

## **Апухтин А.С.**

Электрические машины. Асинхронные машины: Конспект лекций для студентов направления подготовки: 6.050701 “Электротехника и электротехнологии”. Донецк: ДонНТУ, 2011. – 225 с.

Конспект лекций по асинхронным машинам является частью готовящегося учебного пособия по электрическим машинам. В разделе рассматриваются теория, принцип действия, устройство и анализ работы асинхронных машин как общего, так и специального назначения, получивших распространение в различных отраслях техники.

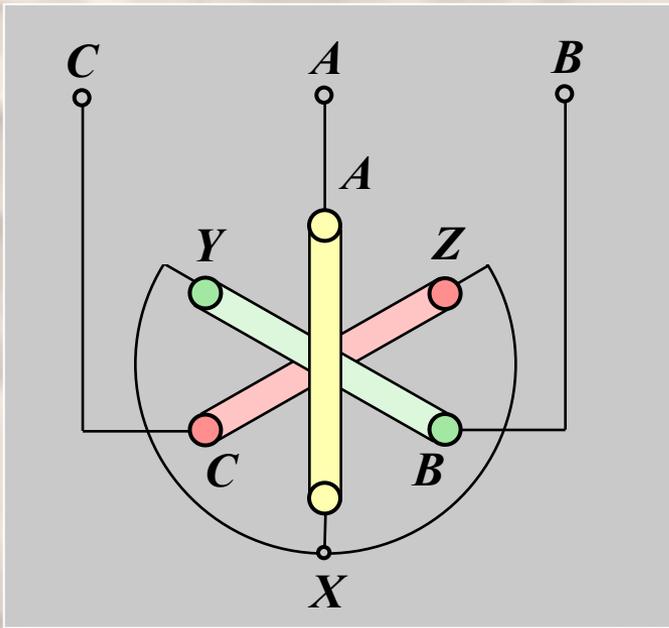
У т в е р ж д е н о на заседании учебно-издательского совета ДонНТУ (протокол № 5 от 01. 09. 11) № 450 – 13 у. п. л.

## РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ МАШИН И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

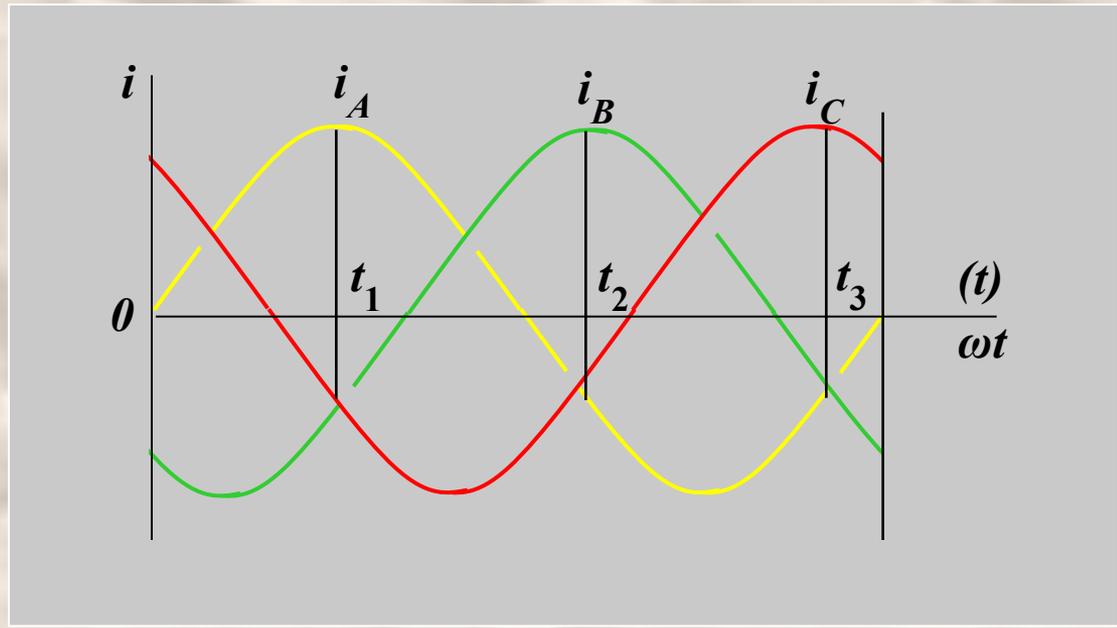
Асинхронные машины получаются из обобщенной машины, когда  $\omega_c \neq \omega_p$ . При этом поля статора и ротора неподвижны относительно друг друга, так как частоты токов в роторе и статоре связаны между собой соотношением  $f_2 = f_1 - s f_1$ , где  $f_1$  и  $f_2$  соответственно частоты статора и ротора. При этом  $s$  — скольжение или относительная угловая скорость (частота вращения):

$$s = (\omega_c - \omega_p) / \omega_c.$$

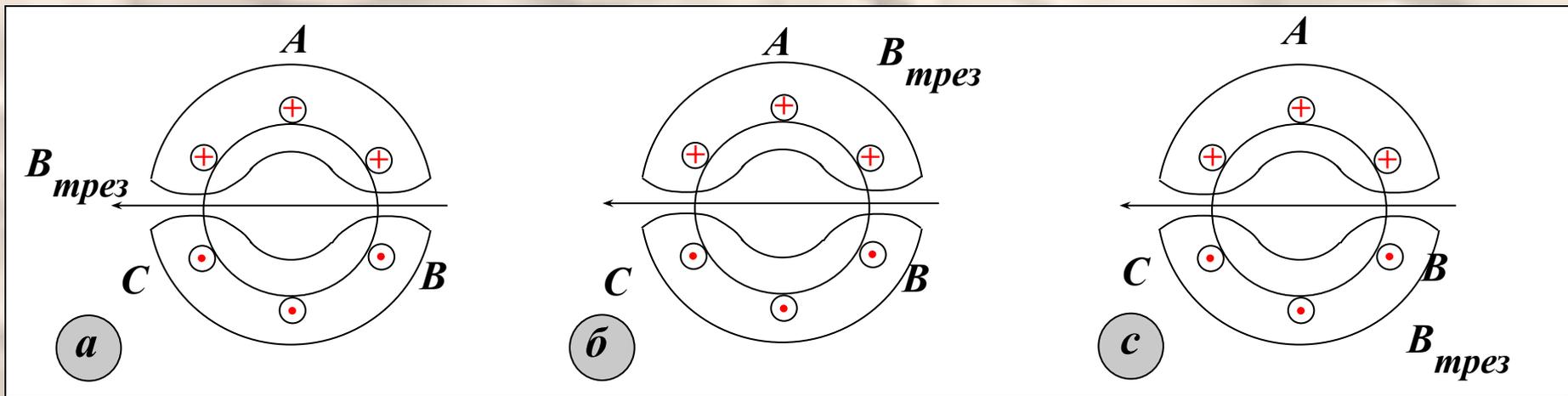
В асинхронных (несинхронных) машинах частота вращения ротора не равна частоте вращения поля в воздушном зазоре ( $\omega_c$ ). Механическая частота вращения ротора асинхронных машин в установившемся режиме может быть ниже и выше синхронной частоты вращения поля, при этом ротор может вращаться в сторону, противоположную вращению поля.



Устройство статора асинхронного двигателя



Временная диаграмма токов фаз обмотки статора



Создание вращающегося магнитного поля

В зависимости от частоты вращения и направления вращения ротора по отношению к полю различают четыре режима работы асинхронных машин (рис. 1).

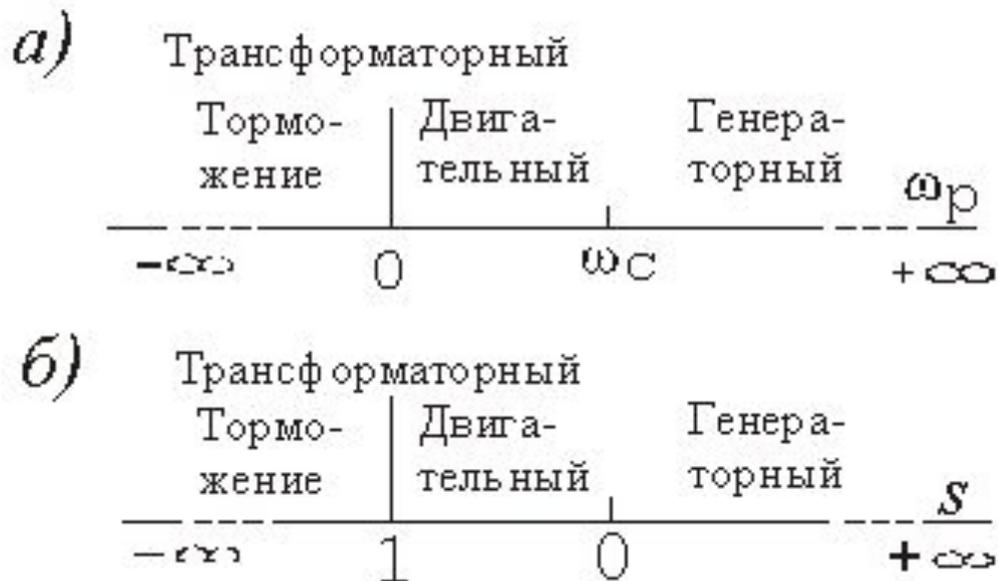
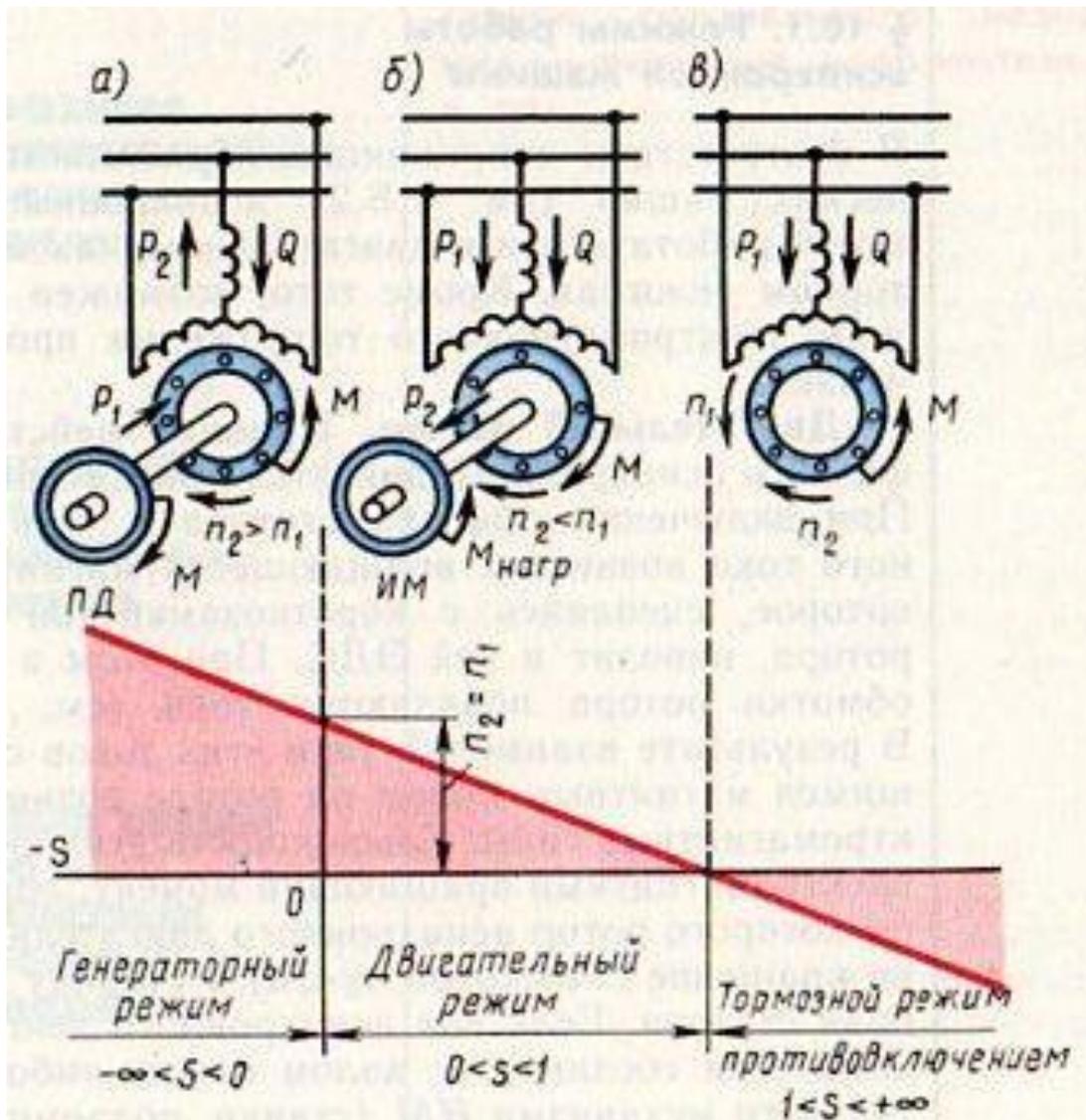


Рис.1. Режимы работы асинхронной машины: а - на шкале частоты вращения ротора; б - на шкале скольжения.



Режимы работы асинхронной машины

Когда  $0 < \omega_r < \omega_c$  имеет место двигательный режим, при  $\omega_r > \omega_c$  – генераторный режим. В этом режиме ротор вращается в ту же сторону, что и поле, но с большей частотой. В тормозном режиме ротор асинхронной машины вращается в сторону, противоположную вращению поля. Когда асинхронная машина эксплуатируется при неподвижном роторе ( $\omega_r = 0$ ), имеет место трансформаторный режим работы асинхронной машины (рис. 1, а).

В теории асинхронных машин широко применяется понятие скольжения – относительной частоты вращения [см. (1)]. Режимы работы асинхронной машины в функции скольжения представлены на рис. 1, б. В двигательном режиме при  $0 < s < 1$  асинхронная машина преобразует электрическую энергию в механическую. В генераторном режиме, когда  $0 < s > -\infty$ , ротор асинхронной машины вращается в сторону вращения поля с частотой, большей синхронной. При этом механическая энергия преобразуется в электрическую. В тормозном режиме механическая и электрическая энергии преобразуются в тепло.

Этот режим, как правило, может быть кратковременным и используется для быстрого останова. Трансформаторный режим, когда  $s = 1$ , используется для регулирования амплитуды и фазы напряжения.

Асинхронные машины наибольшее распространение получили как двигатели. Это основной двигатель, применяемый в промышленности, сельском хозяйстве и в быту. Только асинхронных двигателей единых серий мощностью от 0,6 до 400 *кВт* в нашей стране ежегодно выпускается около 10 млн. Асинхронных микродвигателей мощностью от 0,6 *кВт* изготавливается несколько десятков миллионов в год.

Электротехническая промышленность выпускает асинхронные двигатели в большом диапазоне мощностей. Предельная мощность асинхронных двигателей – несколько десятков мегаватт. В индикаторных системах применяются асинхронные двигатели мощностью от долей ватта до сотен ватт. Частота вращения двигателей общего назначения – от 3000 до 500 об/мин.

В генераторном режиме асинхронные машины применяются редко. Для создания поля в зазоре асинхронной машины необходима реактивная мощность, которая забирается из сети или от других источников реактивной мощности. Асинхронные двигатели не могут работать с  $\cos \varphi = 1$  Это существенный недостаток асинхронных машин, ограничивающий их применение в генераторном режиме.

При электромеханическом преобразовании энергии в асинхронных машинах, как и в других машинах, происходит преобразование энергии в тепло. Электрические потери в роторе асинхронной машины пропорциональны скольжению:

$$P_{эл2} = (P_{эм}) \cdot s,$$

где  $P_{эм}$  – электромагнитная мощность – мощность в воздушном зазоре машины.

Чтобы большая часть электрической энергии преобразовывалась в механическую, асинхронные машины используются в электроприводах, где допустимо небольшое скольжение ( $s = 1 \div 4\%$ ). При глубоком скольжении ( $s = 10 \div 50\%$ ) асинхронные машины используются редко, так как в этом случае большая часть мощности, забираемой из сети, преобразуется в тепло, что приводит к низкому КПД и увеличению габаритов асинхронной машины из-за трудностей, связанных с отводом тепла от активных частей машины.

Наличие в роторе потерь, пропорционально зависящих от скольжения, – одна из особенностей асинхронных машин, обуславливающих их отличие от других типов электрических машин.

Если обмотки ротора представляют собой замкнутые контуры, то при скольжении вся мощность, поступающая на ротор, преобразуется в тепло. При скольжении  $s = 0$  мощность на ротор не поступает. При скольжениях, отличных от 0 и 1, электромагнитная мощность преобразуется в двигательном режиме в механическую мощность и в тепло, а в генераторном режиме – в электрическую и в тепло.

В конструктивном исполнении асинхронные двигатели – наиболее простые, они получили наибольшее распространение.

## **КОНСТРУКЦИИ АСИНХРОННЫХ МАШИН**

Можно без преувеличения сказать, что промышленное производство приводится в движение асинхронными двигателями. В настоящее время асинхронные двигатели выпускаются единичными сериями в огромных количествах. Основная серия асинхронных машин 4А включает в себя двигатели от 0,4 до 400 *кВт*. Выпускаются высоковольтные машины в виде единой серии А4 на мощности свыше 400 *кВт*. Разработана единая серия асинхронных машин АИ.

**Конструкции асинхронных машин делятся на два основных типа: с короткозамкнутым ротором и фазным ротором. Наибольшее распространение получили двигатели с короткозамкнутым ротором, которые в серии 4А выполняются на все мощности, включая 400 кВт.**

Обмотки короткозамкнутых роторов выполняются литыми из алюминия или его сплавов. При заливке одновременно отливаются стержни, лежащие в пазах, и короткозамыкающие кольца с размещенными на их торцах вентиляционными лопатками и штырями для крепления балансировочных грузиков (см. рис. 2).

Короткозамкнутые роторы крупных машин и специальных асинхронных машин с улучшенными пусковыми характеристиками выполняются сварными. Стержни ротора из меди или латуни привариваются к короткозамыкающим кольцам, имеющим отверстия, куда перед сваркой вставляются стержни обмотки.

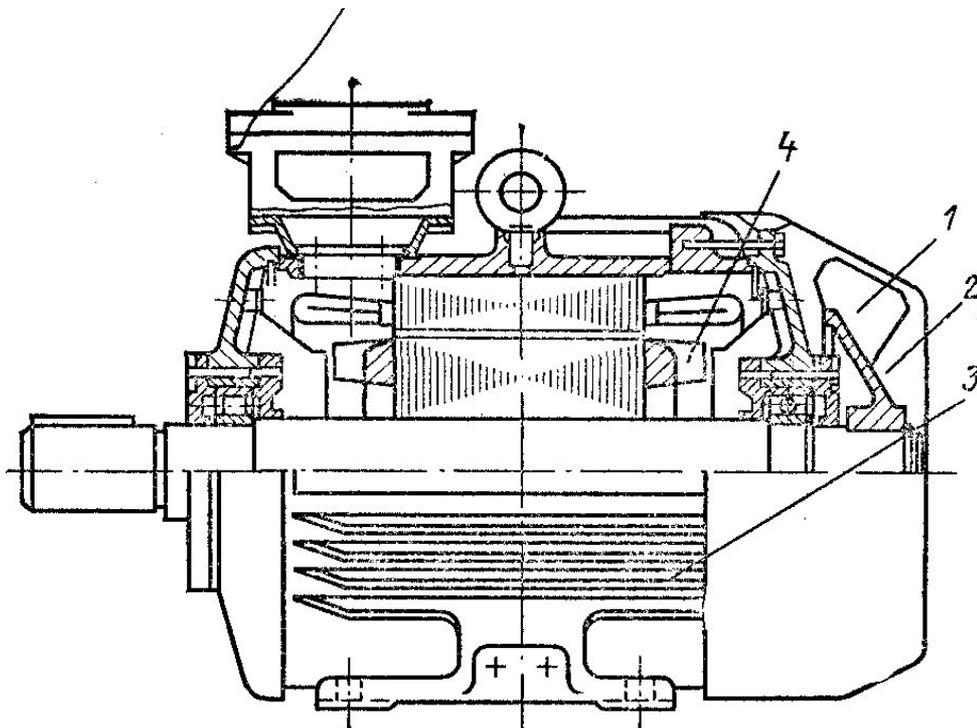


Рис 2. Асинхронный двигатель 4А250 (степень защиты 1Р44)

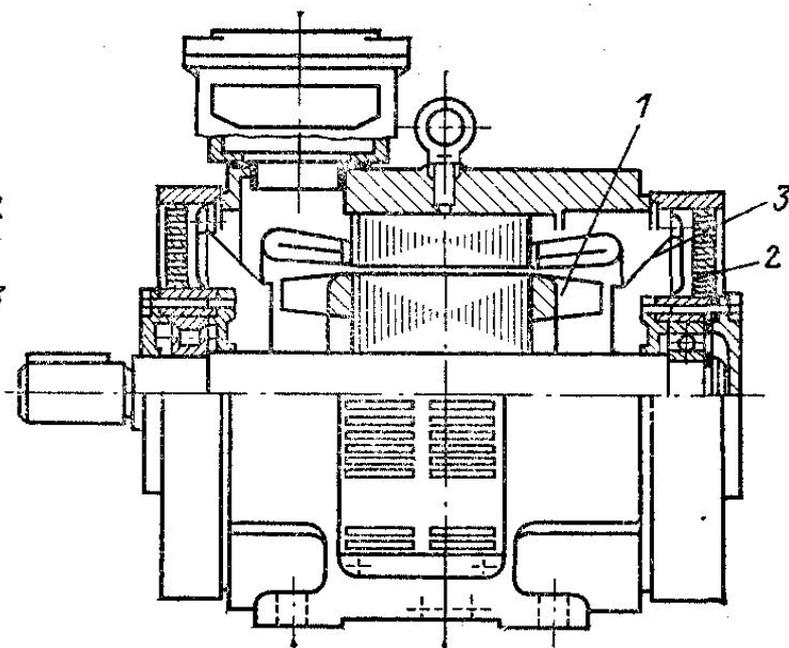
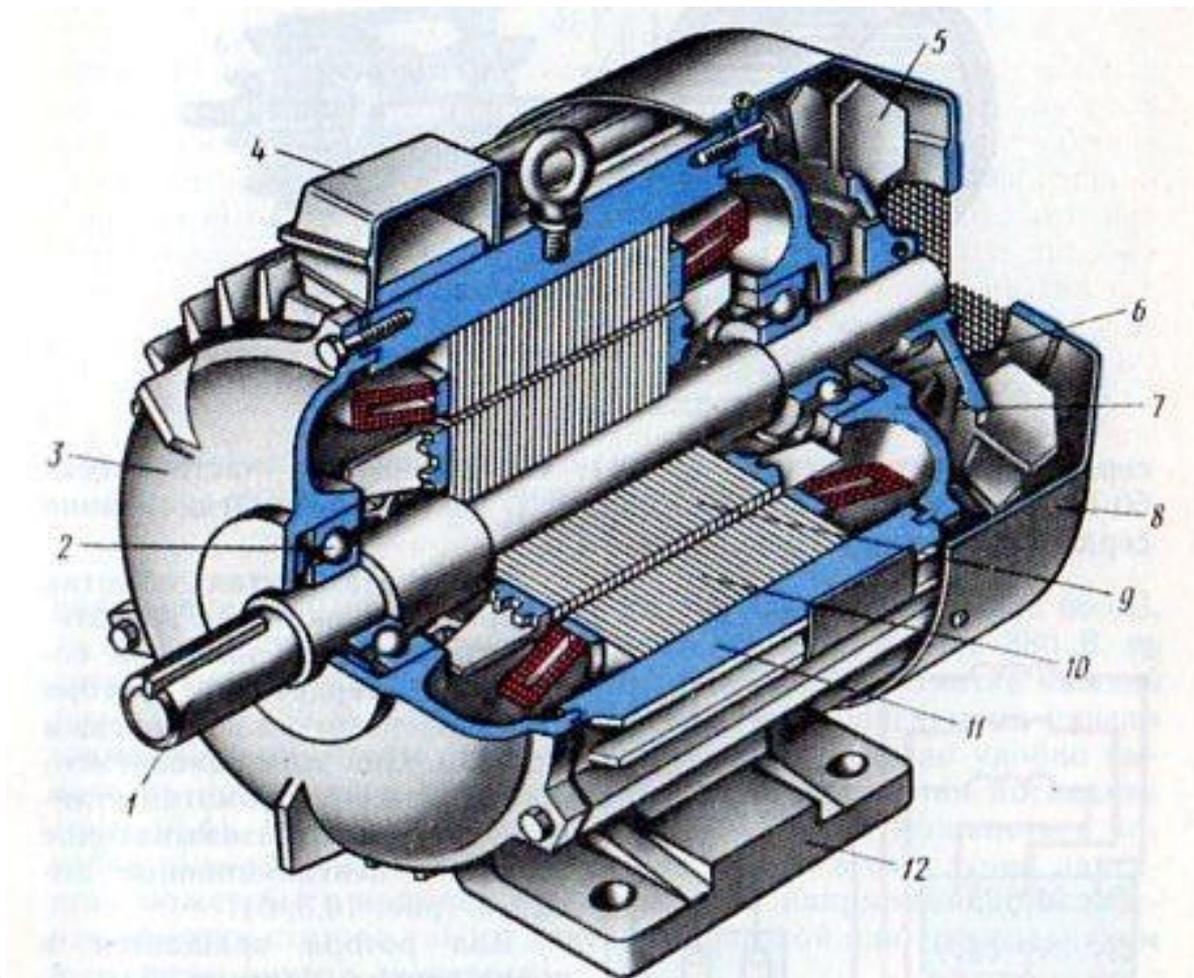
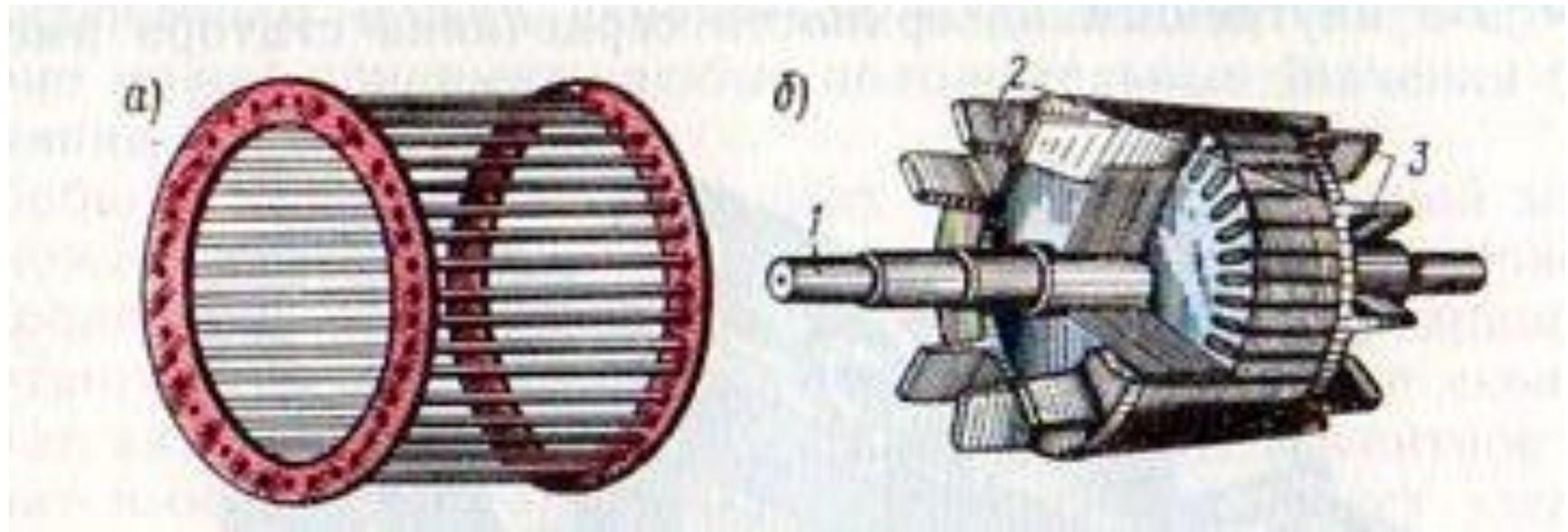


Рис. 3. Асинхронный двигатель 4АН250 (степень защиты 1Р23)



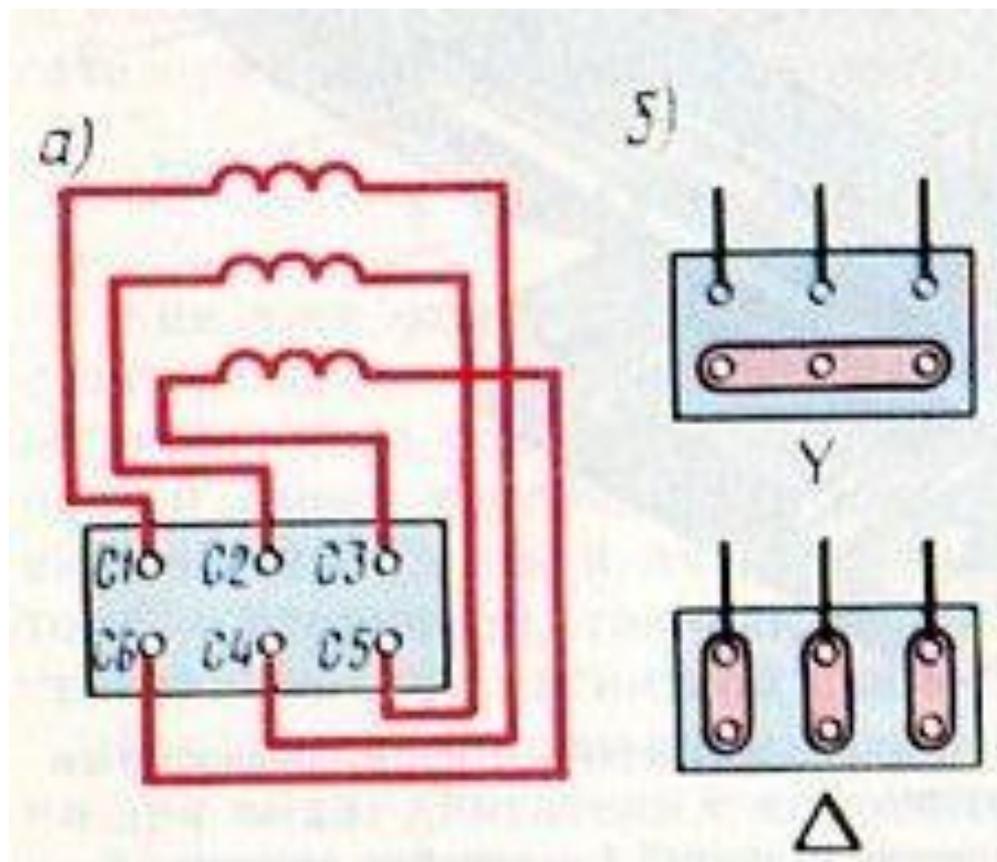
Устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

- 1 – вал; 2, 6 – подшипники; 3, 7 - подшипниковые щиты; 4 – коробка выводов; 5 – вентилятор; 8 – кожух вентилятора; 9 – сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой; 10 – сердечник статора; 11 – корпус; 12 - лапы



### Короткозамкнутый ротор:

*a* – обмотка «беличья клетка»; *б* – ротор с обмоткой, выполненной методом литья под давлением; 1 – вал 2 – короткозамыкающие кольца; 3 вентиляционные лопатки



Расположение выводов обмотки статора (а) и положение переключателей при соединении обмотки статора звездой и треугольником (б)

Асинхронные машины с фазным ротором имеют на роторе обмотку из круглых или прямоугольных проводов, которая выполняется так же, как и обмотка статора.

**Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором серии 4А можно разделить на две разновидности по степени защиты и способу охлаждения. Машины закрытые, защищенные от попадания внутрь ее брызг любого направления и предметов диаметром более 1 мм, имеют внешний обдув вентилятором (рис. 2). По стандарту это исполнение имеет обозначение 1Р44.**

Второй разновидностью конструкции являются машины с исполнением по степени защиты 1Р23 (рис. 3). В этих машинах обеспечивается защита от возможности соприкосновения пальцев рук и твердых предметов диаметром более 12,5 мм с токоведущими вращающимися частями машины. Исполнение 1Р23 предусматривает защиту от попадания внутрь машины капель, падающих под углом  $60^\circ$  к вертикали. Иногда такое исполнение называют каплезащищенным.

Наружный обдув в закрытых двигателях осуществляется вентилятором 1 (рис. 2), окруженным кожухом 2.

Для улучшения теплоотдачи станина 3 двигателя имеет продольные радиальные ребра. Вентиляционные лопасти ротора 4 перемешивают воздух внутри машины, отводя тепло от более нагретых лобовых частей обмотки.

В двигателях защищенного исполнения со степенью защиты IP23 применена двусторонняя симметричная радиальная система вентиляции (рис. 3). Воздух попадает в машину через отверстия в щитах, а выходит через отверстия в станине. Напор воздуха внутри машины создается лопатками 1, отлитыми вместе с короткозамкнутой обмоткой ротора, а диффузоры 2, укрепленные на подшипниковых щитах 3, направляют поток воздуха.

**В двигателях с фазным ротором обмотка ротора выполняется сыпной из круглого провода или стержневой из меди прямоугольного сечения. Общий вид двигателя с фазным ротором представлен на рис. 4.**

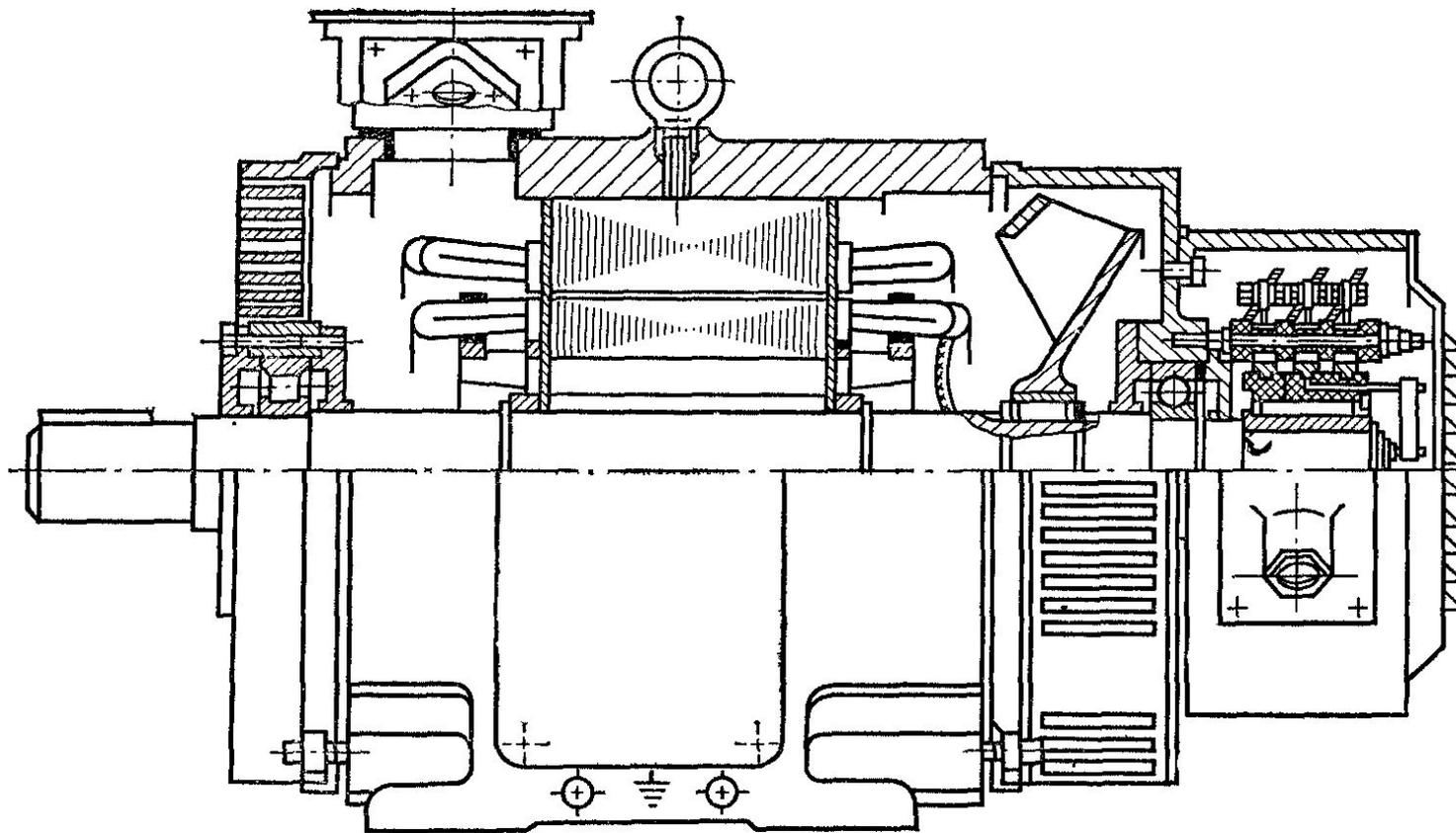
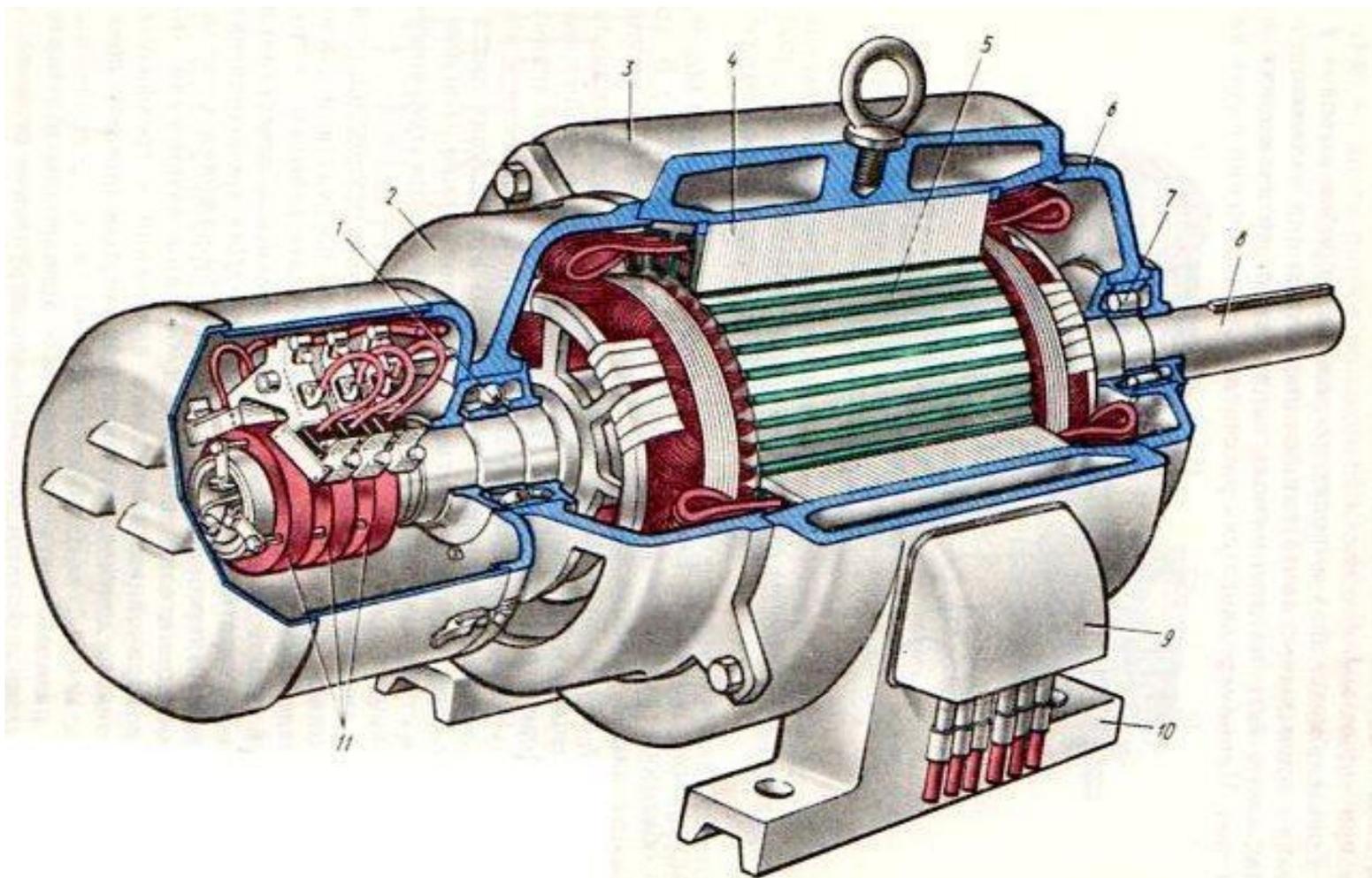
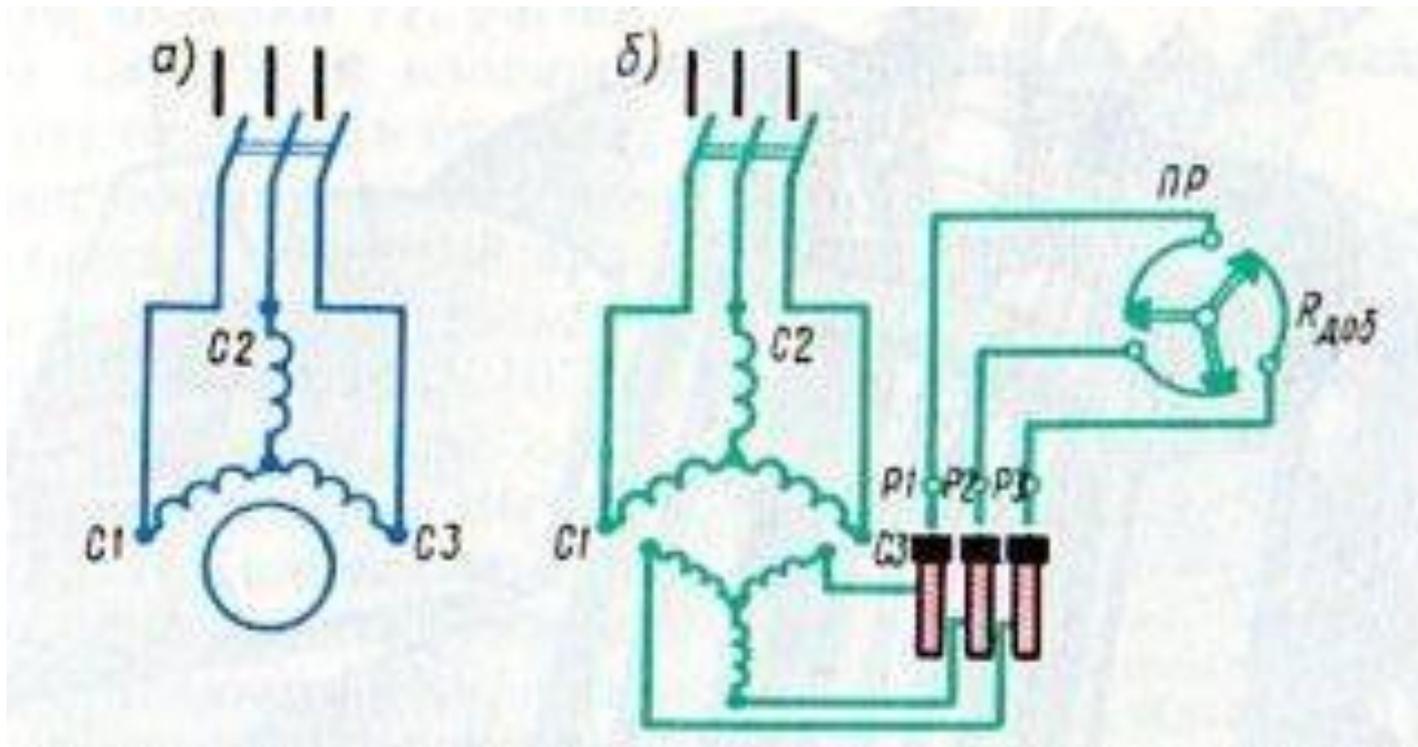


Рис. 4. Двигатель с фазным ротором 4АНК200 (степень защиты 1Р23)



Устройство трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором:

- 1, 7 – подшипники; 2, 6 – подшипниковые щиты; 3 – корпус; 4 – сердечник статора с обмоткой; 5 сердечник ротора; 8 – вал; 9 – коробка выводов; 10 – лапы; 11 – контактные кольца



Принципиальные схемы включения асинхронных двигателей с короткозамкнутым (а) и фазным (б) ротором

**Отличительной особенностью машин с фазным ротором является наличие на роторе обмотки из проводников круглого или прямоугольного сечения, начала которой выведены на контактные кольца. Узел контактных колец вынесен из станины, а контактные кольца закрыты кожухом (рис. 4). Узел контактных колец – консольного типа. Контактные кольца, опрессованные пластмассой, насаживаются на вал двигателя, они выполняются чугунами или медными. Выводные концы обмотки ротора подходят к трем кольцам через внутреннее отверстие в вале ротора. Обмотка ротора соединяется в звезду.**

Токо съемный аппарат состоит из щеток и щеткодержателей. Щеткодержатели укреплены на изолированной части пальца, металлический конец которого ввинчен в прилив подшипникового щита.

Система вентиляции и степень защиты двигателей с фазным ротором — 1Р23 и 1Р44.

При изготовлении серий электрических машин предусматривается максимальная унификация, поэтому большинство деталей одинаковые для машин как с короткозамкнутым, так и с фазным ротором.

**Статор асинхронной машины с короткозамкнутым или с фазным ротором состоит из магнитопровода с обмоткой и станины. Магнитопровод статора набирается из листов электротехнической стали, изолированных друг от друга и имеющих на внутренней поверхности пазы (рис. 2 – 4).**

**Сердечник статора состоит из отдельных пакетов, которые после сборки скрепляют скобами и укрепляют в станине. При сборке пакетов магнитопровода статора может быть выполнен скос пазов. Форма пазов и число пазов на статоре зависят от мощности и частоты вращения.**

В производстве асинхронных двигателей используются горячекатаные и холоднокатаные стали толщиной 0,35 и 0,5 мм. Горячекатаные стали не имеют магнитной анизотропии, а холоднокатаные имеют значительную анизотропию. Горячекатаная сталь марки 1211 при напряженности магнитного поля  $H = 2500 \text{ А/м}$  имеют индукцию 1,53 Тл, а удельные потери  $P_{1,0/50} = 3,3 \text{ Вт/кг}$ .

## СЕРИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Асинхронные двигатели выпускаются в виде единых серий, которые практически обеспечивают все основные потребности при комплектовании электроприводов для всех отраслей народного хозяйства. Асинхронные двигатели являются основными двигателями для большинства электроприводов. Они потребляют около половины вырабатываемой электроэнергии. При этом наибольшее количество электроэнергии потребляют двигатели мощностью до 10 кВт. Поэтому технико-экономические показатели двигателей единой серии 4А, которая охватывает этот диапазон мощностей, имеют важное значение для экономики страны.

Единая серия асинхронных двигателей 4А, которая выпускается с 1973 г., включает двигатели мощностью от 0,06 до 400 кВт. Двигатели мощностью от 0,06 до 0,37 кВт выполняются на напряжение 220/380 В, мощностью от 0,55 до 110 кВт—на напряжение 220/380 и 380/660 В, мощностью от 132 до 400 кВт на напряжение 380/660 В. Количество выводных концов шесть, соединение  $\Delta / Y$ .

Помимо основного исполнения в серии 4А имеется целый ряд специализированных исполнений: тропическое, химическое, на частоту 60 Гц, сельскохозяйственное, текстильное и др. Выпускают двигатели с повышенным пусковым моментом, повышенным скольжением, малошумные, многоскоростные и встраиваемые.

Выпускаются двигатели специализированные по конструкции: со встроенными электромагнитным тормозом, температурной защитой, встраиваемые, с повышенной точностью по установочным размерам, малошумные, высокоточные.

В основном исполнении двигатели выполняются с короткозамкнутым ротором и предназначены для применения в условиях умеренного климата. Двигатели изготавливаются защищенными (1Р23) и закрытыми обдуваемыми (1Р44). Обозначение типов двигателей расшифровывается следующим образом:

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя с изменениями нагрузки также меняет свою величину: в режиме холостого хода КПД равен нулю, а затем с ростом нагрузки он увеличивается, достигая максимума при нагрузке  $(0,7 \div 0,8) \cdot P_{ном}$ . При дальнейшем увеличении нагрузки КПД незначительно снижается, а при перегрузке ( $P_2 > P_{ном}$ ) он резко убывает, что объясняется интенсивным ростом переменных потерь  $(P_{эл1} + P_{эл2} + P_{доб})$ , величина которых пропорциональна квадрату тока статора, и уменьшением коэффициента мощности. График зависимости КПД от нагрузки  $\eta = f(P_2)$  асинхронных двигателей имеет такой же вид, как и для трансформатора.

**КПД трехфазных асинхронных двигателей общего назначения при номинальной нагрузке составляет: для двигателей мощностью от 1 до 10 кВт  $\eta_{ном} = 75 \div 88\%$ , для двигателей мощностью более 10 кВт  $\eta_{ном} = 90 \div 94\%$ .**

Коэффициент полезного действия является одним из основных параметров асинхронного двигателя, определяющим его энергетические свойства – экономичность в процессе эксплуатации. Кроме того, КПД двигателя, а точнее величина потерь в нем, регламентирует температуру нагрева его основных частей и в первую очередь его обмотки статора. По этой причине двигатели с низким КПД (при одинаковых условиях охлаждения) работают при более высокой температуре нагрева обмотки статора, что ведет к снижению их надежности и долговечности.

## Электрические машины синхронной связи

В современной технике часто возникает необходимость в синхронизации вращения или поворота осей механизмов. Эта задача успешно решается с помощью системы синхронной связи.

*Синхронной связью* называют электрическую связь, которая обеспечивает одновременное вращение или одновременный поворот двух (или более) находящихся на расстоянии друг от друга и механически не связанных валов. Распространены два вида систем синхронной связи: система «электрического вала» (синхронного вращения) – трансформаторный режим и система «передачи угла» (синхронного поворота) – индикаторный режим.

Системы электрического вала применяют для синхронного (одновременного) вращения нескольких механизмов, имеющих значительные нагрузочные моменты на валу. Для привода таких механизмов применяют обычные асинхронные двигатели с фазным ротором. При этом обмотки роторов электрически соединяют друг с другом, а обмотки статоров включают в общую сеть трехфазного тока.

Системы передачи угла (синхронного поворота) применяют для дистанционного управления или контроля положения в пространстве каких-либо устройств. Обычно такая система выполняется на небольших асинхронных машинах (однофазных или трехфазных), называемых *сельсинами*.

Наибольшее применение получили однофазные сельсины. Такой сельсин имеет однофазную обмотку возбуждения и трехфазную обмотку синхронизации, соединенную звездой. Одна из обмоток располагается на роторе, а другая – на статоре.

Простейшая синхронная передача, называемая *индикаторной*, содержит два сельсина: сельсин-датчик (СД) и сельсин-приемник (СП) (см. рис.). При включении обмоток возбуждения в сеть на напряжение  $U_1$  в каждой из сельсинов создается магнитный поток возбуждения  $\Phi_1$ . В обмотке синхронизации СД этот поток наводит ЭДС  $E_1$ , а в обмотке синхронизации СП – ЭДС  $E_2$ . Эти ЭДС направлены встречно.

Если роторы СД и СП занимают одинаковые положения относительно своих статоров, то  $\underline{E}_D = \underline{E}_П$  система находится в равновесии. Если же ротор СД повернуть на некоторый угол  $\alpha_D$ , то ЭДС в обмотке синхронизации СД изменится, равенство ЭДС нарушится ( $\underline{E}_D \neq \underline{E}_П$ ) и в цепи синхронизации появится результирующая ЭДС  $\Delta \underline{E} = \underline{E}_D + \underline{E}_П$ .

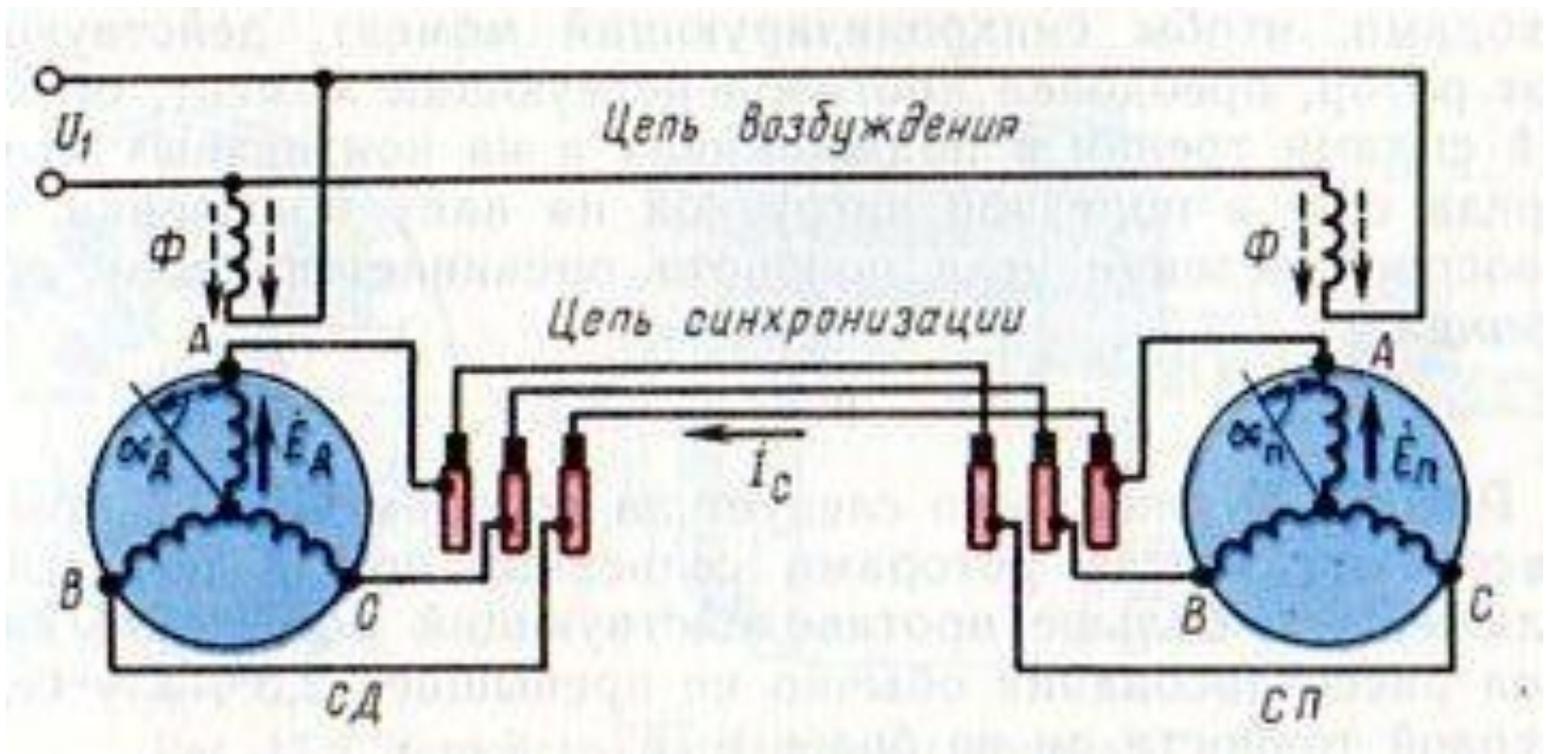


Схема синхронной передачи

Под действием этой результирующей ЭДС по обмоткам синхронизации начинает протекать ток синхронизации:

$$I_c = \frac{\Delta E}{Z_D + Z_{II} + Z_L},$$

где  $Z_D$ ,  $Z_{II}$  и  $Z_L$  — сопротивления обмоток синхронизации СД и СП и сопротивление линейных проводов.

Ток синхронизации датчика взаимодействует с потоком возбуждения и создает на роторе СД электромагнитный момент, направленный встречно повороту ротора датчика, т.е. момент, противодействующий механизму, поворачивающему ротор СД на заданный угол  $\alpha_D$ .

Ток синхронизации СП также взаимодействует с магнитным потоком возбуждения и создает электромагнитный момент, направленный в сторону поворота ротора СП. Под действием этого момента, называемого *синхронизирующим*, ротор СП займет такое же положение относительно статора, что и ротор СД, и в системе восстановится равновесие, так как ЭДС  $E_{II}$  и  $E_D$  станут одинаковыми.

Если ротор СД вновь повернуть на некоторый угол, то этот же угол поворота будет воспроизведен приемником. При вращении ротора датчика ротор приемника также будет вращаться с такой же частотой. Однако угол поворота, установленный СД, воспроизводится ротором СП с некоторой ошибкой – *рассогласованием*. Для поворота ротора приемника необходимо, чтобы синхронизирующий момент, действующий на этот ротор, преодолел противодействующий момент, обусловленный силами трения в подшипниках и на контактных кольцах, а иногда еще и полезной нагрузкой на валу приемника. Ошибка в воспроизведении угла поворота оценивается *углом рассогласования*

$$\Theta = \alpha_D - \alpha_{II}.$$

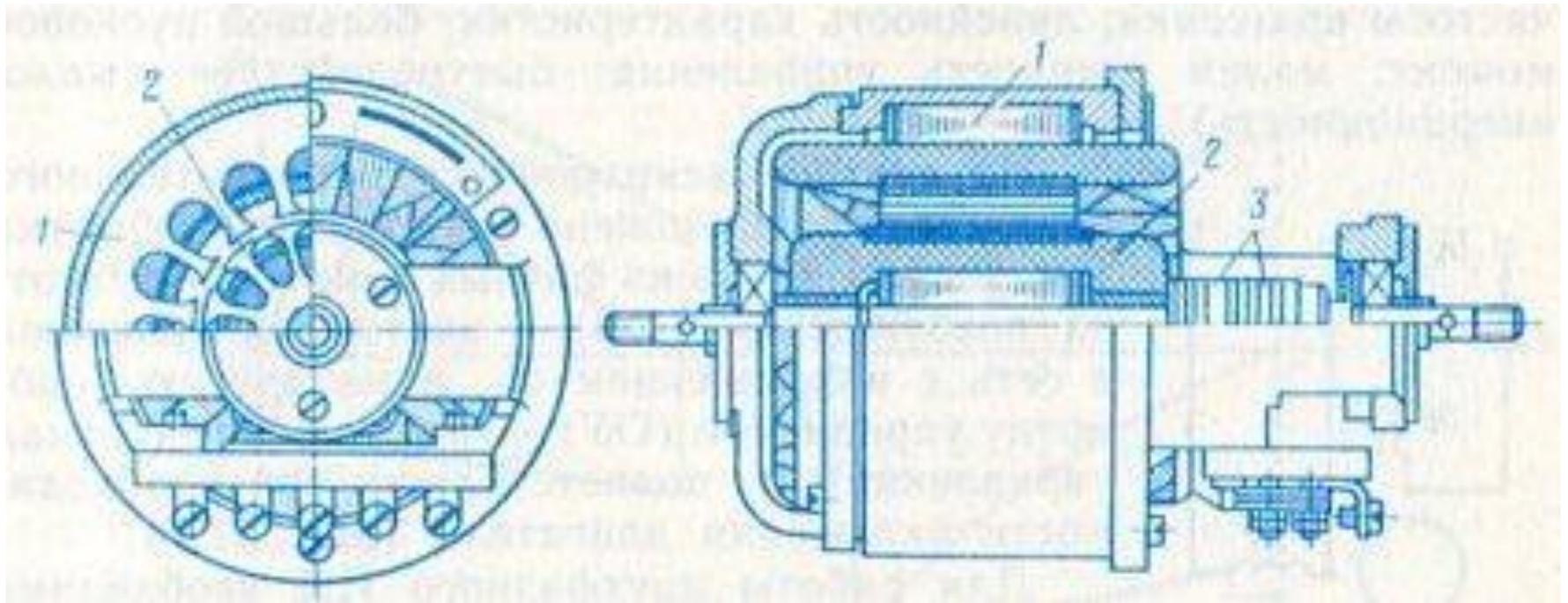
Ротор СП синхронно следует за ротором СД, но угол рассогласования между роторами сельсинов всегда имеется и тем больше, чем больше противодействующий момент на валу СП. Угол рассогласования обычно не превышает  $2,5^\circ$ , а у сельсинов высокой точности он не более  $0,75^\circ$ .

Значение синхронизирующего момента на роторе приемника

где  $M_c$  – максимальное значение синхронизирующего момента, соответствующее углу рассогласования  $\Theta_c$

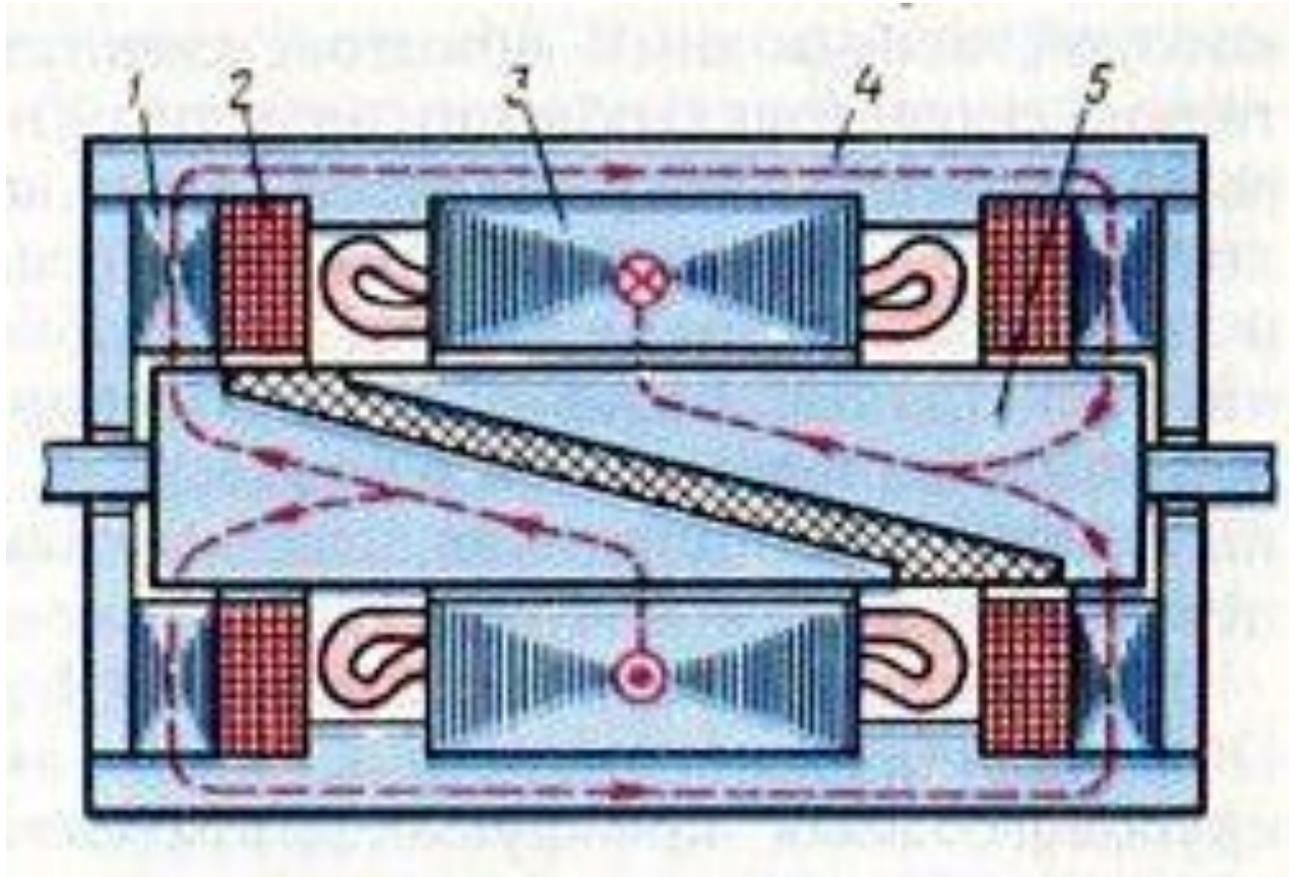
По конструкции сельсины разделяют на контактные, у которых обмотка на роторе соединена с внешней цепью через контактные кольца и щетки, и бесконтактные, не имеющие на роторе обмоток.

*Контактные* сельсины в принципе не отличаются от асинхронных двигателей с фазным ротором. На рисунке показано устройство контактного сельсина. Статор 1 и ротор 2 этого сельсина неявнополюсные, и поэтому обе обмотки сельсина распределенные. Наличие на роторе двух контактных колец 3 указывает на расположение на роторе обмотки возбуждения. Наличие контактных колец – основной недостаток контактных сельсинов, так как это ведет к неустойчивости параметров сельсина и снижению его надежности.



Устройство контактного сельсина

Наиболее совершенными являются *бесконтактные* сельсины, разработанные А.Г. Иосифьяном и Д.В. Свечарником. Эти сельсины не имеют скользящих контактов, так как их обе обмотки расположены на статоре (см. рис.). Ротор 5 бесконтактного сельсина представляет собой цилиндр из ферромагнитного материала, разделенный немагнитной прослойкой на две магнитно изолированные части – полюсы. Алюминий, который заливают в ротор, является магнитной изоляцией и одновременно материалом, скрепляющим части ротора. С торцевых сторон сельсина расположены тороидальные сердечники 1, выполненные из тонколистовой электротехнической стали. Внутренняя поверхность этих сердечников расположена над ротором, а к их внешней поверхности примыкают стержни внешнего магнитопровода 4. Однофазную обмотку возбуждения сельсина выполняют в виде двух дисковых катушек 2, расположенных с противоположных сторон статора по оси сельсина между обмоткой синхронизации 3 и тороидальными сердечниками.



Конструктивная схема бесконтактного сельсина

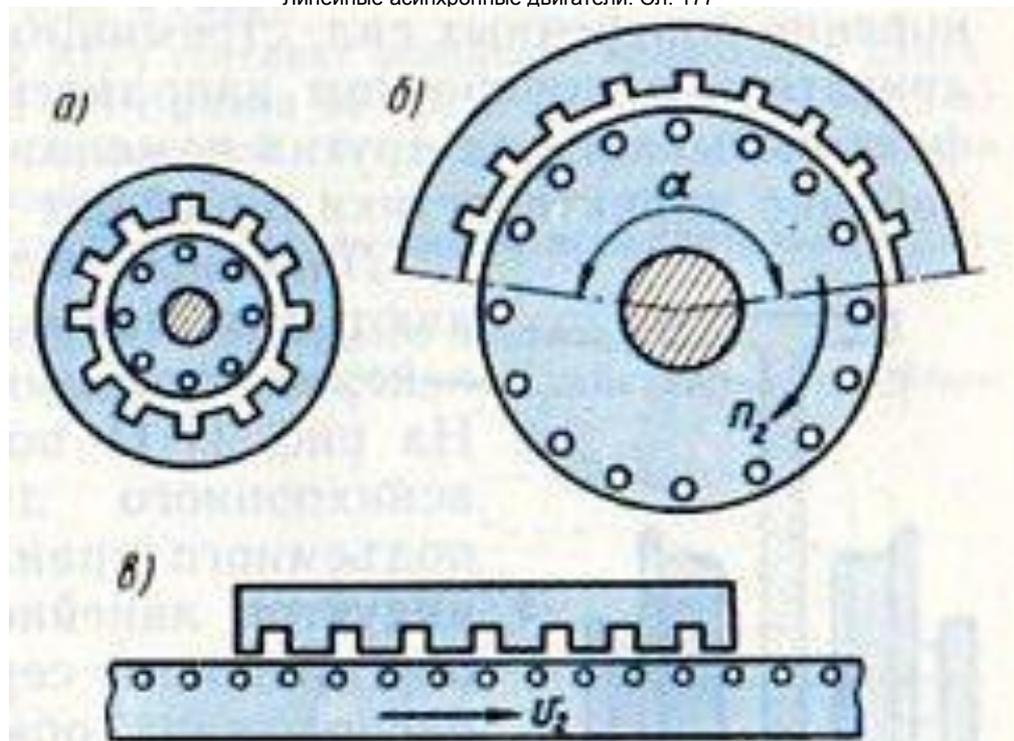
В процессе работы сельсина пульсирующий магнитный поток возбуждения замыкается в магнитной системе сельсина, сцепляясь с трехфазной обмоткой синхронизации на статоре. Путь замыкания потока показан на рисунке пунктирной линией. Как видно из этого рисунка, магнитный поток, замыкаясь в магнитопроводе, проходит через воздушный зазор четыре раза. По этой причине для создания требуемого магнитного потока в бесконтактном сельсине необходима значительная МДС. Это является причиной повышенных габаритов бесконтактного сельсина по сравнению с контактными.

## Линейные асинхронные двигатели

Подвижная часть линейного двигателя совершает поступательное движение, поэтому применение этих двигателей для привода рабочих машин с поступательным движением рабочего органа позволяет упростить кинематику механизмов, уменьшить потери в передачах и повысить надежность механизма в целом.

Возможны линейные двигатели четырех видов: электромагнитные (соленоидные), магнитоэлектрические (с применением постоянного магнита), электродинамические и асинхронные. Асинхронные (индукционные) линейные двигатели благодаря простоте конструкции и высокой надежности получили наибольшее применение.

Для объяснения принципа работы линейного асинхронного двигателя обратимся к асинхронному двигателю с вращательным движением ротора. Если статор этого двигателя (рисунок *а*) мысленно «разрезать» и «развернуть» так, чтобы он образовал дугу с углом (рисунок *б*), то диаметр ротора увеличится. При этом мы получим асинхронный двигатель с *дуговым* статором.



К понятиям о дуговом и линейном двигателях

Частота вращения (об/мин) магнитного поля статора этого двигателя (синхронная частота)

$$n_1 = n_1^0 \cdot \frac{\alpha}{2 \cdot \pi},$$

Скорость бегущего поля в линейном двигателе:

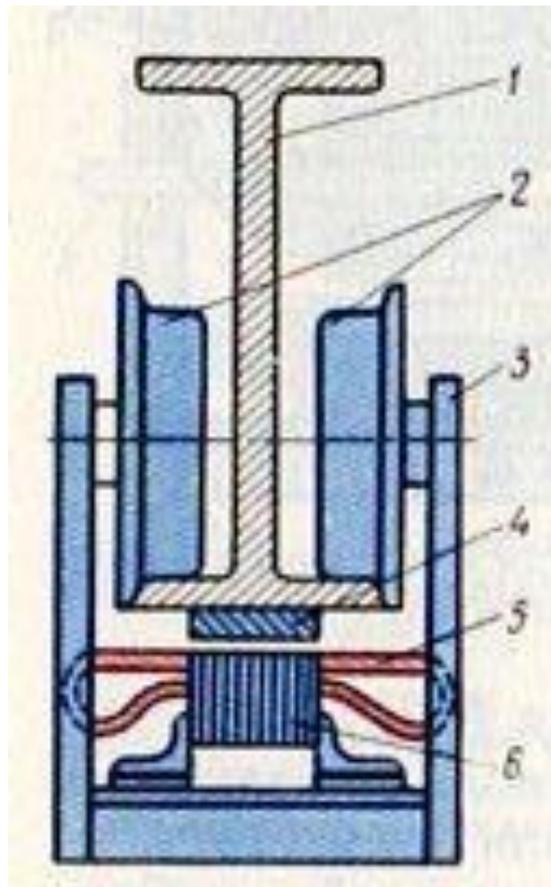
$$v_1 = 2 \cdot \tau \cdot f_1 = f_1 \cdot \frac{L_c}{p},$$

где  $f_1$  – частота тока в обмотке статора;  
 –  $\tau$  – полюсное деление;  
 –  $L_c$  – длина статора (индуктора).

Принцип действия линейного асинхронного двигателя основан на том, что бегущее поле индуктора, сцепляясь с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента двигателя, наводит в ней ЭДС. Возникающие в стержнях этой обмотки токи взаимодействуют с бегущим полем индуктора и создают на индукторе и вторичном элементе электромагнитные силы, стремящиеся линейно переместить подвижную часть двигателя относительно неподвижной. В некоторых конструкциях линейных двигателей подвижной частью является индуктор, а в некоторых – вторичный элемент, называемый в этом случае *бегунком*. Если вторичный элемент линейного двигателя невозможно изготовить с короткозамкнутой обмоткой, то применяют вторичные элементы в виде полосы из меди, алюминия или ферромагнитной стали. Наиболее удовлетворительными получаются характеристики линейного двигателя при составном вторичном элементе, например выполненном в виде полосы из ферромагнитной стали, покрытой слоем меди.

Основной недостаток асинхронных двигателей с разомкнутым статором – дуговых и линейных – явление краевого эффекта, представляющего собой комплекс электромагнитных процессов, обусловленных разомкнутой конструкцией статора. К нежелательным последствиям краевого эффекта в первую очередь следует отнести появление «паразитных» тормозных усилий, направленных против движения подвижной части двигателя, и возникновение поперечных сил, стремящихся сместить подвижную часть двигателя в поперечном направлении. Кроме того, краевой эффект вызывает ряд других нежелательных явлений, ухудшающих рабочие характеристики линейных двигателей.

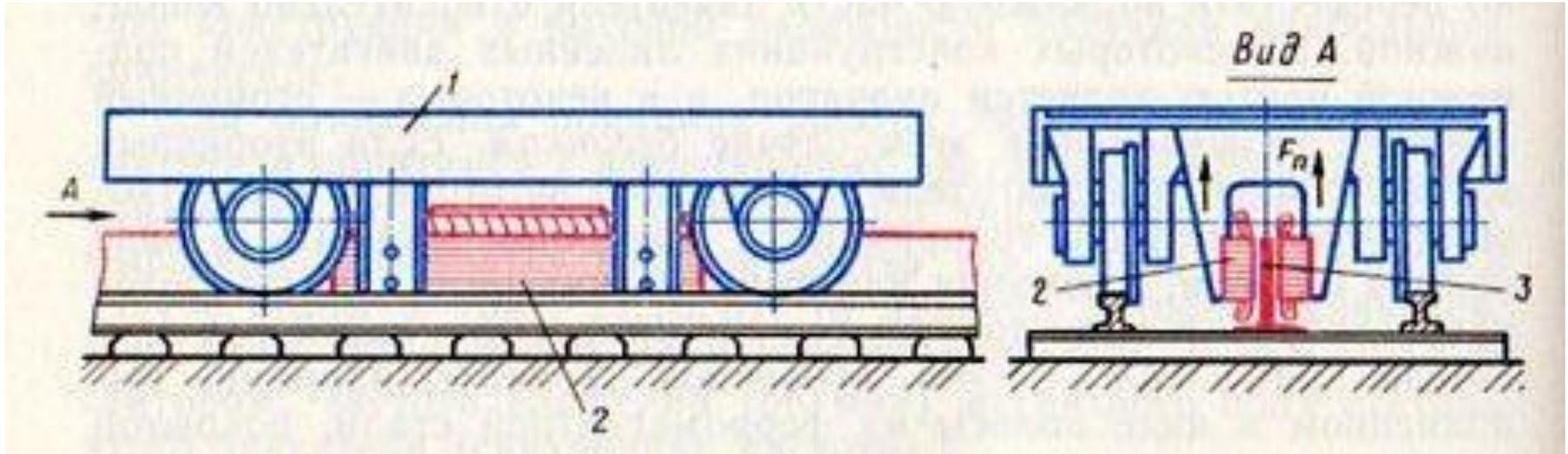
Линейные асинхронные двигатели применяют для привода заслонок, ленточных конвейеров, подъемно-транспортных механизмов. На рисунке показано устройство линейного асинхронного двигателя привода тележки подъемного крана. На тележке 3 расположен индуктор линейного двигателя, состоящий из шихтованного сердечника 6, в пазах которого расположена обмотка 5. Направляющая для колес 2 представляет собой стальную балку 1, к нижней части которой прикреплена стальная полоса 4.



Линейный асинхронный двигатель привода подъемного крана:  
1 – стальная балка; 2 – колеса-катки; 3 – тележка; 4 – алюминиевая  
полоса; 5 – обмотка индуктора; 6 – шихтованный сердечник

Бегущее магнитное поле индуктора наводит в стальной полосе 4 вихревые токи. Электромагнитные силы возникающие в результате взаимодействия этих токов с магнитным полем индуктора, перемещают индуктор (тележку) вдоль стальной полосы 4.

Линейные асинхронные двигатели значительной мощности применяют на транспорте в качестве тяговых двигателей. Один из вариантов такого двигателя показан на рисунке. Здесь индуктор 2 двигателя подвешен к транспортному средству 1, а стальная полоса 3 установлена вертикально на основании пути между рельсами. В этой конструкции поперечная сила  $F_n$ , вызванная краевым эффектом, используется полезно, так как она уменьшает силу давления на несущие оси и колеса и, как следствие, уменьшает трение качения.

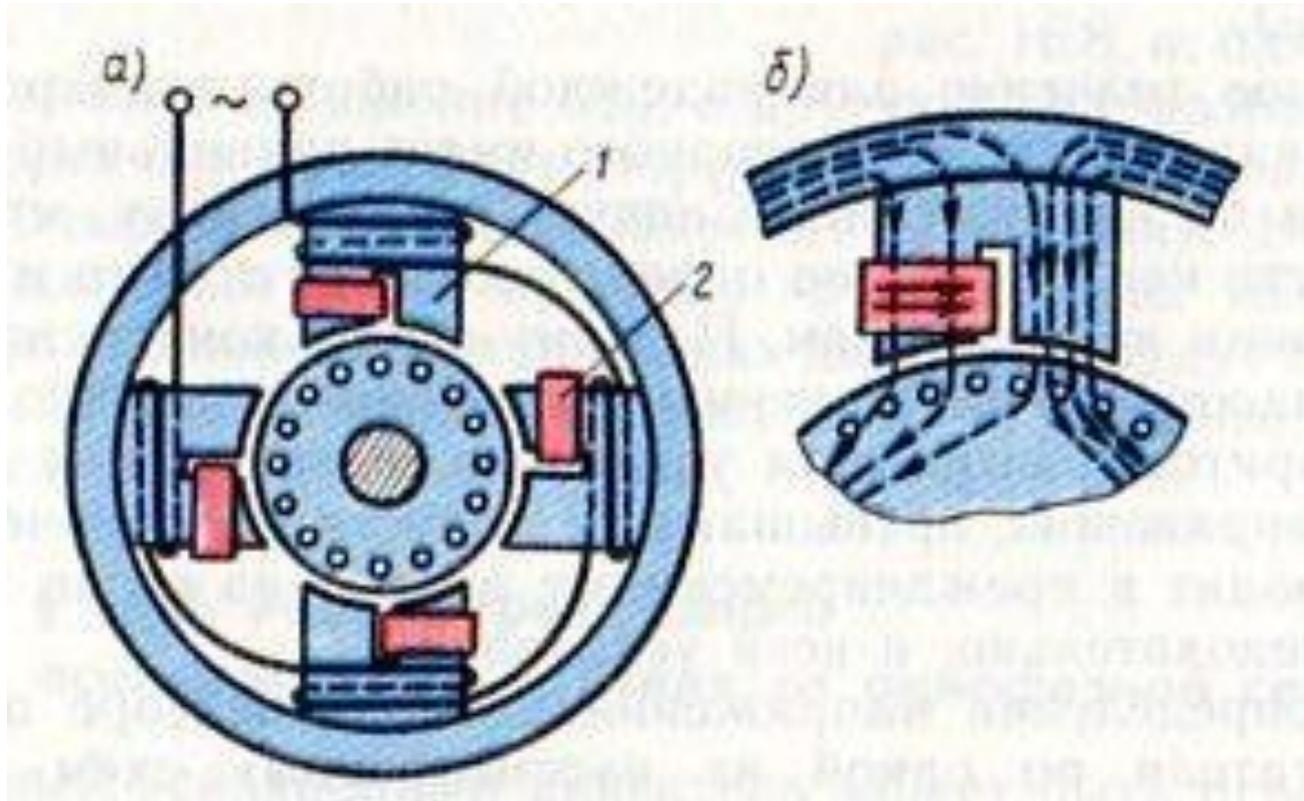


Линейный асинхронный двигатель привода железнодорожного транспортного средства

## Однофазный двигатель с экранированными полюсами

Для создания пускового момента в асинхронных двигателях малой мощности применяют конструкцию с явно выраженными экранированными полюсами (рис. *а*), на которых располагают однофазную обмотку. Полюсы 1 имеют расщепленную на две части конструкцию, при этом на одну из частей каждого полюса надет короткозамкнутый виток (экран) в виде медного кольца 2. Ротор двигателя короткозамкнутый.

При включении обмотки статора в сеть пульсирующий поток наводит в короткозамкнутом витке (экране) ток, препятствующий нарастанию магнитного потока в этой части полюса (рис. *б*). В результате потоки в обеих частях каждого полюса оказываются сдвинутыми по фазе относительно друг друга, что приводит к образованию в двигателе вращающегося магнитного поля.



Асинхронный двигатель с экранированными полюсами

Асинхронные двигатели с экранированными полюсами нереверсивны – ротор всегда всегда вращается в направлении от неэкранированной части полюса к экранированной. Обычно эти двигатели изготавливаются мощностью не более 100 Вт и применяют для привода устройств, не требующих большого пускового момента (электропривод вентиляторов, электропроигрывателей и т. пр.). Промышленностью изготавливаются асинхронные двигатели с экранированными полюсами серии АД...Е, предназначенные для привода приборов с вентиляторной нагрузкой. Эти двигатели мощностью от 2,5 до 25 Вт рассчитаны на работу от сети напряжением 220 В частотой 50 Гц. Кратность пускового момента этих двигателей

$$M_n / M_{ном} = 0,5 \div 0,6.$$

# Асинхронные исполнительные двигатели

В системах управления, регулирования и контроля широко применяются управляемые электродвигатели небольшой мощности. С помощью этих двигателей осуществляется преобразование электрического сигнала в механическое перемещение – вращение вала. Такие электродвигатели называют *исполнительными* (ИД).

Характер требований, предъявляемых к исполнительным двигателям, определяется спецификой их работы: частые пуски, реверсы, постоянно изменяющаяся частота вращения. Основные требования – отсутствие *самохода*, т.е. самоторможение при снятии сигнала управления; широкий диапазон регулирования частоты вращения; линейность характеристик; большой пусковой момент; малая мощность управления; быстродействие (малоинерционность).

На статоре асинхронного исполнительного двигателя расположена двухфазная обмотка. Одна из фазных обмоток – обмотка возбуждения (ОВ) – постоянно включена в сеть с напряжением  $U_1$ , на другую – обмотку управления (ОУ) – напряжение (сигнал управления)  $U_c$  подается лишь при необходимости включения двигателя.

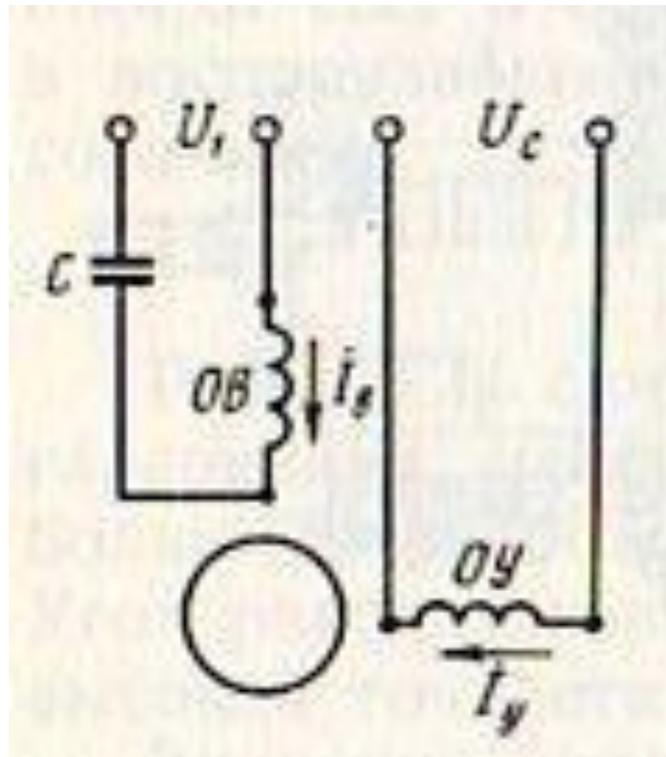


Схема включения асинхронного исполнительного двигателя

Для работы двухфазного ИД необходимо вращающееся магнитное поле, неизменным условием возникновения которого является наличие пространственного и временного сдвигов между МДС фазных обмоток статора. Пространственный сдвиг указанных МДС обеспечивается конструкцией обмотки статора, при которой оси фазных обмоток сдвинуты в пространстве относительно друг друга обычно на угол 90 эл. град. Временной (фазный) сдвиг МДС создается либо питанием обмотки статора двухфазной системой напряжений, либо включением в цепь ОУ фазовращателя – устройства, позволяющего получать различные фазовые сдвиги напряжения на его выходе относительно напряжения на входе, т.е. относительно напряжения на обмотке возбуждения, либо включением последовательно в цепь ОВ емкости  $C$ .

Последний способ включения ИД применяют наиболее часто. Обычно значение емкости  $C$  выбивают из условия получения кругового поля при пуске двигателя. По окончании пускового периода двигатель работает с эллиптическим вращающимся полем.

## Конструкция ротора:

- короткозамкнутый;
- полый немагнитный;
- полый ферромагнитный;
- массивный ферромагнитный.

## Способы управления

Различают три основных способа управления: амплитудное, фазовое и амплитудно-фазовое. При *амплитудном управлении* изменяется только амплитуда напряжения управления или пропорциональное ей действующее значение  $U_y$  этого напряжения. Векторы напряжений управления и возбуждения при всех значениях напряжения  $U_y$  образуют угол (рис. 90°)

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

$$\alpha_e = U_y / U'_B = k \cdot U_y / U_B$$

где  $U'_B = U_B \cdot (w_y / w_B)$  - коэффициент трансформации.  
 $k = w_B / w_y$

*Фазовое управление* характерно тем, что напряжение управления остается неизменным по величине и равным , а регулирование частоты вращения достигается путем изменения угла сдвига фаз между векторами напряжений возбуждения и управления (рис. 2). За коэффициент сигнала при фазовом управлении принимается синус угла сдвига фаз между векторами напряжений  $\underline{U}_y$  и  $\underline{U}_B$  , т.е.  $\alpha = \sin \beta$

При амплитудно-фазовом управлении изменяется как амплитуда напряжения управления, так и угол сдвига фаз между напряжениями  $\underline{U}_y$  и  $\underline{U}_B$  , подаваемыми на обмотки статора.

В процессе управления двигателем изменяют сигнал  $U_a$  ОУ, при этом меняется как значение (амплитуда) МДС этой обмотки, так и ее фазовый сдвиг относительно МДС обмотки возбуждения. Поэтому рассматриваемый способ управления ИД называют *амплитудно-фазовым*.

Если же увеличить активное сопротивление ротора, то форма кривых прямого  $M_{пр}$  и обратного  $M_{обр}$  результирующего

$M = M_{пр}$  и  $M_{обр}$  моментов изменится (рисунок б): максимум моментов и  $M_{обр}$  сместятся в область больших скольжений

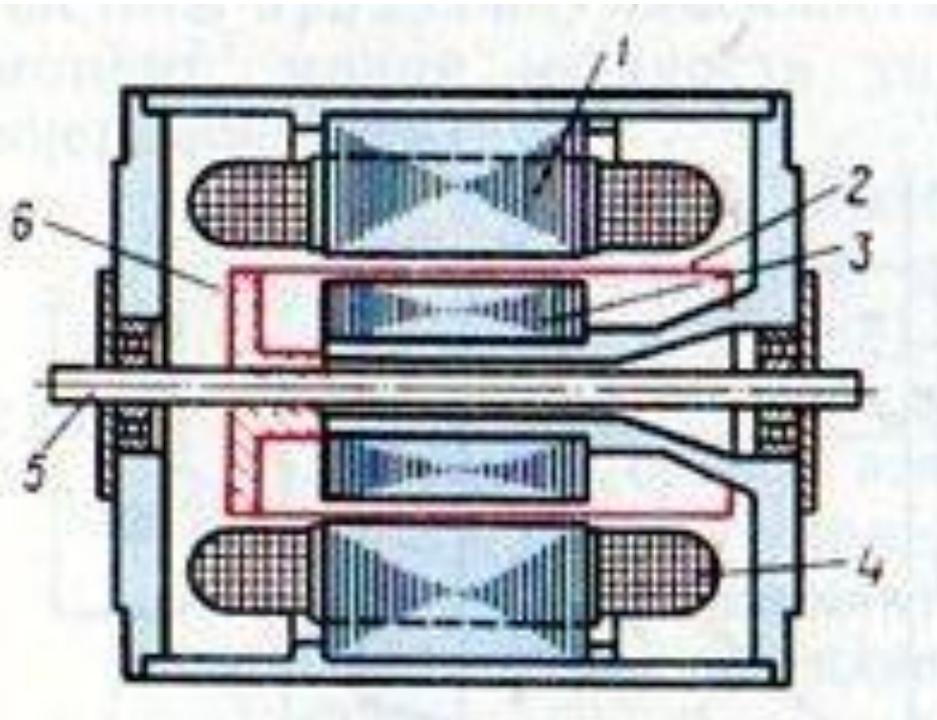
Теперь после прекращения сигнала управления, т.е. при переходе двигателя в однофазный режим, электромагнитный момент становится отрицательным  $M_T$

(точка B) и оказывает на ротор тормозящее действие, не допуская самохода. Критерий отсутствия самохода:

$$S_m = \frac{r_2'}{X_K} \geq 1; \quad (S_m = 4 \div 7).$$

К исполнительным двигателям предъявляется также требование *малоинерционности* (быстродействия), т.е. при подаче сигнала управления ротор двигателя должен очень быстро достигать установившейся частоты вращения. Выполнению этого требования способствуют увеличение пускового момента, уменьшение синхронной частоты вращения поля статора и снижение момента инерции ротора. При повышенных частотах питающего напряжения (больших синхронных частотах вращения) ИД с ротором обычной (короткозамкнутой) конструкции из-за значительного момента инерции последнего не обладает требуемым быстродействием.

В этом случае применяют асинхронные исполнительные двигатели с полым немагнитным ротором. Полый немагнитный ротор представляет собой тонкостенный алюминиевый стакан 2, что, с одной стороны, обеспечивает ротору повышенное активное сопротивление, а с другой – весьма небольшой момент инерции.



Асинхр

ротором:

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

Двигатель имеет два статора: внешний 1 с обмоткой и внутренний 3 без обмотки, входящий внутрь полого стакана ротора. Внутренний статор необходим для уменьшения магнитного сопротивления основному магнитному потоку.

$$\delta_1 = \delta_2 = 0,15 \div 0,25 \text{ мм};$$

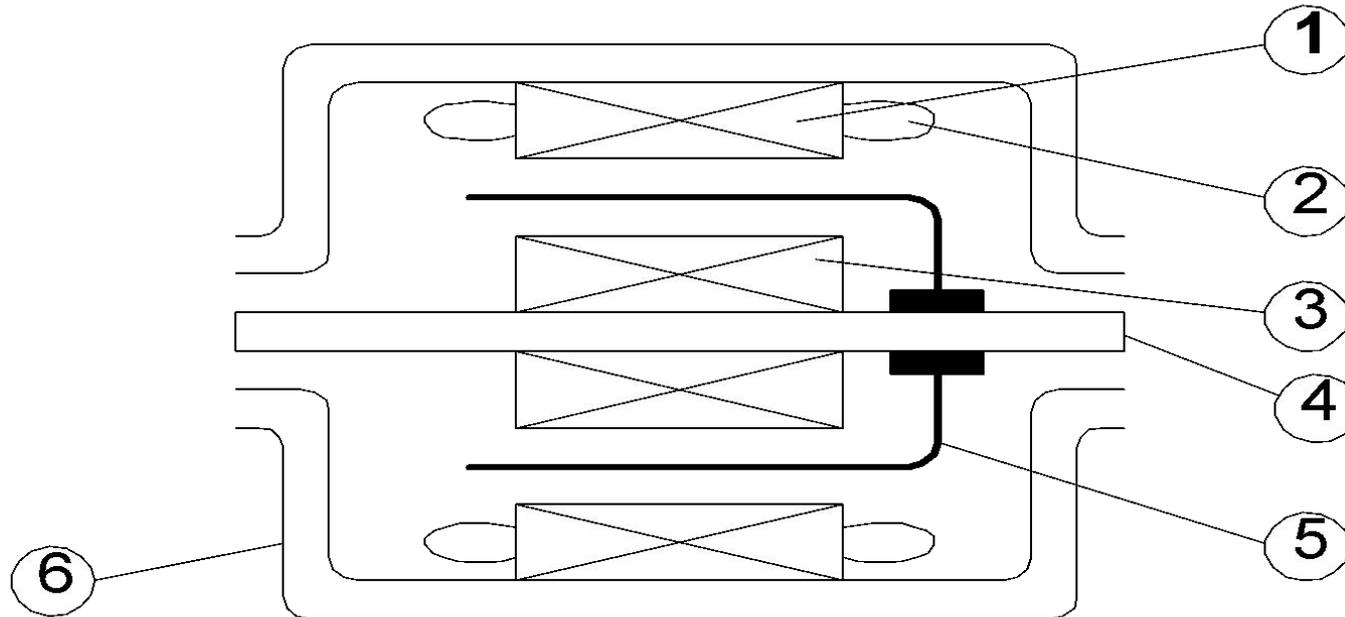
$$\delta_{\text{стенки}} = 0,2 \div 1 \text{ мм};$$

$$\delta_{\text{н.м}} = 0,5 \div 1,5 \text{ мм}.$$

Если  $P_H < 1,5 \text{ Вт}$  обмотка на внутреннем статоре.

По сравнению с исполнительными двигателями обычной конструкции двигатели с полым немагнитным ротором имеют повышенные габариты и невысокий КПД. Это объясняется повышенным зазором между наружным и внутренним статорами, который складывается из толщины стенки стакана ротора и двух воздушных зазоров. Как известно, увеличение воздушного зазора способствует росту намагничивающего тока двигателя и снижению его КПД.

## Конструкция асинхронного исполнительного двигателя с полым немагнитным ротором



- 1 – внешний статор;
- 2 – двухфазная обмотка статора (обмотка возбуждения к управлению);
- 3 – магнитопровод внутреннего статора (неподвижный);
- 4 – вал с закрепленным полым немагнитным алюминиевым стаканом 5;
- 6 – корпус статора.