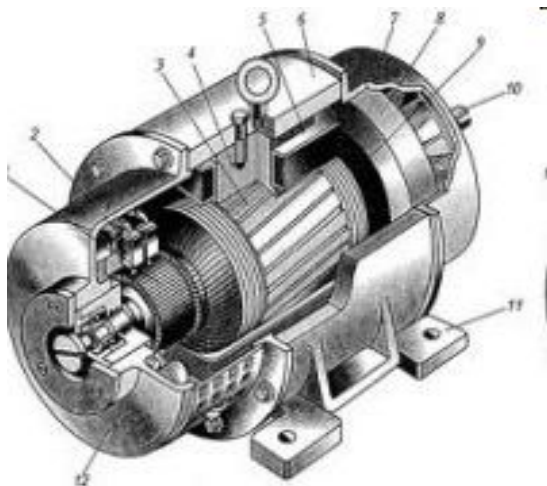


# Электрические машины

Семестр 2

# Напоминание: достоинства и недостатки МПТ



## *Достоинства:*

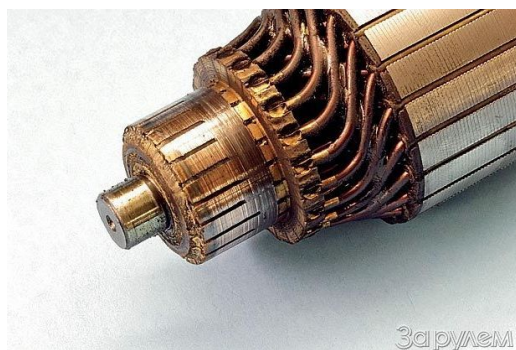
- Имеют большой диапазон мощностей (1 мкВт – десятки кВт)
- Обладают лучшими пусковыми характеристиками по сравнению с двигателями переменного тока
- Позволяют регулировать частоту вращения в широких пределах
- Позволяют работать от однофазной цепи переменного тока (ДПТ параллельного возбуждения еще называют универсальными коллекторными двигателями)

## *Недостатки:*

- Из всех типов машин – наименее надежные
- Конструктивно сложные и, следовательно, имеют сложную технологию изготовления, и поэтому дорогие.
- Искрение в щетках ограничивает применение МПТ в агрессивных и взрывоопасных средах

*Все перечисленные недостатки обязаны своим появлением щеточно-коллекторному узлу. Но без скользящих контактов щеточно-коллекторного узла нельзя подать на якорь постоянный ток.*

*Однако на переменном токе можно сделать электрическую машину без щеточно-коллекторного узла и избежать всех перечисленных минусов МПТ!*



За рулем

*Что нужно, чтобы сделать двигатель без щеточно-коллекторного узла?*

*Закон Ампера: чтобы получить усилие (и момент), необходимо создать ток в проводнике, находящемся в магнитном поле*

$$\vec{dF} = I \cdot (\vec{dl} \times \vec{B})$$

Поле создается катушками статора, здесь проблем нет. А как создать ток в проводнике без контакта с источником напряжения?

Как в трансформаторе!

К первичной обмотке подключают источник переменного напряжения, создается переменное магнитное поле. Во вторичной обмотке при этом наводится ЭДС и при замыкании ее на нагрузку потечет ток.

Асинхронные двигатели устроены принципиально именно так. Катушки статора создают переменное магнитное поле, в котором находится проводники ротора. В проводниках ротора возникает ЭДС индукции. Проводники делают короткозамкнутыми, поэтому под действием ЭДС течет ток ротора. В итоге мы имеем ток в магнитном поле, и двигатель создаст момент вращения.

Правда, не всякое переменное поле подходит для двигателя.

$$M = c_m \cdot I_A \cdot \Phi$$

В любой электрической машине момент зависит от магнитного потока и тока ротора, как в выражении для МПТ (выше).

Если мы просто подключим обмотку статора к розетке переменного тока, то магнитный поток будет синусоидален. Такой поток позволяет двигателю работать, но вращающий момент не будет, очевидно, постоянен во времени, дважды за период момент будет от нуля увеличиваться до максимального. Для вентилятора, стиральной машинки или миксера это не страшно (поэтому там используются однофазные двигатели или универсальный коллекторный двигатель), а вот поворачивать задвижку таким «ударным» двигателем нельзя. Поэтому.....

*Для работы двигателей переменного тока необходимо не просто переменное магнитное поле, а вращающееся магнитное поле постоянной величины!*

Вращающееся магнитное поле статора будет наводить в короткозамкнутой обмотке ротора ЭДС и ток. На этом основан принцип работы асинхронных машин.

Если же во вращающееся магнитное поле поместить постоянный магнит, магнит будет поворачиваться вслед за полем статора аналогично стрелке компаса. На этом основаны синхронные двигатели, чья частота вращения строго равна частоте вращения магнитного поля.

В любом типе машин переменного тока используется вращающееся магнитное поле и устройство статора поэтому одинаково.

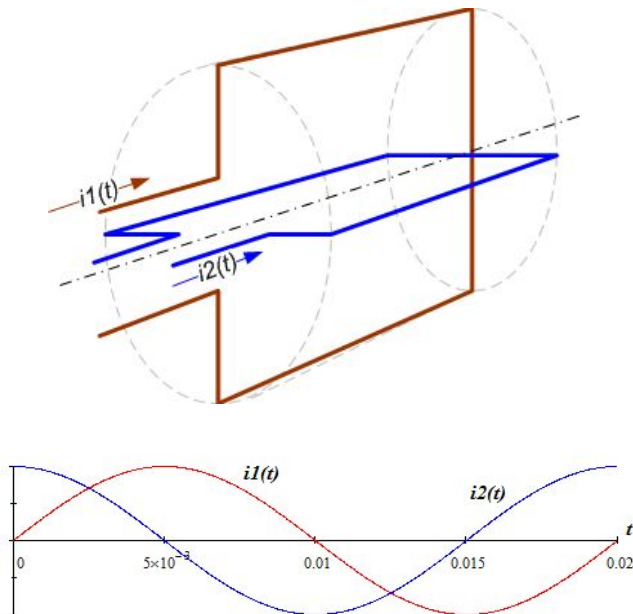
## РАЗДЕЛ 2

# *Вращающееся магнитное поле*

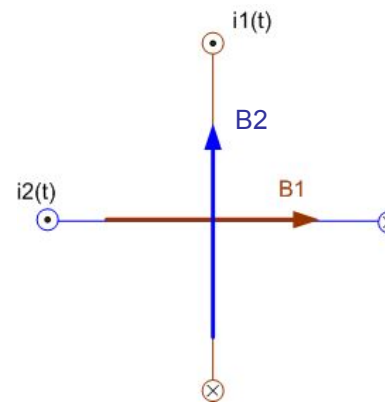
Перед тем, как описать статор, остановимся на некоторых базовых принципах создания вращающегося магнитного поля.

1. Для создания вращающегося магнитного поля постоянной величины требуется синусоидальный ток.
2. Создать вращающееся магнитное поле можно только в случае двух и более катушек на статоре. Причина проста: поле катушки всегда ориентировано по оси катушки. И какой бы ток в одну катушку мы не подавали, ось поля не изменится. Поэтому катушек должно быть две или более. При этом расположить катушки соосно нельзя, т.к. от одной катушки система будет отличаться лишь числом витков. Поэтому катушки должны располагаться в пространстве под некоторым углом друг к другу.
3. Сколько бы катушек мы не взяли, если мы подадим на них одно и то же напряжение, ток в них будет синхронен, следовательно, будут моменты времени, когда поле обращается в ноль. Поэтому для создания вращающегося магнитного поля токи в катушках должны быть сдвинуты по фазе!

Наиболее простой случай создания вращающегося магнитного поля двумя катушками

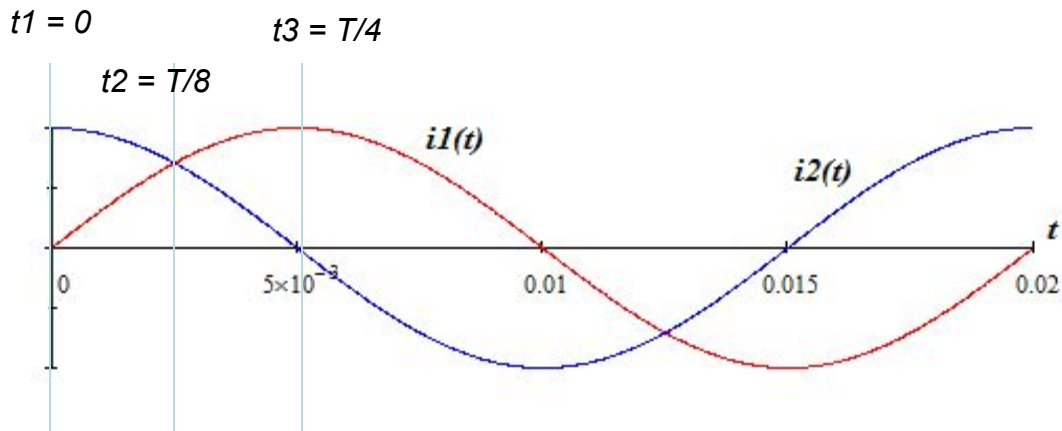


Две катушки расположены под углом  $90^\circ$  в пространстве. Токи в катушках отличаются по фазе на  $90^\circ$ . Таким образом каждая из катушек создает магнитное поле, отличающееся фазой и направлением в пространстве на угол  $90^\circ$ .



Упрощенная схема магнитных полей двух катушек

Рассмотрим как меняется результирующее магнитное поле двух катушек



$$\vec{B}_{рез} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$$

$t1 = 0$

$$i1 = 0, B_1 = 0$$

$$i2 = I_m, B_2 = B_m$$

$$B_{рез} = B_1 + B_2 = B_m$$

$t2 = T/8$

$$i1 = I_m * 0,707, B_1 = B_m * 0,707$$

$$i2 = I_m * 0,707, B_2 = B_m * 0,707$$

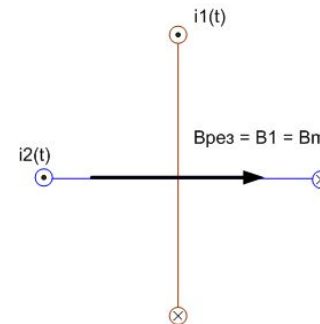
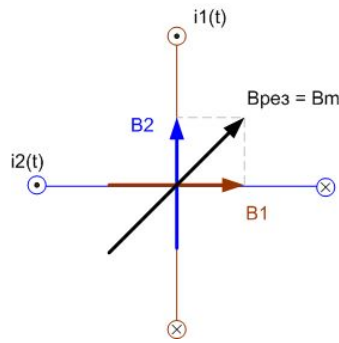
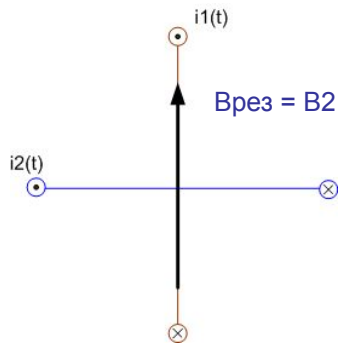
$$B_{рез} = B_1 + B_2 = B_m$$

$t3 = T/4$

$$i1 = I_m, B_1 = B_m$$

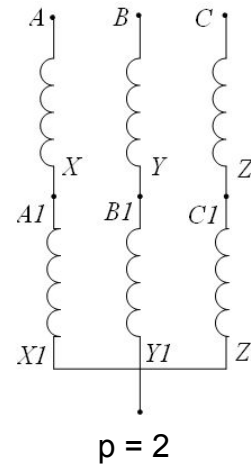
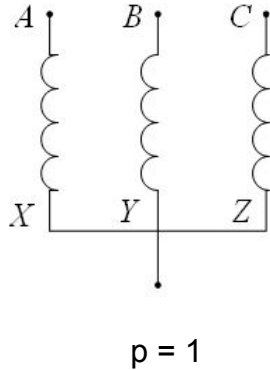
$$i2 = 0, B_2 = 0$$

$$B_{рез} = B_1 + B_2 = B_m$$

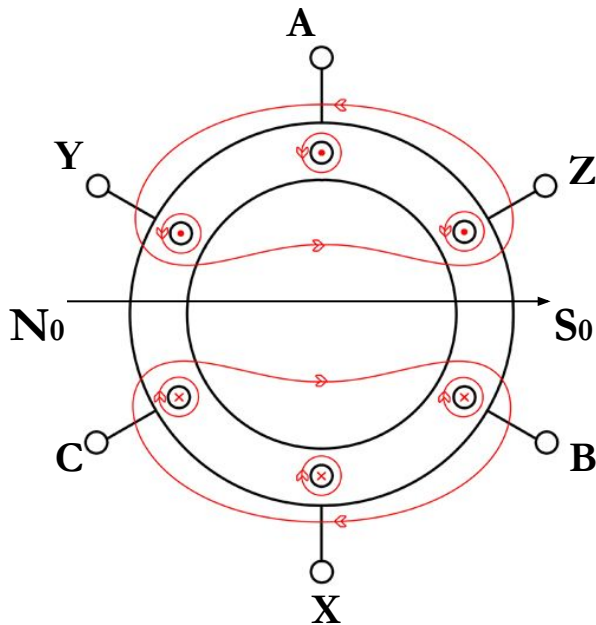


## Условия создания вращающегося магнитного поля:

- Фазы трехфазной обмотки сдвинуты в пространстве на угол  $120^\circ/p$  ( $p$  – число пар полюсов);
- Токи в обмотках сдвинуты по фазе на  $120^\circ$ ;

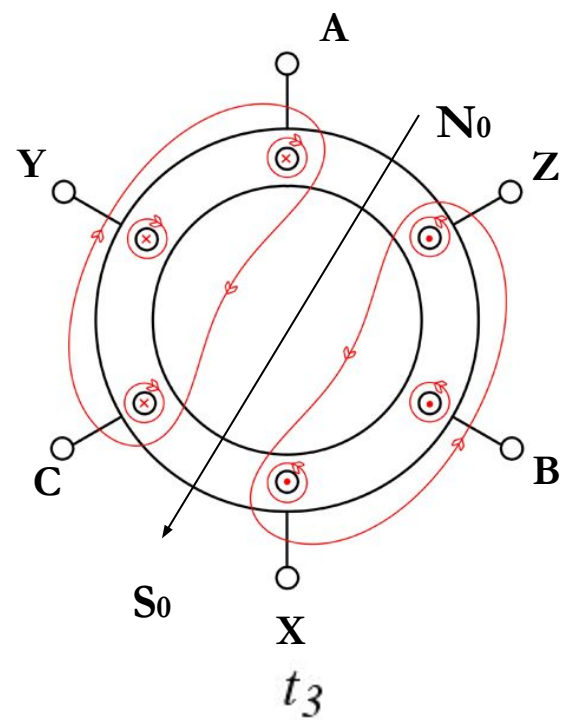
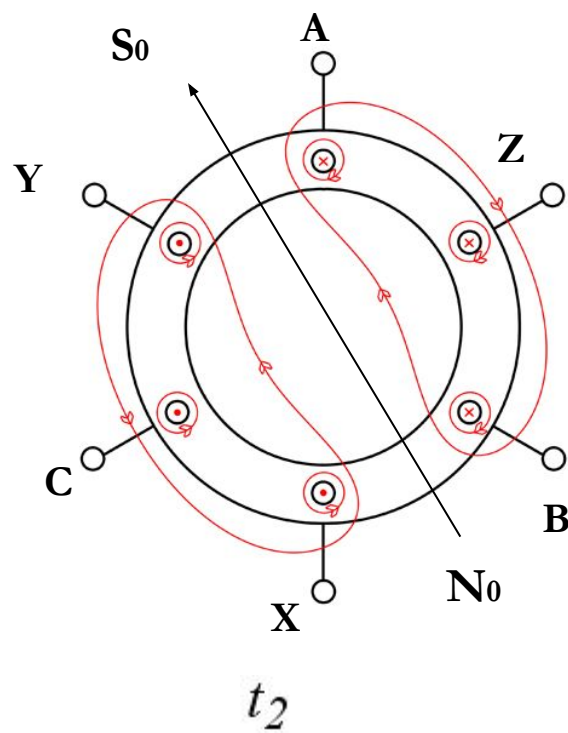
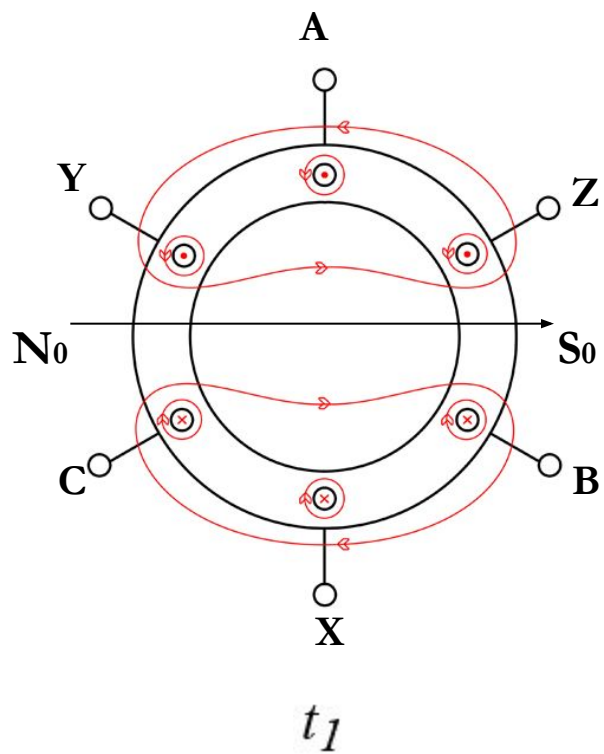
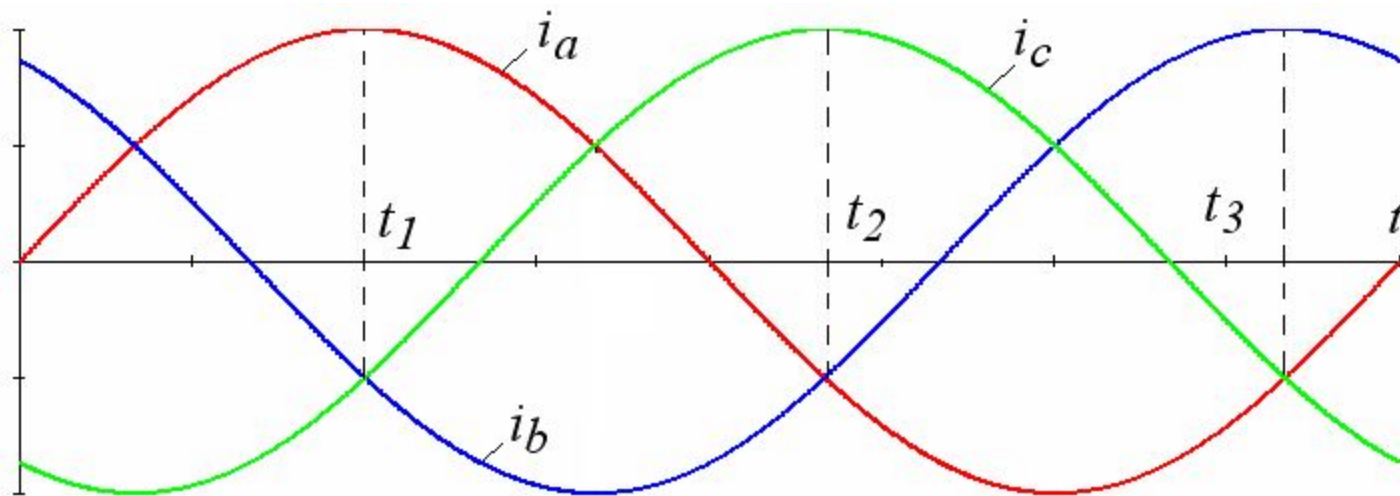


## Вращающееся магнитное поле в статоре трехфазной машины переменного тока



Статор представляет собой полый цилиндр из ферромагнитного материала, на внутренней поверхности которого есть пазы, в которые укладывается трехфазная обмотка –  $3 \cdot p$  катушек. Катушки смещены в пространстве на  $120/p$  градусов. Для наиболее простого случая трех катушек угол  $120$  как на рисунке.

За условно положительное направление токов принято направление от начала фазы (A, B, C) к концу (X, Y, Z)





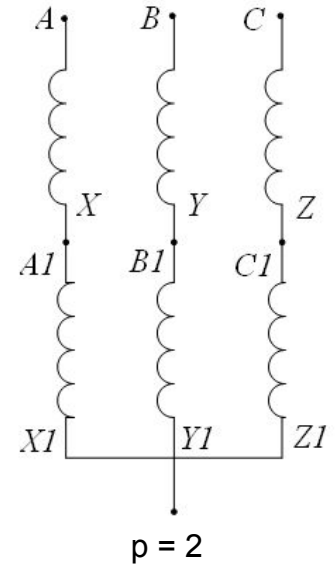
## Свойства вращающегося магнитного поля

- Ось магнитного поля совпадает с осью той фазы, ток в которой максимален и положителен,
- Поле вращается в направлении чередования фаз.

Чем больше число пар полюсов, тем медленнее вращается магнитное поле

$$n = 60 \cdot \frac{f}{p}$$

<i>p</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>n, об/мин</i>	<i>3000</i>	<i>1500</i>	<i>1000</i>	<i>750</i>	<i>600</i>	<i>500</i>



# РАЗДЕЛ 3

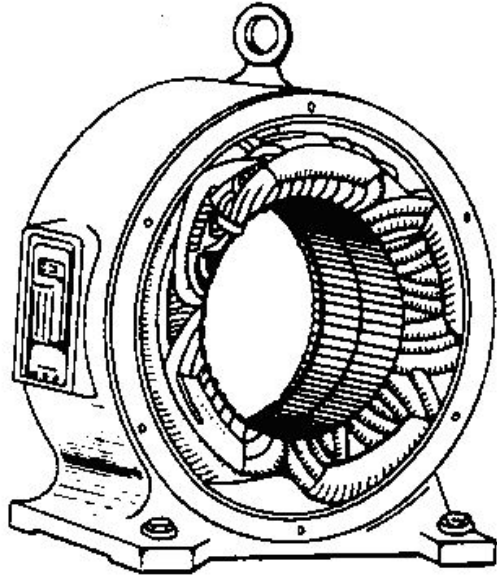
## ***ТРЕХФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ***

### 3.1. Устройство и принцип действия ТАД

Трехфазный асинхронный двигатель состоит из неподвижного статора и подвижного ротора.

#### 1. Статор

Статор представляет из себя полый цилиндр из ферромагнитного материала. На внутренней поверхности статора расположены пазы, в которые укладывается трехфазная обмотка.



Вид статора с обмотками

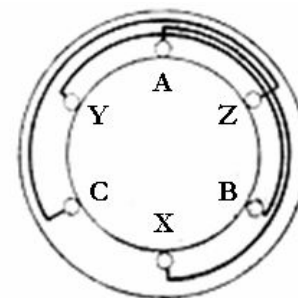
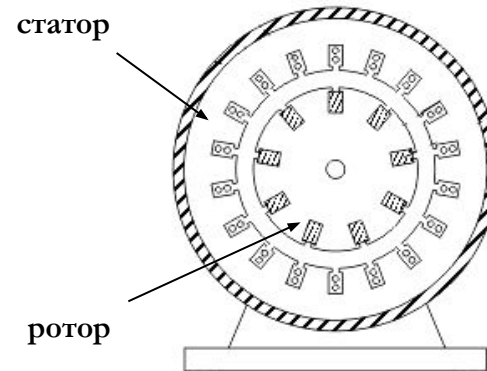


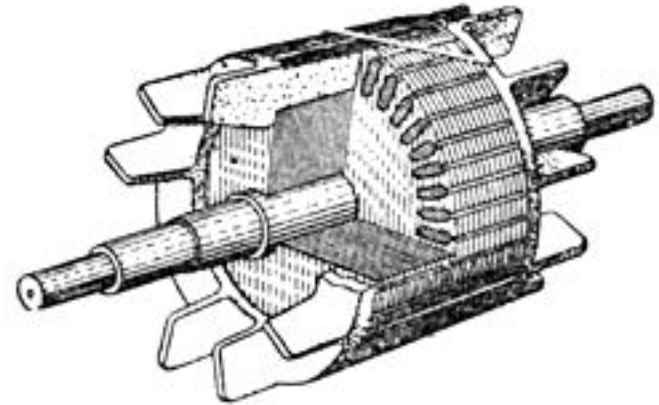
Схема расположения начал и концов обмоток статора

Статор и ротор выполняют шихтованными из магнитомягкого материала для уменьшения потерь на перемагничивание и вихревые токи.

2. Ротор бывает короткозамкнутый или фазный.

### Короткозамкнутый ротор

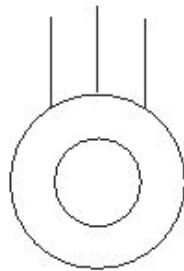
Обмотка **короткозамкнутого ротора** обычно выполняется из меди или алюминия. Обмотка заливается в пазы ротора. Она используется в машинах малой и средней мощности. При выполнении медных роторов стержни привариваются к короткозамыкающим кольцам.



Обмотка не имеет никаких выводов!

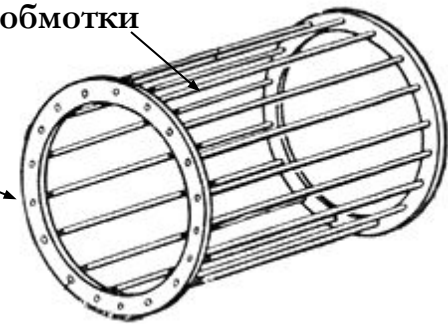
Конструкция очень простая, надежная и дешевая. Так выполняют 95% всех роторов.

Обозначение ТАД с КЗ ротором:



стержни обмотки

замыкающее  
кольцо

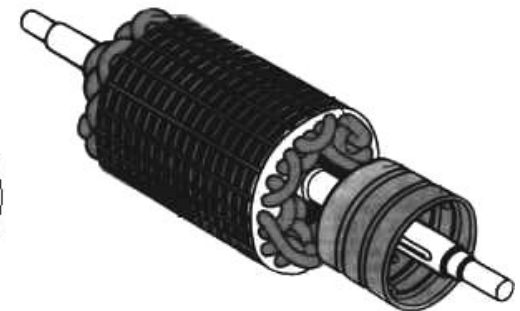
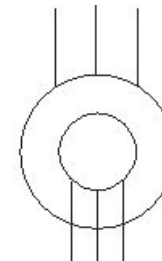


Обмотка короткозамкнутого ротора

**Фазный ротор** имеет трехфазную обмотку (как у статора), соединенную звездой. Концы фаз выведены на контактные кольца к которым можно подключить пусковой или регулировочный реостат.

В номинальном режиме выводы обмотки ротора замыкаются, и обмотка работает как короткозамкнутая.

Фазный ротор конструктивно сложнее и менее надежен, но позволяет получить лучшие пусковые свойства.



Для снижения магнитного сопротивления стремятся сделать минимальным зазор между статором и ротором.

Двигатель конструируют так, чтобы в зазоре магнитное поле по окружности ротора изменялась синусоидально.

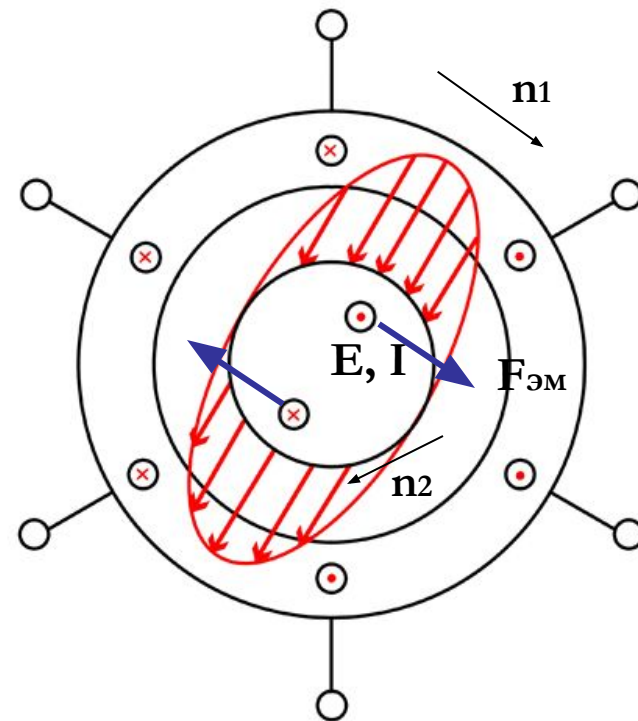
### **Принцип действия**

Пусть магнитное поле статора вращается с частотой  $n_1$ .

Рассмотрим один неподвижный проводник ротора (момент пуска). По закону электромагнитной индукции в нем наведется синусоидальная ЭДС (т.к. распределение индукции в зазоре синусоидально). Т.к. обмотка короткозамкнутая, в проводнике потечет ток, сонаправленный с вызвавшей его ЭДС.

На проводник с током в магнитном поле будет действовать сила. Применяв правило левой руки, мы получим, что ротор начнет вращаться в направлении вращения магнитного поля статора.

По мере ускорения ротора уменьшается частота и амплитуда ЭДС, следовательно, уменьшается ток и вращающий момент. Когда ротор достигнет частоты вращения поля статора, магнитное поле окажется неподвижным относительно ротора, ЭДС станет равна нулю, и вращающий момент пропадет. Ротор достигнет максимально возможной частоты вращения  $n_2 = n_1$



Если теперь появится момент нагрузки (тормозящий), частота вращения ротора упадет, ротор будет вращаться медленнее поля статора. Из-за этого появится ЭДС ротора и ток ротора, а, следовательно, и сила Ампера и вращающий момент. Момент будет увеличиваться до тех пор, пока частота вращения снижается, а частота снижается до момента, когда момент вращения ТАД не уравновесит момент нагрузки. Так ТАД автоматически поддерживает момент вращения равным моменту нагрузки – свойство саморегулирования.

**Важно! ТАД создает вращающий момент, только когда частота вращения ротора  $n_2$  меньше частоты вращения поля статора  $n_1$ !**

Разность частот вращения ротора и поля статора характеризуют *скольжением*:

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

$$n_s = n_1 - n_2$$

$n_1$  – частота вращения поля статора

$n_2$  – частота вращения ротора

$n_s$  – частота скольжения

Характерные режимы работы ТАД:

1. Пуск:  $n_2 = 0$ ,  $s = 1$
2. Идеальный холостой ход:  $n_2 = n_1$ ,  $s = 0$
3. Реальный холостой ход:  $s \approx 0,001-0,005$
4. Номинальный режим:  $s \approx 0,05$

### 3.2. Магнитное поле асинхронного двигателя

*Какое оно, магнитное поле ТАД?*

- Магнитное поле ротора вращается с той же частотой, что и поле статора.

Результирующее магнитное поле складывается из поля статора и поля ротора. Поле статора вращается с частотой  $n_1$ .

Поле ротора так же вращается с частотой  $n_1$ , т.к. частота вращения поля ротора относительно неподвижного статора складываются из частоты вращения собственно ротора  $n_2$  и частоты токов ротора  $n_s$  (с этой частотой поле ротора вращается относительно ротора).  $n_2 + n_s = n_1$

Поля ротора и статора вращаются синхронно!

- Наложение магнитных полей ротора и статора не приводит к изменению результирующего магнитного поля, т.к. магнитный поток  $\Phi$  при постоянной частоте сети определяется только напряжением на статоре  $U_1$  (одна из особенностей магнитных цепей переменного тока, см. прошлый семестр).

$$U_1 = 4,44 \cdot w_1 \cdot f \cdot \Phi$$

Ток ротора таков, что создает магнитное поле, направленное встречно по отношению к полю статора, но размагничивающее действие тока ротора компенсируется увеличением потребления тока статора.

*С погрешностью в несколько процентов можно считать  $\Phi = const$*

### 3.3. Уравнения электрического состояния цепей статора и ротора

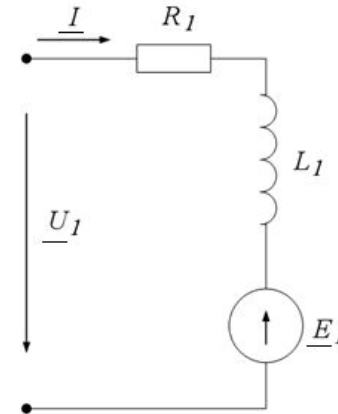
Фаза статора

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 + \underline{I}_1 \cdot (R_1 + j \cdot X_{L1})$$

$\underline{U}_1$  – напряжение сети

$R_1, L_1$  – параметры фазы обмотки статора

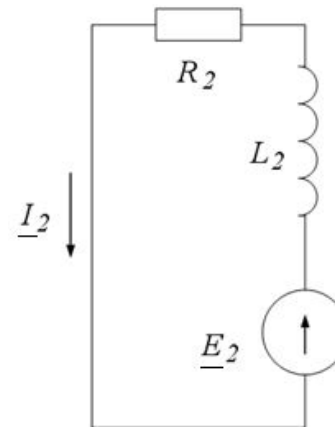
$\underline{E}_1$  – ЭДС, наводимая полем ротора в обмотке статора  
(зависит от режима работы ТАД)



Обмотка ротора

$$\underline{E}_2 = \underline{I}_2 \cdot (R_2 + j \cdot X_2)$$

Параметры, входящие в уравнение состояния, зависят от скольжения!



## Зависимость от скольжения

- Частота токов ротора

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

- ЭДС ротора  $E_{2s} = c_e \cdot n_s \cdot \Phi = c_e \cdot n_1 \cdot s \cdot \Phi = E_2 \cdot s$   
 $E_2$  – ЭДС при неподвижном роторе ( $s = 1$ )

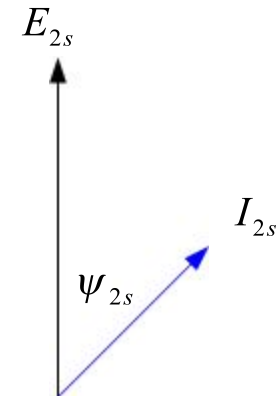
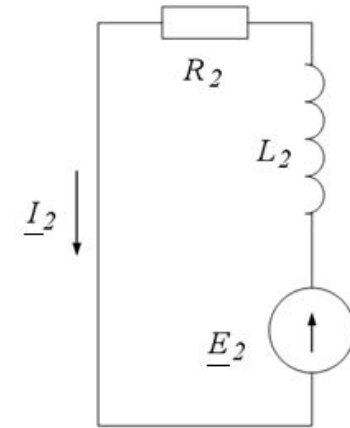
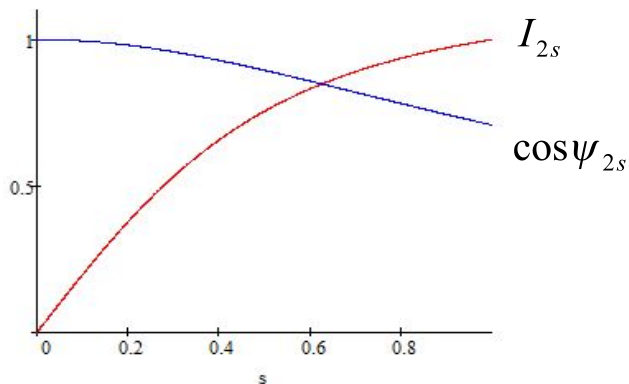
- Индуктивное сопротивление  $X_{2s} = \omega_s \cdot L_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s \cdot L_1 = X_2 \cdot s$

- Ток ротора

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\frac{R_2^2}{s^2} + X_2^2}}$$

- Коэффициент мощности

$$\cos \psi_{2s} = \frac{R_2}{\sqrt{(X_2 \cdot s)^2 + (R_2)^2}}$$

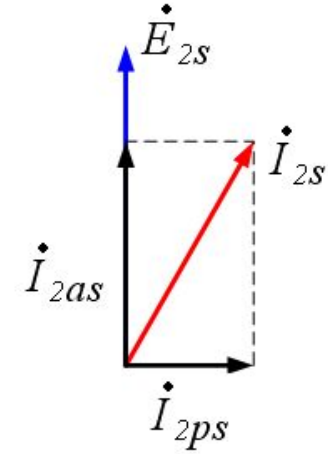
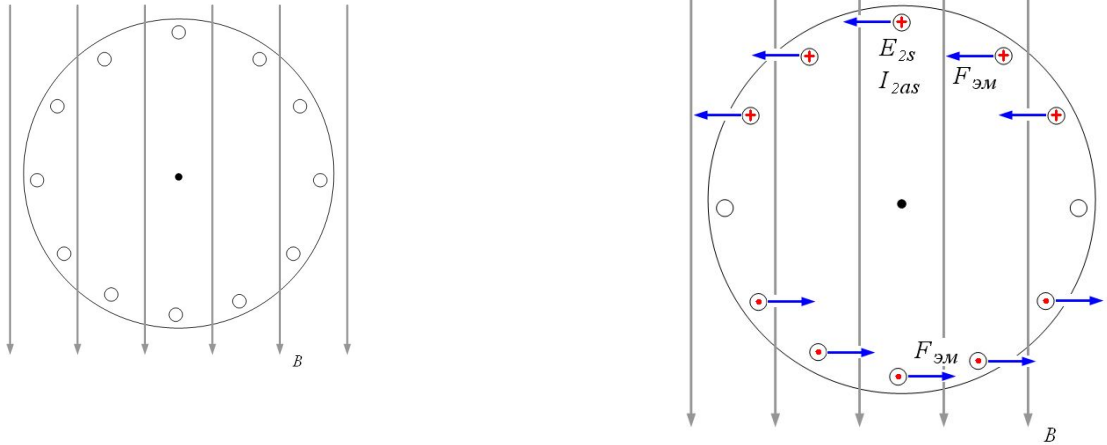




### 3.4. Электромагнитный момент ТАД

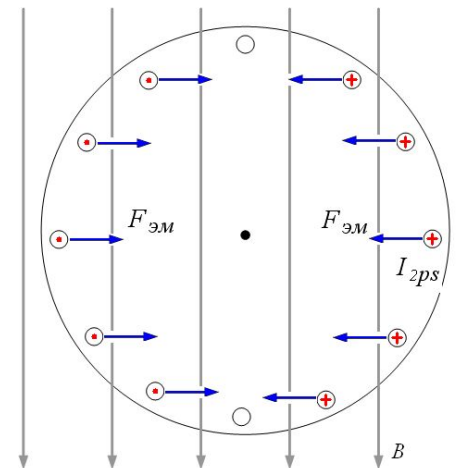
Рассмотрим отдельно момент, создаваемый активной и реактивной составляющими тока ротора.

*Момент, создаваемый активной составляющей тока ротора*



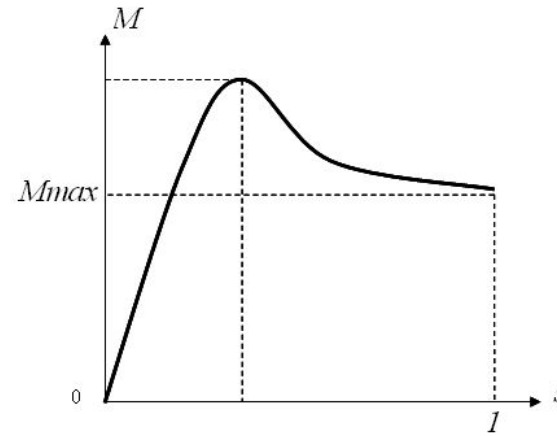
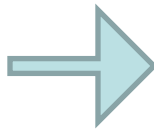
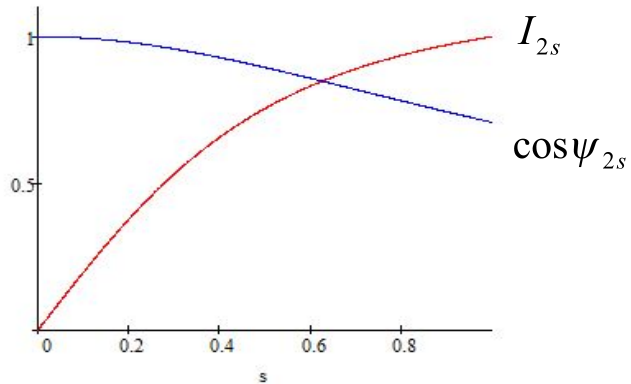
*Момент, создаваемый реактивной составляющей тока ротора*

*Реактивная составляющая тока ротора не создает результирующего вращающего момента*



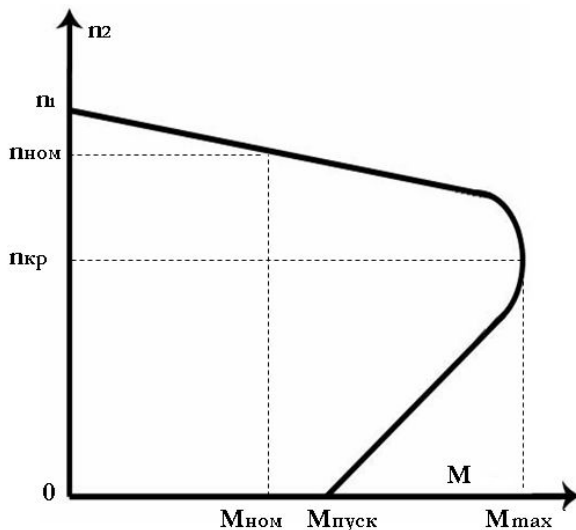
Вывод: вращающий момент ТАД пропорционален активной составляющей тока ротора

$$M = c_M \cdot \Phi \cdot I_{2s} \cdot \cos \psi_{2s} = c_M \cdot \Phi \cdot I_{2as}$$



### 3.5. Эксплуатационные свойства ТАД

#### 1. Механическая характеристика ТАД

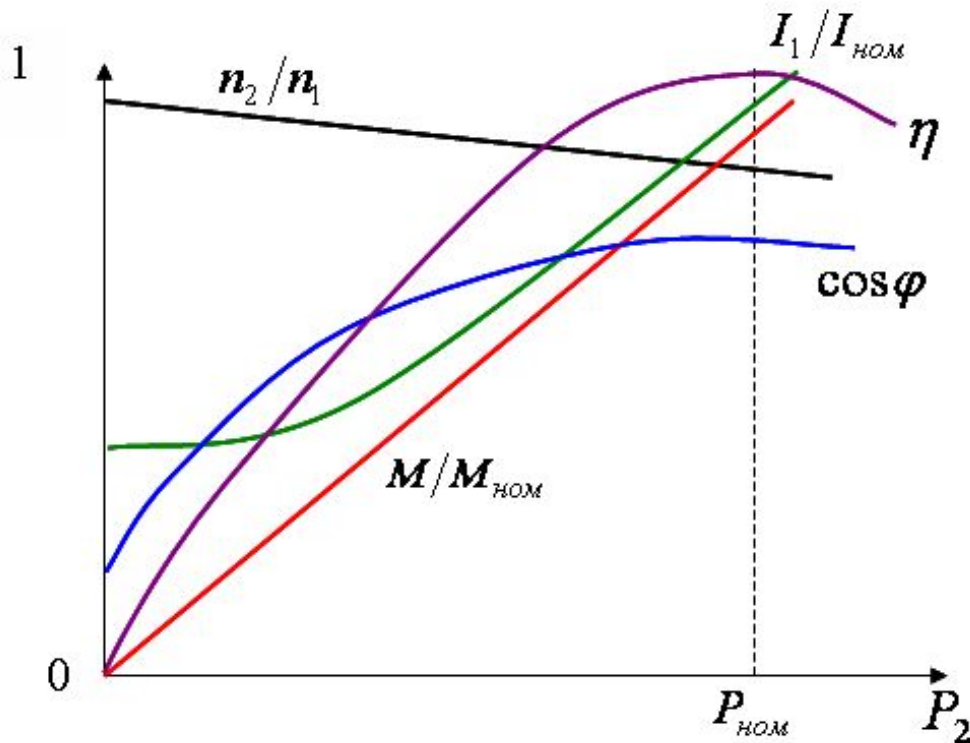


Рабочая область механической характеристики – область частот выше  $n_{кр}$ . В этой области ТАД обладает свойством саморегулирования. При частотах меньше критической свойства саморегулирования нет, и двигатель работает неустойчиво.

Свойство саморегулирования заключается в способности двигателя автоматически создавать момент вращения, равный моменту нагрузки, изменяя при этом частоту вращения.

**Важно:** как и в МПТ, в ТАД в установившемся режиме момент нагрузки определяет момент вращения и ток ротора, но не наоборот!

- Рабочие характеристики



- Частота меняется мало: см. рабочий участок механической характеристики;
- Момент связан линейно с мощностью  $P = M \cdot \Omega$
- Ток статора возрастает с ростом мощности, отданной в нагрузку. На ХХ ток не нулевой, т.к. ТАД имеет потери на нагрев обмотки статора и перемагничивание, значительный реактивный ток «тратится» на создание вращающегося магнитного поля.

- Коэффициент мощности на ХХ не нулевой (т.к. есть реактивная мощность – поле статора – и активные потери), с ростом нагрузки активная мощность растет, а реактивная остается почти постоянной (т.к.  $\Phi = \text{const}$ ). При большой нагрузке (и токах) непропорционально начинают увеличиваться потоки рассеяния, что эквивалентно росту реактивной мощности.
- КПД с ростом нагрузки от ХХ растет. Падение при больших мощностях связано с тем, что полезная мощность пропорциональна первой степени токов ротора и статора, а потери – квадрату тока. При больших мощностях (токах) потери преобладают над полезной мощностью

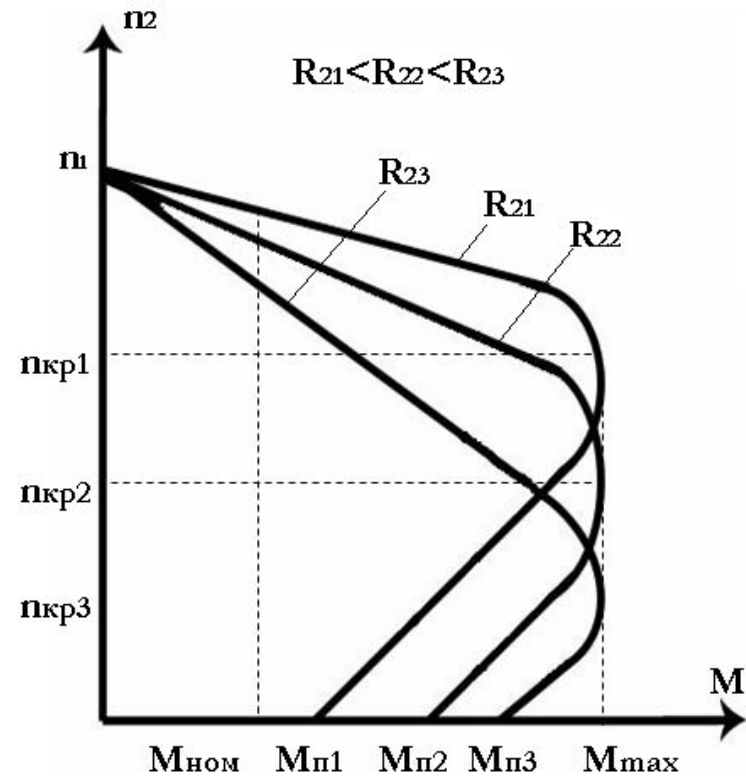
### 3.6. Регулирование частоты вращения ТАД

- **Реостатное регулирование**

Возможно только в ТАД с фазным ротором.

$$M = \frac{2 \cdot M_{max}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}$$

$$s_{кр} \sim R_2$$
$$M_{max} \sim U_1$$



Недостатки реостатного регулирования:

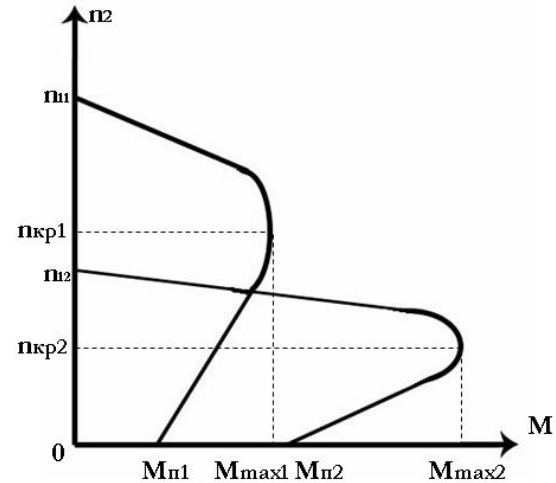
1. Сравнительно не большой диапазон изменения частоты вращения
2. Частота может только понижаться
3. Чем больше  $R_2$ , тем выше электрические потери и меньше КПД двигателя.

### 3.6. Регулирование частоты вращения ТАД

- **Полюсное регулирование (изменение числа пар полюсов)**

Меняется число пар полюсов (часть катушек на статоре может подключаться/отключаться). За счет этого меняется частота вращения поля статора.

Недостаток: частота меняется дискретно, что не удобно

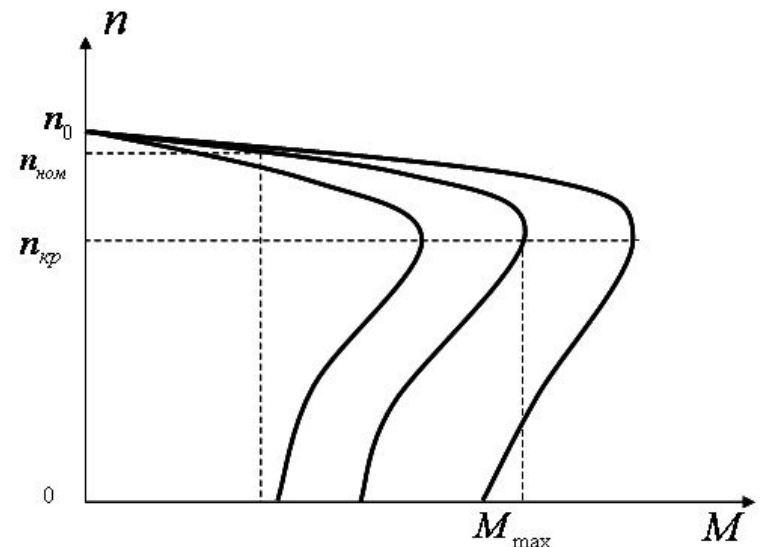


- **Регулирование напряжения сети**

Максимальный момент пропорционален квадрату напряжения статора  $U_1$ .

Недостатки:

- Частота изменяется в малых пределах
- при снижении напряжения снижается перегрузочная способность ТАД

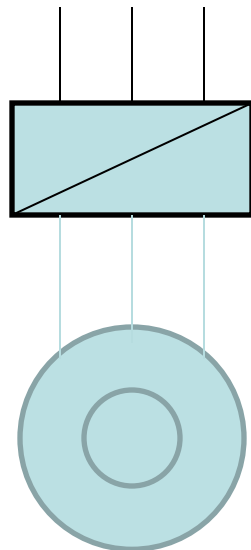


## 3.6. Регулирование частоты вращения ТАД

- Частотное регулирование

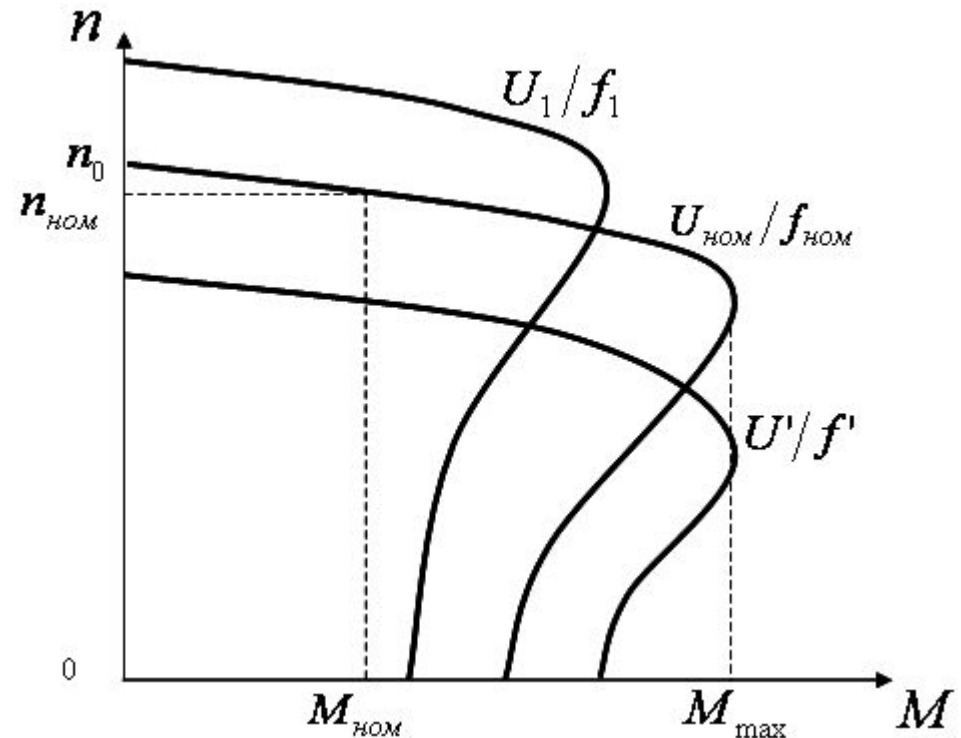
С помощью частотного преобразователя из трехфазного напряжения фиксированной частоты и амплитуды получают напряжение произвольной частоты и практически произвольной амплитуды.

Трехфазное напряжение 50 Гц 380 В



Частотный преобразователь

Трехфазное напряжение произвольной частоты и амплитуды



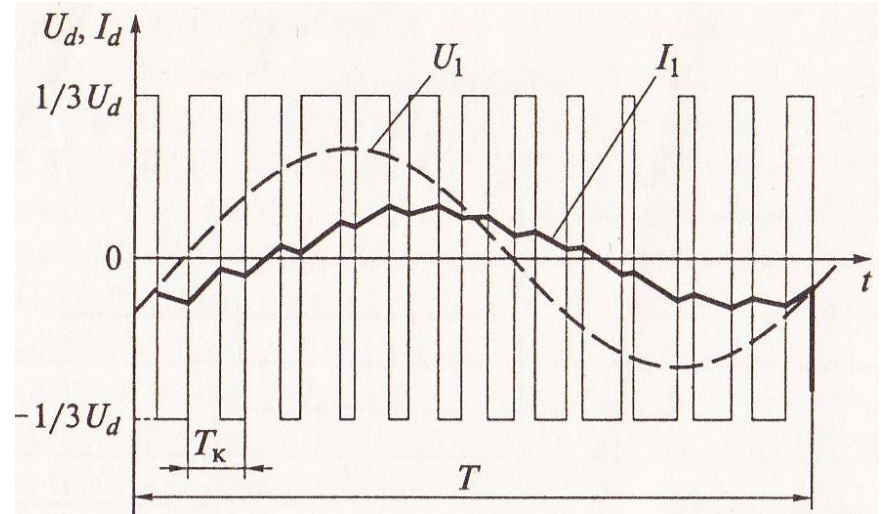
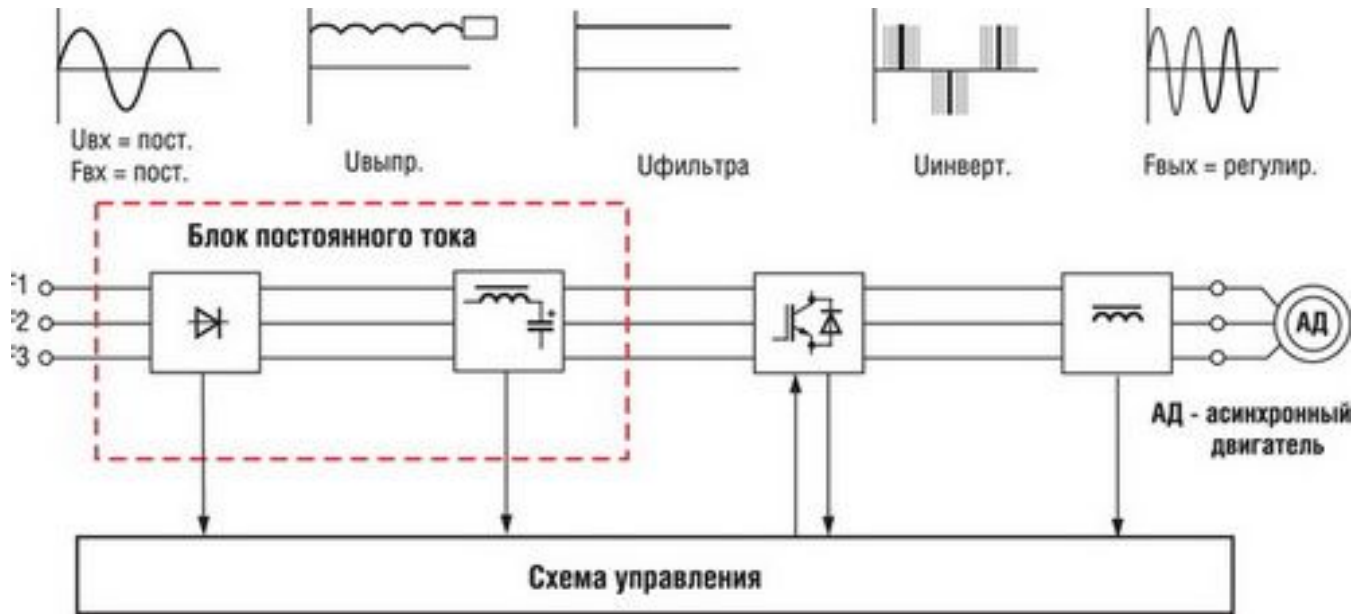
Для сохранения перегрузочной способности (чтобы максимальный момент оставался постоянным) при регулировании должно выполняться условие

$$\frac{U_1}{f} = \Phi = const$$

Момент зависит от квадрата потока,  $U_1 = 4,44 \cdot w_1 \cdot f \cdot \Phi_m$

Частотное регулирование экономично и применяется сейчас повсеместно. Это лучший способ регулирования

# Частотный преобразователь



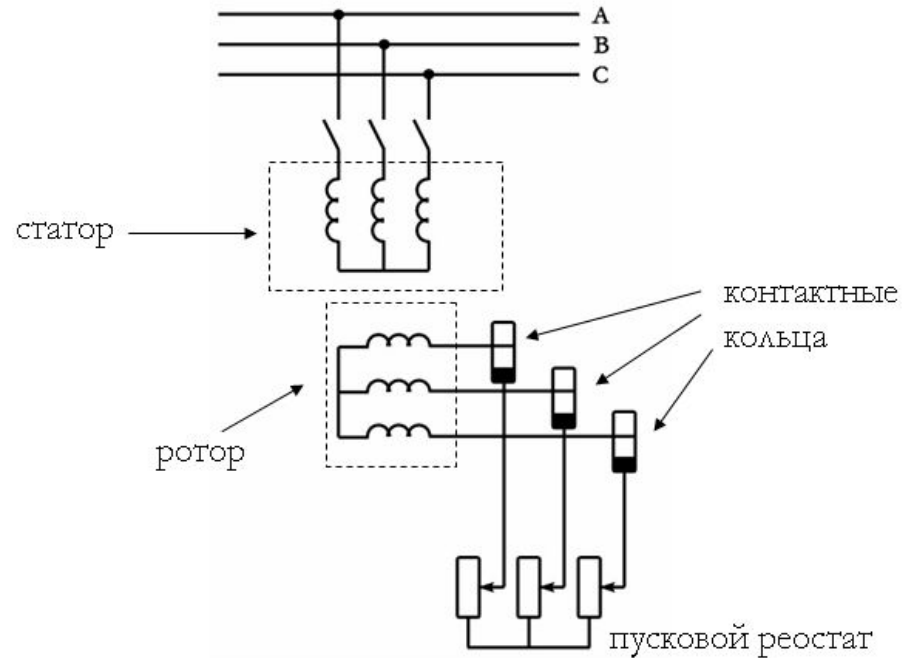
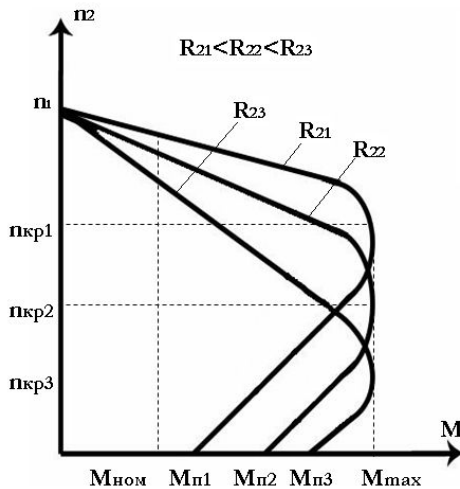
## 3.7. Пуск ТАД

- ТАД малой мощности включаются напрямую;
- ТАД большой мощности требуют ограничения пускового тока. ТАДу большой ток не вредит, но «подсаживает» сеть, что плохо сказывается на прочих потребителях.

Есть три способа ограничить пусковой ток: введением пускового реостата (ТАД с фазным ротором), снижением напряжения сети или переключением обмоток статора с треугольника на звезду.

- **Реостатный пуск (ТАД с фазным ротором)**

Введение пускового реостата позволяет снизить пусковой ток и увеличить пусковой момент.

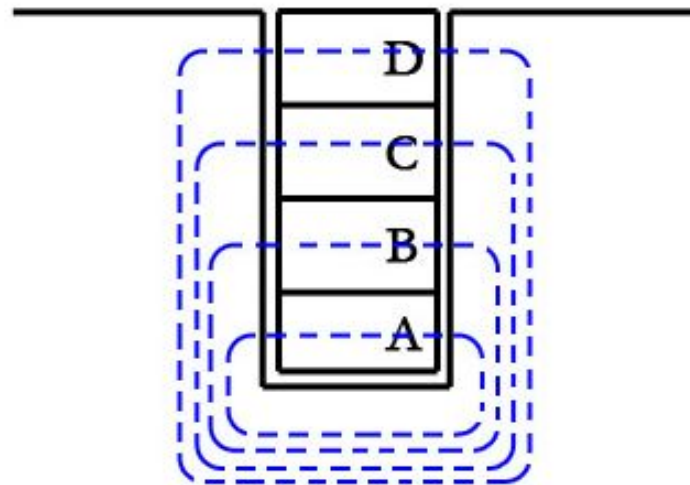




- **«Реостатный» пуск ТАД с короткозамкнутым ротором**

Для улучшения пусковых свойств обмотка ротора заливается в глубокие пазы.

При пуске  $s = 1$  и частота токов ротора максимальна, при этом за счет поверхностного эффекта ток течет не по всему сечению стержня, а в поверхностной зоне, т.о. обмотка имеет большое омическое сопротивление. В номинальном режиме ток течет по всему сечению.



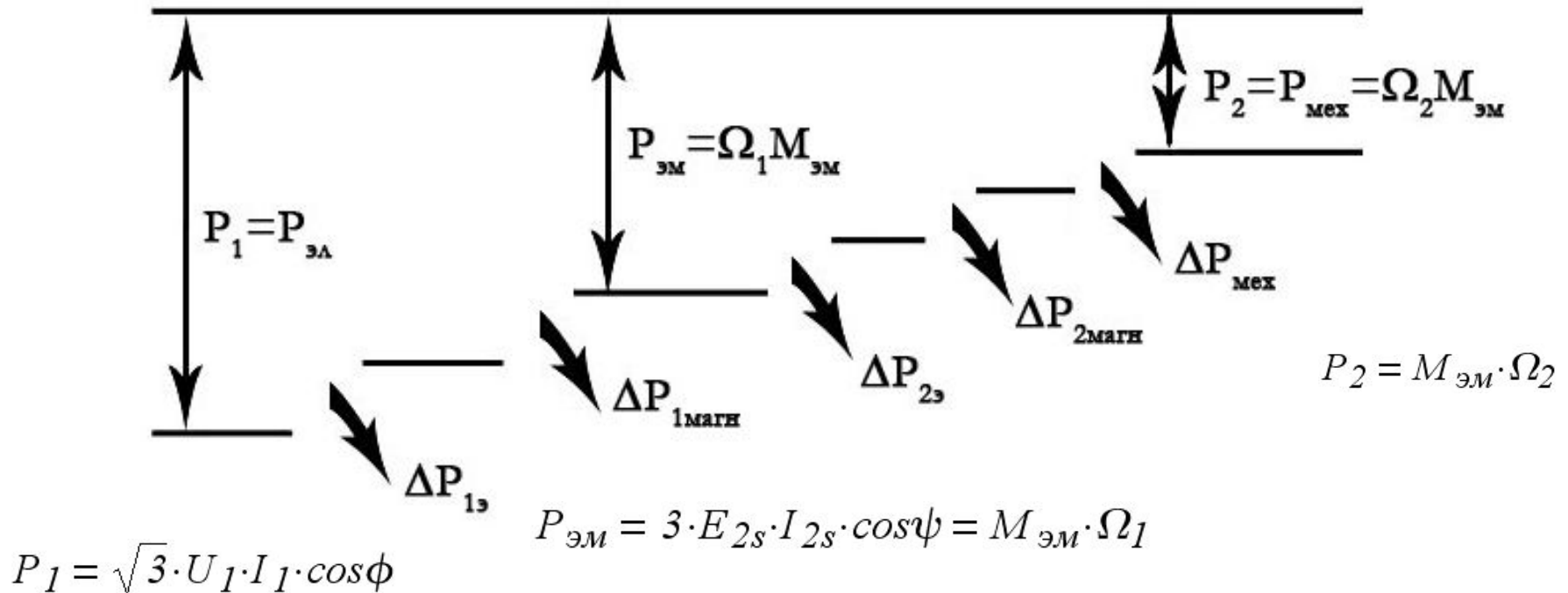
- **Пуск при пониженном напряжении.**

Снижение напряжения приводит к уменьшению пускового тока, одновременно снижается перегрузочная способность, поэтому такой способ применяют только при пуске без нагрузки. Для снижения напряжения статора используют частотный преобразователь.

- **Переключение обмоток статора с треугольника на звезду**

Используется, когда в номинальном режиме обмотка соединяется треугольником. Способ позволяет в 3 раза снизить пусковой ток. Одновременно в 3 раза снижается перегрузочная способность, т.к. напряжение на статоре меняется в корень из трех раз.

### 3.8. Преобразование энергии в ТАД



#### Общая характеристика ТАД

- Конструктивно просты;
- Надежны;
- Имеют большой спектр мощностей;
- При использовании частотного преобразователя позволяют регулировать частоту вращения в очень широких пределах.

*ТАД с частотным управлением – самый распространенный из всех типов двигателей*

## Общая характеристика ТАД

- Конструктивно просты;
- Надежны;
- Имеют большой спектр мощностей;
- При использовании частотного преобразователя позволяют регулировать частоту вращения в очень широких пределах.

*ТАД с частотным управлением – самый распространенный из всех типов двигателей*

# Задача 1

ТАД с фазным ротором рассчитан для работы от сети 220/380 В и имеет следующие номинальные параметры:

- мощность  $P_{\text{ном}} = 22$  кВт
- Частота  $n_{\text{ном}} = 2940$  об/мин
- КПД 88,5%
- $\cos\varphi = 0,91$
- $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 2,5$
- $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}} = 2,5$
- $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}} = 7,5$

Определить для номинального режима потребляемую из сети мощность, момент, ток статора при включении в сеть с линейным напряжением 380 В, скольжение, частоту токов ротора.

Определить для пускового режима: момент, пусковой ток.

Определить параметры критической точки, приняв  $s_{кр} = 2 \cdot s_{ном}$ .

Построить механическую характеристику.

Можно ли осуществить пуск двигателя при номинальной нагрузке, если напряжение сети снизится на 20%?

## Задача 2

Найти сопротивление резистора, включенного в фазу обмотки ротора для снижения частоты вращения двигателя до 2460 об/мин. Показать искусственную и естественную механические характеристики. Сопротивление обмотки ротора  $R_2 = 1 \text{ Ом}$ .

# Задача 3

В номинальном режиме ТАД имеет следующие параметры: момент: 71,4 Нм, мощность  $P_{\text{ном}} = 22$  кВт, Частота  $n_{\text{ном}} = 2940$  об/мин, КПД 88,5%,  $\cos\varphi = 0,91$ .

Как изменится ток, мощность и коэффициент мощности, если ТАД будет работать с моментом 50% от номинального? При решении принять следующие допущения:

- значение реактивной мощности принять неизменным.
- КПД возрастает линейно с увеличением нагрузки до 25% от номинальной нагрузки, а затем остается равным номинальному КПД.