торцевая поверхность канала или корпусная часть электрогенератора. В одном образце электрогенератора на противоположных концах канала могут предусматриваться разные ограничительные элементы, причем на различном расстоянии  $L_F$  от катушки. (Очевидно, что для электрогенератора с несколькими установленными в ряд катушками расстояние  $L_F$  отмеряется от ограничительного элемента до ближайшей, соседней, катушки.)

Областью применения изобретения является, в первую очередь, питание маломощных потребителей тока, таких как сигнальные маячки, портативные радиоприемники и радиопередатчики, сотовые телефоны, портативные электрические фонари и тому подобные устройства, особенно в аварийных условиях, когда отсутствует возможность подзарядки штатных систем питания перечисленных устройств от других источников тока. Предложенный линейный электрогенератор может быть частью автономного блока питания или может встраиваться в упомянутые устройства, как ручные, так и носимые на теле.

Предложенный линейный электрогенератор удобно монтируется на разнообразных механических устройствах, в частности на колес-

ных транспортных средствах. Например, электрогенератор можно установить на раме или передней вилке велосипеда, расположив ось катушки параллельно оси колеса. При этом на колесных спицах крепятся по окружности один или несколько приводных магнитов, обращенных к генерирующему одноименными полюсами, чтобы при вращении колеса приводной магнит периодически располагался напротив генерирующего, толкая его в дальний конец катушечного канала. Здесь необходимо предусмотреть магнит или пружинный элемент для возврата генерирующего магнита к колесу. Таким образом, при вращении колеса генерирующий магнит будет совершать челночное движение, вырабатывая ток. Опытный образец подобного устройства показал, что уже при движении велосипеда со скоростью пешехода электрогенератор вырабатывает ток с параметрами, достаточными для питания велосипедного фонаря, для слушания портативного радиоприемника и т.п.

Аналогичный велосипедному электрогенератор хорошо вписывается и в компоновку ветроэлектроагрегата. Вырабатываемого при этом тока достаточно, по меньшей мере, для освещения в ночное время приусадебного участка, периметра охранной зоны (например, аэродрома) и т.п. Предложенный линейный электрогенератор может успешно применяться для выработки электрической энергии при движении разного рода транспортировочных устройств. Например, снаружи лифтовой кабины могут монтироваться ряд генерирующих блоков, а на стенках лифтовой шахты – соответствующий ряд приводных магнитов. Вырабатываемый ток может использоваться в целях освещения кабины.

#### **Глава 14. САМОСТОЯТЕЛЬНОЕ ОВЛАДЕНИЕ УЧЕБНЫМ МАТЕРИАЛОМ КАК СПОСОБ ОРГАНИЗАЦИИ УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СТУДЕНТОВ**

Овладение знаниями осуществляется по дидактическим законам, суть которых сводится к следующему.

1. Всякий, кто желает развиваться и овладевать знаниями, должен достигать это своим собственным трудом, собственным напряжением воли, собственной настойчивостью, целеустремленностью,

вниманием и добросовестностью. Извне можно получить только информацию и побуждение.

2. Для успешной познавательной деятельности необходимо осознание и принятие цели деятельности, чёткое представление о том результате, который желательно получить, а также о тех методах и средствах, использование которых необходимо для достижения поставленной цели.

Построить собственный «инструмент» мышления можно только в результате самостоятельной, осознанной, активной и целенаправленной работы над текстами, отражающими структуру и содержание изучаемого материала.

Многие студенты зачастую не обладают необходимым набором учебных навыков, позволяющих им быстро адаптироваться к новой учебной среде, принять соответствующую стратегию обучения, эффективно пользоваться свободой выбора, предоставляемой современными вузами. При решении проблемы обучения студентов эффективным учебным навыкам можно использовать информационные технологии обучения, дающие возможность выделения на изучение материалов столько времени, сколько требуется конкретному студенту для приобретения необходимых навыков в ходе его самостоятельной работы. Возможно применение разных способов, позволяющих интегрировать информационные технологии обучения в учебно-воспитательный процесс с целью развития учебных навыков:

– привлечение одних студентов к консультированию других (подготовка обзорных страниц для работы с материалом; участие в виртуальной консультационной группе, работающей с помощью электронной почты);

– конспектирование материала (сравнение конспектов студентов с электронными материалами, обсуждение их отличий; размещение лучших конспектов студентов наряду с материалами преподавателя в электронной библиотеке; создание студентами навигационных схем и терминологических словарей для изучаемой дисциплины);

– развитие навыков письменного изложения (подготовка студентом письменных работ для включения в набор электронных материалов по изучаемой дисциплине, обсуждение другими студентами результатов этой работы в письменном виде через электронную почту; написание студентами комментариев-рецензий к творческим работам с последующим их обсуждением на традиционных и виртуальных семинарах; адаптация для различной аудитории предложенных преподавателем и подобранных самим студентом материалом по определенной теме);

– поиск информации (выполнение поиска необходимой информации, составление обзора и списка найденных адресов по определенной теме, при этом задание может выполняться коллективно с распределением отдельных фрагментов между студентами).

Рассмотрим один из возможных вариантов самостоятельной работы студентов. Заблаговременно (в предыдущем семестре) весь материал разбивается на отдельные темы. На каждую тему предлагается записаться двум студентам, один из которых должен выступить основным докладчиком, второй – содокладчиком. Студентам ставится задание поиска научно-технической информации по теме. Цель – научиться осуществлять поиск необходимых источников информации, т.е. выработать умение ориентироваться в системе поиска, умение выбирать наиболее рациональную схему поиска информации, приобрести навыки использования вспомогательных источников, информационных и библиографических материалов.

В первые дни семестра на учебных занятиях студентам сообщается дополнительная литература по каждой теме и назначаются дни консультаций, на которые должен явиться каждый студент после самостоятельной проработки материала.

Чтение учебной и справочной литературы в целях подготовки к учебным занятиям (экзаменам) может быть интересным и плодотворным, но может превратиться в пустое времяпровождение. Можно добросовестно сидеть над учебниками и вместе с тем видеть, что у других получается гораздо лучше. В таких случаях многие склонны впадать в бессмысленное самобичевание или оправдываться отсут-

ствием способностей, не понимая, что истинная причина нередко кроется в неумении правильно читать.

Если вы хотите исправить положение, то, прежде всего, проанализируйте свой подход к процессу чтения и определите, насколько он эффективен. В качестве первого шага представьте себе, что вам задали прочитать книгу и изложить ее содержание. Каким будет ваш подход к выполнению этого задания? Еще до чтения нужно определить, какие части соответствующего текста (книги) могут представлять интерес, а какие – нет. Наметьте план действий. Определите, что вы хотите вынести из используемого источника, запишите вопросы, на которые необходимо получить ответы. По мере того как в процессе чтения вы будете находить на них ответы, последние будут «регистрироваться» вами, поскольку вопросы уже «сидят» у вас в голове. Без такого плана большая часть ценной информации может быть потеряна. Чтение учебника подряд может увести вас в сторону, поэтому сначала определите, где находится относящийся к вашему вопросу материал. В большинстве книг подходящими для этой цели являются оглавление и индекс. Используйте их при поиске нужного вам материала. Независимо от того, с какой скоростью вы читаете, вы сможете путем целенаправленного, селективного чтения сэкономить массу времени. Сортируйте поэтому свой материал для чтения и читайте лишь то, что вам безусловно нужно для получения информации.

Если книга принадлежит вам, то делайте в ней пометки, используйте маркер для выделения важных мест, чтобы их можно было потом легко найти (с библиотечных книг прежде снимите ксерокопию). Это обеспечивает последовательность в работе с книгой, ибо всякий раз, встретившись с вопросами, которые уже проработаны, можно восстановить по ним соответствующий ход мыслей.

Привыкайте к тому, чтобы важные тексты не только читать, но и обрабатывать после прочтения. Путем выделения важных мест (пометок, выписок из текста) вы обеспечиваете лучшее усвоение материала и облегчаете повторное чтение.

Смысл и преимущества пометок как вспомогательного средства при чтении состоят в следующем:

- пометками устанавливаются приоритеты, поскольку выделяются важные места;
- пометки помогают дополнительно структурировать текст (условные знаки);
- пометки облегчают нахождение при повторном прочтении важных мест текста;
- пометки способствуют тщательному обдумыванию и лучшему восприятию и запоминанию (не в последнюю очередь благодаря визуальному выделению нужных мест).

В качестве способов и методов маркировки текста возможны, например, разного рода подчеркивания, отметки и записи на полях, условные знаки и т. п.

Разработайте собственные обозначения. Лишь в том случае, если книга интенсивно проработана, т.е. содержит разнообразные подчеркивания и пометки, она становится по-настоящему ценным текстом. Если вы приспособились к какой-то определенной системе маркировки (например, каждый цвет имеет определенное значение), постарайтесь сохранить ее и регулярно использовать.

В то время как маркировка предназначается для выделения отдельных частей текста, задачей выписывания является «изъятие» важных мыслей, идей и т.п. К нему прибегают в тех случаях, когда хотят использовать выдержки из текста при подготовке.

При конспективном выписывании кратко записываются важнейшие составные пункты, тезисы, мысли и идеи текста. Подобный обзор содержания может быть важным подспорьем для запоминания и вспомогательным средством для нахождения соответствующих мест в тексте. С помощью конспективной выписки можно также составить представление о том, какие темы освещаются в различных местах разных книг. Дополнительное указание номеров страниц облегчает нахождение этих мест.

Как и техника маркировки текста, составление выписок предполагает разнообразные подходы с элементами творчества, например: выписка основных пунктов; выписка ключевых понятий и слов; различные комбинации указанных форм.

Разработайте свою собственную систему составления выписок и постоянно совершенствуйте ее! При составлении выписок целесообразно последовательно придерживаться освоенной системы. На этой базе можно составить свой архив или картотеку по теме.

При работе с учебной литературой в качестве обобщения по рациональному чтению могут служить принципы нижеследующего трех– или пятиступенчатого метода (метод SQ 3R), с помощью которого можно эффективно обработать соответствующую книгу.

### **1. Обзор.**

Сначала следует узнать, какую информацию несет книга в целом.

Прежде чем использовать учебную, справочную или дополнительную литературу, уточните, что вас интересует: расчетная формула, определение понятия, элементы теории, устройство машины и т. д. Подумайте, где наибольшая вероятность получить ответ на интересующий вас вопрос: в учебнике, справочнике или в дополнительной литературе.

После проработки таких вспомогательных материалов, как предисловие и введение; оглавление и текст на обложке; рубрики и подзаголовки глав; резюме и выводы; поименный и предметный указатель, можно уже судить о содержании и решить, какие разделы нужно прочитать.

### **2. Постановка вопросов.**

Пассивное чтение, имеющее целью лишь восприятие информации, недостаточно для того, чтобы творчески проработать прочитанное. Постановка вопросов к тексту стимулирует активное осознанное чтение, помогает отделить существенное от несущественного, читать критически и концентрированно, исключает необходимость повторного чтения, а также способствует повышению внимательности (мотивации к чтению).

### **3. Чтение.**

В зависимости от целей используют следующие виды чтения:

– чтение-просмотр, когда книгу просматривают бегло, изредка задерживаясь на отдельных страницах. Цель такого чтения – первое знакомство с книгой, получение общего представления об ее содержании, знакомство с оглавлением, просмотр введения, просмотр резюме (если таковое имеется);

– чтение выборочное, или неполное, когда читают основательно и сосредоточенно не весь текст, а только нужные места с определенной целью. При этом следует проанализировать, задуматься над тем, для чего вы читаете тот или иной раздел, чем мотивирован ваш выбор. Хороший читатель извлекает из текста нужную ему информацию за минимально короткое время;

– чтение полное, или сплошное, когда внимательно прочитывают весь текст с различного рода записями прочитанного.

Следующая ступень – целевое и концентрированное восприятие материала. Для этого можно воспользоваться вспомогательными средствами: различными выделениями в тексте, графиками, указаниями и ссылками. Отыскав в книге нужную вам главу, параграф или страницу, не стремитесь ограничиваться ее беглым просмотром, а выпишите необходимую для вас информацию: если это константа, то выпишите ее с указанием соответствующих единиц измерения; если это единица измерения физической величины, то уточните, в какой системе; если это формула, то выпишите ее и уточните физический смысл; читая о сущности понятия, устройства машины, выделите главное, мысленно или письменно представьте план прочитанного. По мере чтения выделяйте ключевые мысли, как можно более точно формулируя их на бумаге. Если у вас возникнут вопросы, запишите также и их. Закончив работу над разделом, проверьте, насколько хорошо вы усвоили прочитанное.

Для проработки специальной литературы рекомендуются следующие две ступени пятиступенчатого метода.

#### **4. Обобщение.**

Развитие мысли. Запоминание конкретных фактов и логических рассуждений, изложенных в книге, – безусловно, самое главное. Однако вы должны также попытаться развить и письменно изложить свою собственную точку зрения относительно прочитанного.

Прочитанный текст нуждается в обобщении, чтобы удостовериться, что материал усвоен. Особенно помогают при этом вопросы к тексту, которые ставятся в начале чтения.

Переход от постановки вопросов к чтению и обобщению материала поддерживает мотивацию к чтению и предотвращает наступление усталости.

## 5. Повторение.

Завершающее повторение служит сведению в единое целое отдельных результатов, полученных в ходе проработки текста, дополнению сделанных пометок, завершению работы над текстом, например с помощью выписок.

Целесообразно еще раз с помощью вопросов подстраховаться в том, что касается важнейших ответов и обобщений.

При определенной тренировке вопросы и критическое отношение к тексту возникают сами собой, исходя из интересов и соответствующего уровня знаний.

Ясно, что рациональное чтение может обуславливать также повторные просмотры того же материала, причем каждый из этих проходов по тексту служит определенной цели. Например: первый проход – селекция материала и установление последующих шагов; второй проход – ориентирующее, обобщающее, изучающее чтение; третий проход – углубленное (быстрое) чтение с пометками; четвертый проход – обобщающее чтение с целью перепроверки (постановка вопросов); пятый проход – повторное чтение с выписками.

Каждый вопрос темы изучается по литературе, рекомендуемой в библиографическом списке. Соответствие между номером главы и номером книги из библиографического списка приведено в табл. 14.1.

*Таблица 14.1*

**Соответствие между номером главы и номером книги  
из библиографического списка**

№ главы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14
№ книги	2	8	15	2, 5, 8, 15	9	1, 3, 6, 8, 9, 12, 14	8	13	2, 13	13	12	13	4, 7, 10, 11

Умение составлять резюме прочитанного – исключительно полезное качество, которое вырабатывается практикой. Пользуясь им, вы можете сократить объём материала, который вам необходимо выучить. Резюмируя материал, вы тем самым определяете, что в нём важно, а что нет.

Сознательно стремитесь к тому, чтобы сокращать объём информации, который необходимо выучить. Работая с книгой, старайтесь делать выписки наиболее важных мест в тетрадь, чтобы впоследствии исполь-

зовать их вместо книги. Глядя на страницу своих записей (или книги), **выделите на ней три наиболее важных положения**, т.е. таких, знание которых потребуется с наибольшей вероятностью. Запишите эти положения как можно короче – предложениями в одну строку.

Отмечайте места, которые, по вашему мнению, действительно следует запомнить (по объёму они составят, возможно, лишь небольшую долю страницы). Делайте ссылки на страницы по разделам резюме, а несколькими днями позже взгляните на него и попытайтесь медленно восстановить часть содержания книги, а если что-то забыли – взгляните на соответствующие страницы.

Стремитесь постепенно всё больше работать со своими резюме, а не с оригиналами источников. На то, чтобы перечитать резюме требуется гораздо меньше времени, чем на просмотр нескольких страниц оригинального текста. Постарайтесь, чтобы резюме охватывало все основные положения и идеи, которые необходимо усвоить.

Практикуйтесь в использовании резюме для восстановления в деталях содержания соответствующих тем. С помощью оригинального материала проверяйте, не пропущено ли что-то. Восполняйте эти пропуски несколькими словами в своём резюме так, чтобы в следующий раз они послужили вам подсказкой.

Резюме по тексту можно составить также посредством логической структуры. Преимущества логической структуры состоят в следующем:

- содержание текста перерабатывается так, чтобы правильно были представлены его внутренние взаимосвязи;
- удастся избежать многословия, поскольку опускаются соединительные слова, детали и т.д.;
- информация становится более обозримой и запоминаемой;
- выделенные ключевые слова помогают при последующем просмотре ассоциативно вспомнить о деталях.

Опорой для усвоения материала служат также схемы, использование которых развивает и делает привычной самопроверку после прочтения текста. Для примера на рис. 14.1, 14.2 приведены схемы классификации шаговых двигателей (ШД) по конструкциям и областям применения, разработанные дипломником одного из авторов данного учебного пособия.

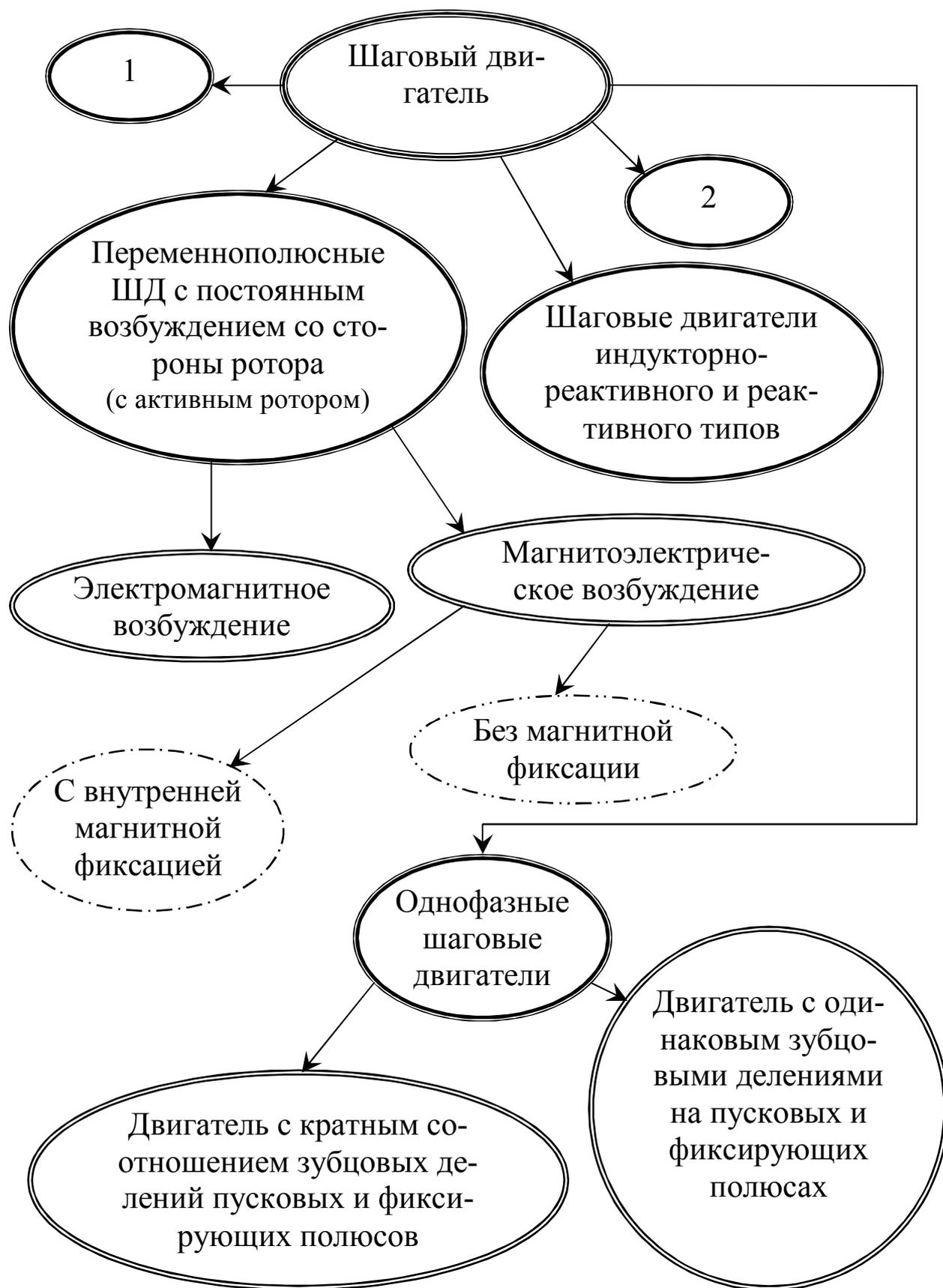
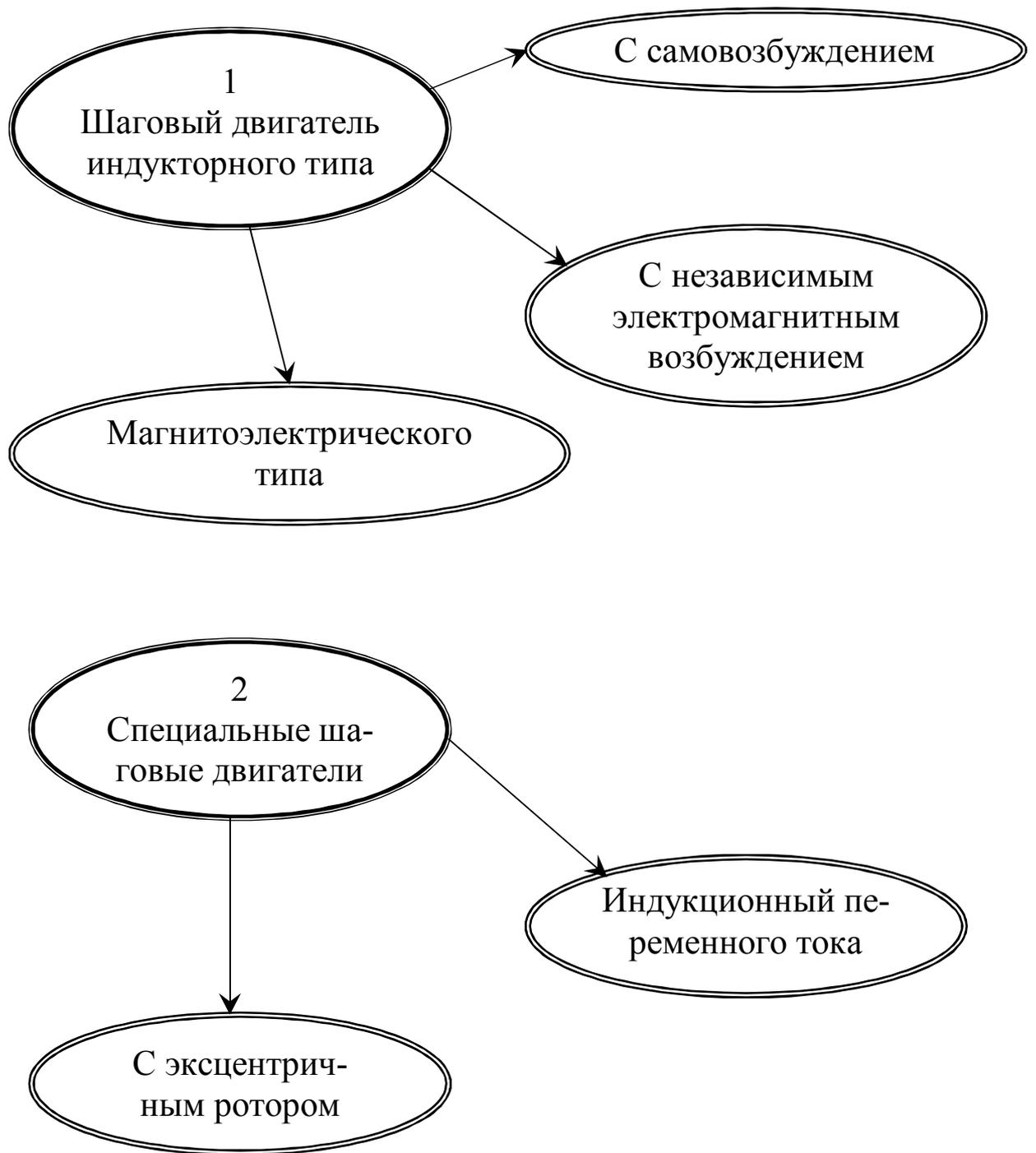


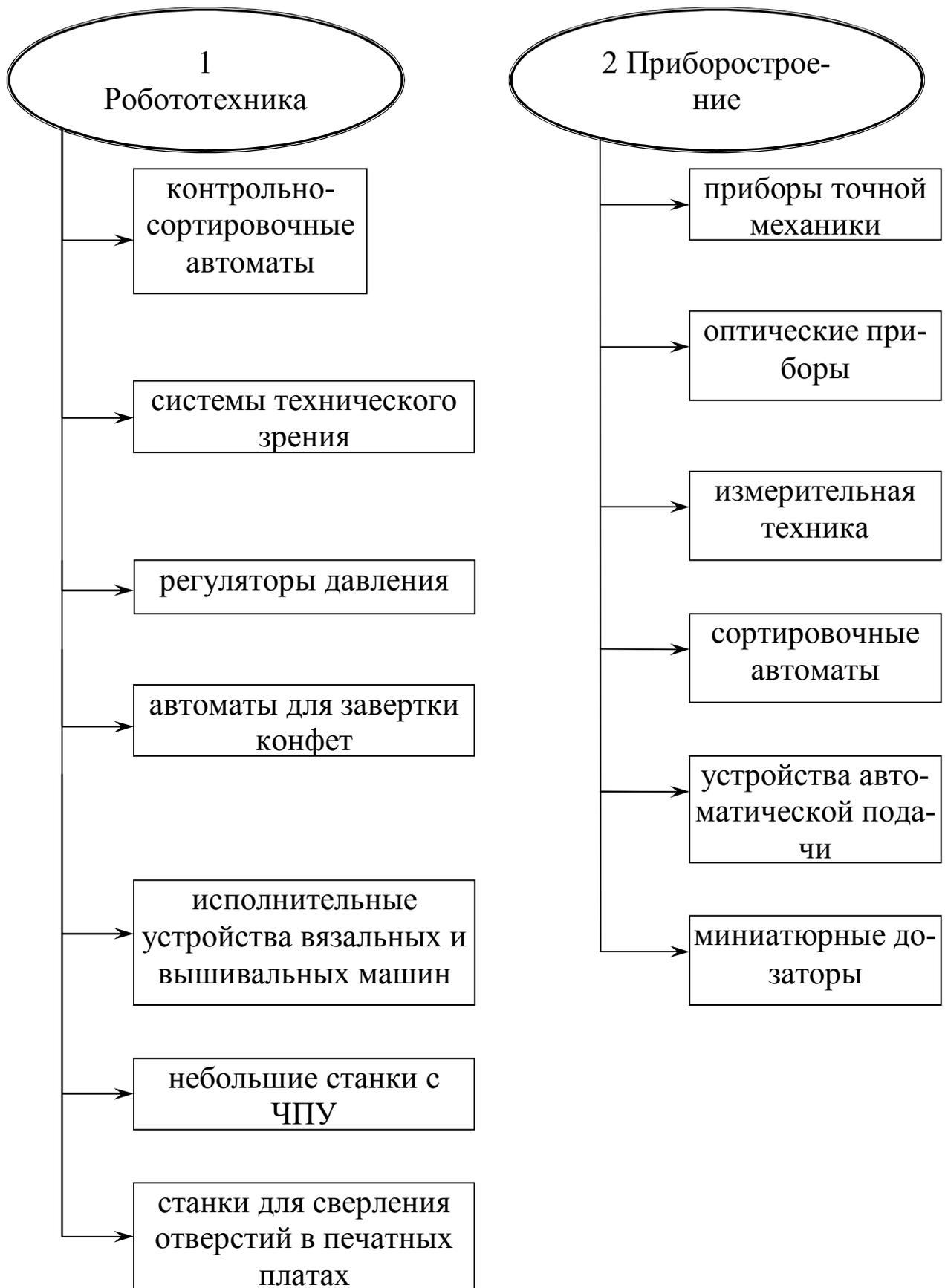
Рис. 14.1. Схема классификации конструкций ШД



Окончание рис. 14.1



Рис. 14.2. Схема классификации областей применения ШД



Окончание рис. 14.2

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие науки и техники, научно-технические исследования предполагают развитие и совершенствование конструкций и потребительских свойств существующих, а также разработку новых специальных электромеханических преобразователей. Поэтому конструкции, рассмотренные в данном пособии, не являются неизменными и установившимися.

Учебное пособие охватывает часть дисциплины «Конструкции, потребительские свойства, расчет и проектирование электромагнитных устройств и электромеханических преобразователей» и предназначено для изучения основ теории, конструкции, принципа действия, принципиальных схем и основных характеристик специальных машин переменного тока, проведения практических занятий по дисциплине. Кроме того, данное учебное пособие может быть использовано для самостоятельной работы студентов очной, очно-заочной и заочной форм обучения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алиев, И.И. Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах / И.И. Алиев. – М.: РадиоСофт, 2004. – 190 с.
2. Арменский, Е.В. Электрические микромашины: учеб. пособ. / Е.В. Арменский, Г.Б. Фалк. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1975. – 239 с.
3. Вольдек, А.И. Электрические машины: учеб-к для высш. учеб. заведений / А.И. Вольдек. – Л.: 1974. – 840 с.
4. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / Б.А. Ивоботенко, В.П. Рубцов, Л.А. Садовский и др.; под общ. ред. М.Г. Чиликина. – М.: Энергия, 1971. – 624 с.
5. Ермолин, Н.П. Электрические машины малой мощности / Н.П. Ермолин. – М.: Высш. шк., 1967. – 503 с.
6. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины: учеб-к для вузов / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
7. Исмаилов, Ш.Ю. Автоматические системы и приборы с шаговыми двигателями / Ш.Ю. Исмаилов. – М.: Энергия, 1968. – 136 с.
8. Кацман, М.М. Электрические машины и трансформаторы / М.М. Кацман. – М.: Высш. шк., 1971. – 416 с.
9. Костенко, М.П. Электрические машины: учеб-к: в 2 ч. / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1972. – 543 с. – Ч. 1.
10. Ратмиров, В.А. Шаговые двигатели для систем автоматического управления / В.А. Ратмиров, Б.А. Ивоботенко. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 126 с.
11. Сабинин, Ю.А. Автономные дискретные электроприводы с силовыми шаговыми двигателями / Ю.А. Сабинин, В.И. Кулешов, М.М. Шмырева. – Л.: Энергия, 1980. – 159 с.
12. Сипайлов, Г.А. Генераторы ударной мощности / Г.А. Сипайлов, К.А. Хорьков. – М.: Энергия, 1979. – 128 с.
13. Специальные электрические машины: Источники и преобразователи энергии: учеб. пособ. / А.И. Бертинов, Д.А. Бут, С.Р. Мизюрин и др. – М.: Энергоиздат, 1982. – 552 с.
14. Токарев, Б.Ф. Электрические машины: учеб. пособ. для вузов / Б.Ф. Токарев. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.
15. Хрущев, В.В. Электрические микромашины автоматических устройств: учеб. пособ. для вузов / В.В. Хрущев. – Л.: Энергия, 1976. – 384 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
Глава 1. Вспомогательные однофазные микродвигатели переменного тока .....	4
Глава 2. Специализированные асинхронные машины.....	10
2.1. Индукционный регулятор и фазорегулятор .....	10
2.2. Асинхронный преобразователь частоты.....	14
2.3. Электромагнитная асинхронная муфта.....	15
2.4. Асинхронный исполнительный двигатель .....	16
Глава 3. Гироскопические двигатели.....	19
3.1. Особенности работы электрических гиродвигателей. ....	20
3.2. Асинхронный гироскопический двигатель с ротором типа «беличья клетка».....	21
3.3. Синхронный гироскопический двигатель .....	23
3.4. Гироскопический двигатель типа «шар» .....	24
Глава 4. Гистерезисные двигатели .....	26
4.1. Конструкции и потребительские свойства гистерезисных двигателей ....	26
4.2. Гистерезисные микродвигатели .....	30
4.3. Энергетические показатели гистерезисных машин .....	38
Глава 5. Синхронизированный асинхронный двигатель .....	42
Глава 6. Коллекторные машины переменного тока.....	43
6.1. Краткая история развития асинхронной коллекторной машины .....	43
6.2. Основные понятия.....	46
6.3. Однофазный коллекторный двигатель последовательного возбуждения .....	47
6.4. Репульсионный двигатель с двумя обмотками на статоре .....	53
6.5. Репульсионный двигатель с одной обмоткой на статоре .....	54
6.6. Трехфазный коллекторный двигатель. Регулирование частоты вращения и $\cos\varphi_1$ асинхронного двигателя введением в цепь ротора добавочной ЭДС.....	57
6.7. Трехфазный коллекторный двигатель с параллельным возбуждением. ....	61
Глава 7. Фазокомпенсатор .....	65
Глава 8. Синхронные параметрические (реактивные) двигатели (СРД) .....	68
8.1. Конструкции и принцип действия реактивных микродвигателей .....	69
Глава 9. Синхронные двигатели (СД) с пониженной частотой вращения.....	75
9.1. Редукторные микродвигатели .....	76
9.2. Синхронные двигатели с катящимся ротором (ДКР).....	81
9.3. Волновые микродвигатели .....	91
Глава 10. Синхронные муфты .....	97
Глава 11. Электромашинные накопители энергии.....	98
11.1. Униполярные генераторы. ....	99
11.2. Ударные генераторы. ....	100
Глава 12. Сверхпроводниковые электрические машины (СПЭМ).....	105

12.1. Материалы для СПЭМ .....	105
12.2. Степень использования СПЭМ .....	106
12.3. Классификация СПЭМ.....	108
Глава 13. Особенности специальных электромеханических преобразователей переменного тока.....	109
13.1. Асинхронно-синхронный двухчастотный генератор .....	109
13.2. Регулируемые электродвигатели переменного тока .....	112
13.3 Волновой электродвигатель с внутренним статором .....	117
13.4. Линейные асинхронные двигатели .....	120
13.5. Линейный электрический генератор.....	128
Глава 14. Самостоятельное овладение учебным материалом как способ организации учебной деятельности студентов .....	131
Заключение.....	144
Библиографический список.....	145

*Учебное издание*

**Конструкции и потребительские свойства  
электромеханических преобразователей  
переменного тока**

*ЧЕБОТКОВ Эдуард Галактионович*

*ТУЛУПОВ Павел Владимирович*

Редактор *С.В. Фокина*

Верстка *И.О. Миняева*

Выпускающий редактор *Н.В. Беганова*

Подп. в печать. 18.12.09.

Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Усл. п. л. 8,52. Уч.-изд. л. 8,49.

Тираж 50 экз. Рег. № 357/09.

---

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Самарский государственный технический университет»  
443100, г. Самара, Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии Самарского  
государственного технического университета  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус № 8