



ФГБОУ ВО ЮГУ
ИНСТИТУТ
НЕФТИ И ГАЗА

Электрические машины

Дюба Елена Александровна,
Ст.преподаватель направления13.03.02

Ханты-Мансийск,2020

Копылов, Игорь Петрович.

Электрические машины в 2 т. [Текст] : Учебник / Копылов И.П. - 2-е изд., испр. и доп. - Электрон. дан.col. - М : Издательство Юрайт, 2017. - 407 с. - (Бакалавр. Академический курс). - Internet access. - 2-е издание. - 4 экз.. - ISBN 978-5-534-03224-6 :

<http://www.biblio-online.ru/book/0E104E98-A099-4380-92C0-03E0279FE844?>

Игнатович, Виктор Михайлович.

Электрические машины и трансформаторы [Текст] : Учебное пособие / Игнатович В.М., Ройз Ш.С. - 6-е изд., испр. и доп. - Электрон. дан.col. - М : Издательство Юрайт, 2018. - 181 с. - (Университеты России). - Internet access. - 6-е издание. - 4 экз.. - ISBN 978-5-534-00881-4 :

<http://www.biblio-online.ru/book/89C7C82B-4675-4289-8664-A30A8F8A611E?>

Карпенко, Леонид Николаевич.

Электрические машины. расчет и конструирование электромагнитных механизмов [Текст] : Учебное пособие / Карпенко Л.Н. - Электрон. дан.col. - М : Издательство Юрайт, 2018. - 254 с. - (Университеты России). - Internet access. - 1-е издание. - 4 экз.. - ISBN 978-5-9916-7530-7 :

<http://www.biblio-online.ru/book/43F242C4-A957-485C-8B1C-405ECD175DFB?>

Электрические машины — это устройства преобразующие механическую энергию в электрическую и наоборот, а так же машины преобразующие электрическую энергию одних параметров в электрическую энергию других параметров.

Классификация электрических машин по направлению преобразования энергии:

- генераторы, если основным является преобразование кинетической энергии в электрическую с побочным выделением тепла;
- двигатели, если основным является преобразование электрической энергии в кинематическую с побочным выделением тепла;
- трансформаторы (а также умформеры и фазорасщепители), если основным является преобразование электрической энергии с одними параметрами в электрическую с другими с побочным выделением тепла;
- электромеханические преобразователи энергии, если преобразование электрической энергии целенаправленно производится в тепловую и механическую.

Классификация электрических машин по назначению:

- генераторы
- двигатели
- тахогенераторы (для преобразования частоты вращения в электрический сигнал)
- электромашинные усилители (усилители мощности электрических сигналов)
- синхронные компенсаторы (для повышения коэффициента мощности)
- индукционные регуляторы (для регулирования напряжения переменного тока)
- сельсины (для получения электрических сигналов, пропорциональных углу поворота вала) и т. п.

Классификация электрических машин по принципу действия:

- Бесколлекторные машины — это машины переменного тока — асинхронные и синхронные.
- Коллекторные машины используют главным образом для работы на постоянном токе в качестве генераторов или двигателей. Лишь коллекторные машины небольшой мощности делают универсальными двигателями, способными работать как от сети постоянного, так и переменного тока.

Классификация электрических машин по мощности:

- большой — несколько сотен мегаватт
- средней — более 10 кВт
- малой — 0,5 — 10 кВт
- микромашины — меньше 0,5 кВт

Классификация по частоте вращения:

Условно их разделяют на:

- До 300 об/мин — тихоходные.
- От 300 до 1500 об/мин — средней быстроходности.
- От 1500 до 6000 об/мин — быстроходные.
- Более 6000 об/мин — сверхбыстроходные.

Микромашины же могут изготавливать с частотой вращения вала от нескольких оборотов в минуту до 60 000 оборотов в минуту. Скорость вращения машин средней и большой мощности, как правило, не превышает 3000 об/мин.



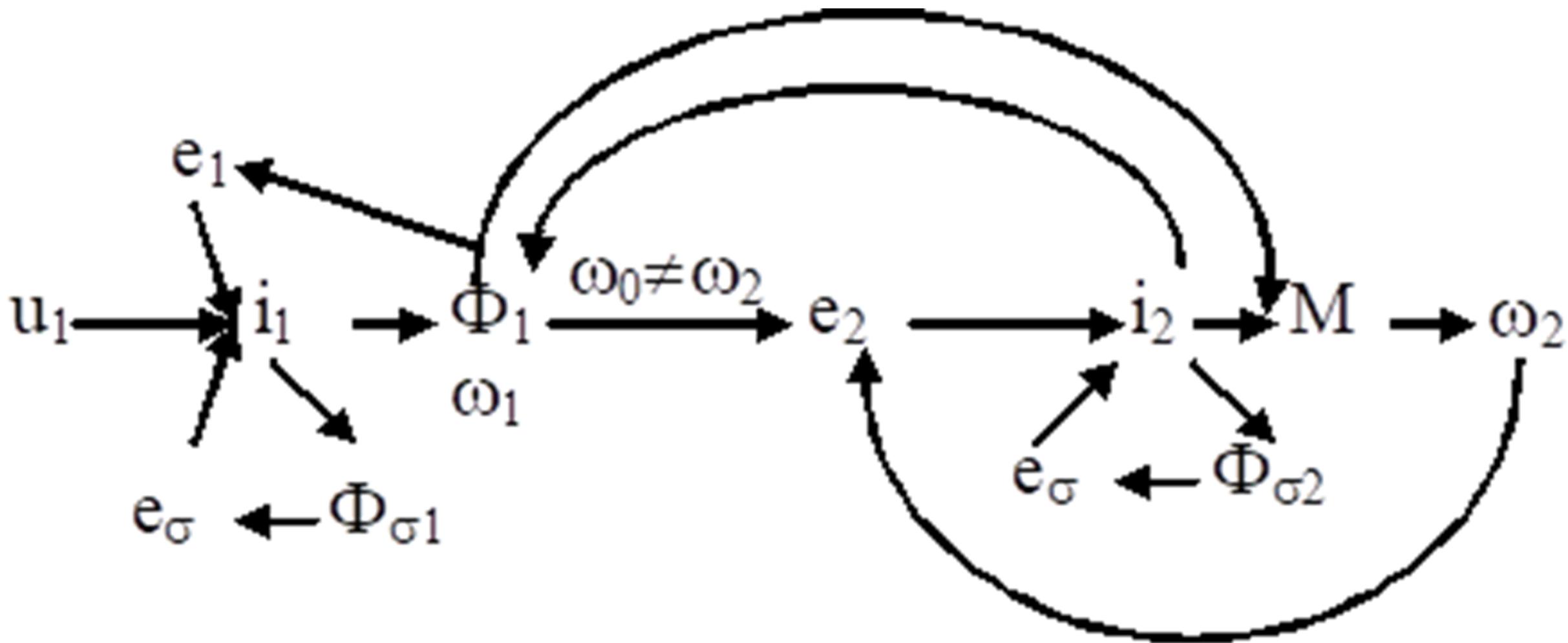
Асинхронно – слово греческого происхождения ($\alpha\sigma\acute{\upsilon}\chi\rho\nu\alpha$, где: α - отрицание, $\sigma\acute{\upsilon}\chi$ – вместе, $\chi\rho\nu\alpha$ – время), используется в русском языке для обозначения (наименования) процессов не совпадающих во времени.

Асинхронной, в электротехнике, принято называть машину, в процессе работы которой частота вращения ротора не равна частоте изменения магнитного поля создаваемого обмотками статора, вызывающего это вращение.

К асинхронным электрическим машинам относятся:

- асинхронные электрические двигатели с короткозамкнутым ротором,
- асинхронные электрические двигатели с фазным ротором,
- асинхронные микродвигатели общего применения,
- асинхронные тахогенераторы и другие, работающие по тому же принципу.

Принцип действия асинхронного двигателя



Во всех режимах работы асинхронных машин всегда присутствует вращающееся магнитное поле статора. Оно создаётся тремя обмотками, сдвинутыми в пространстве относительно друг друга на 120 градусов, скорость этого вращения равна:

$$n_1 = \frac{60f}{p}$$

Формула скорости вращения магнитного поля статора

где:

n_1 – Скорость вращения магнитного поля статора;

f – Частота питающей сети;

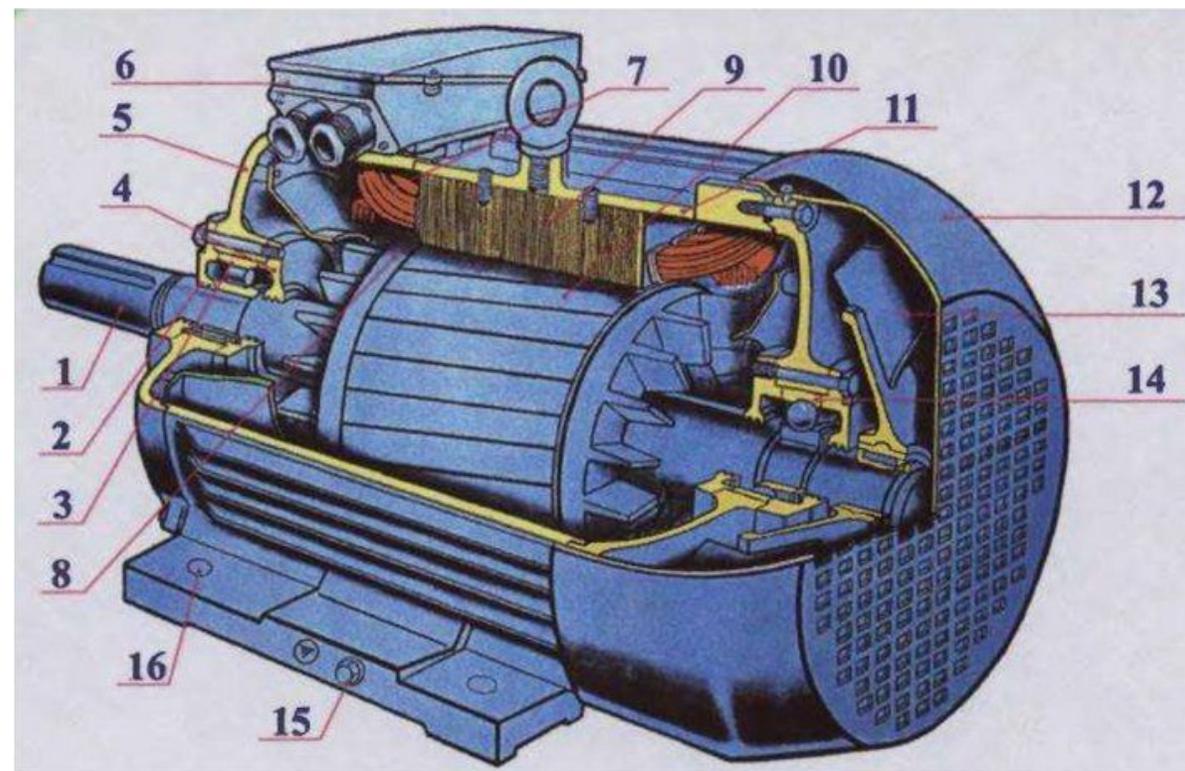
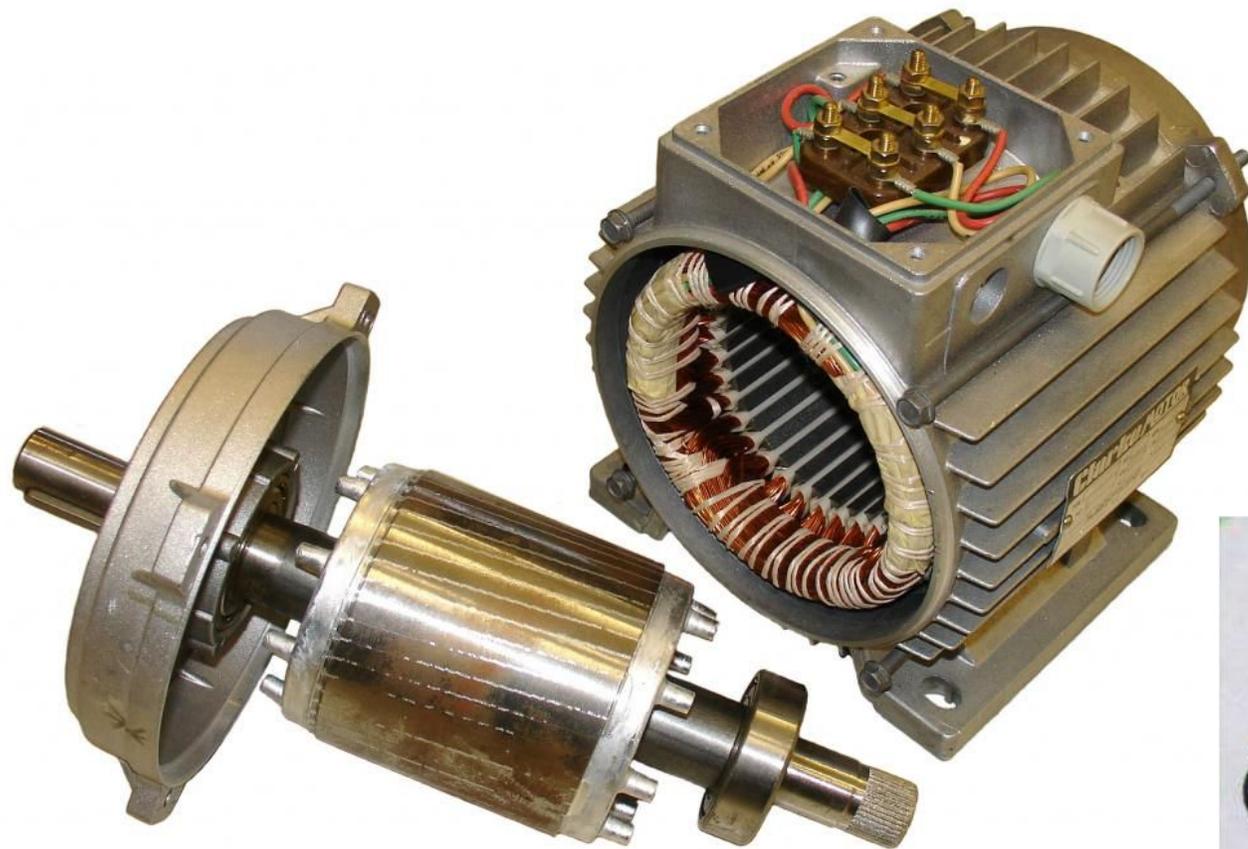
p – Количество пар полюсов;

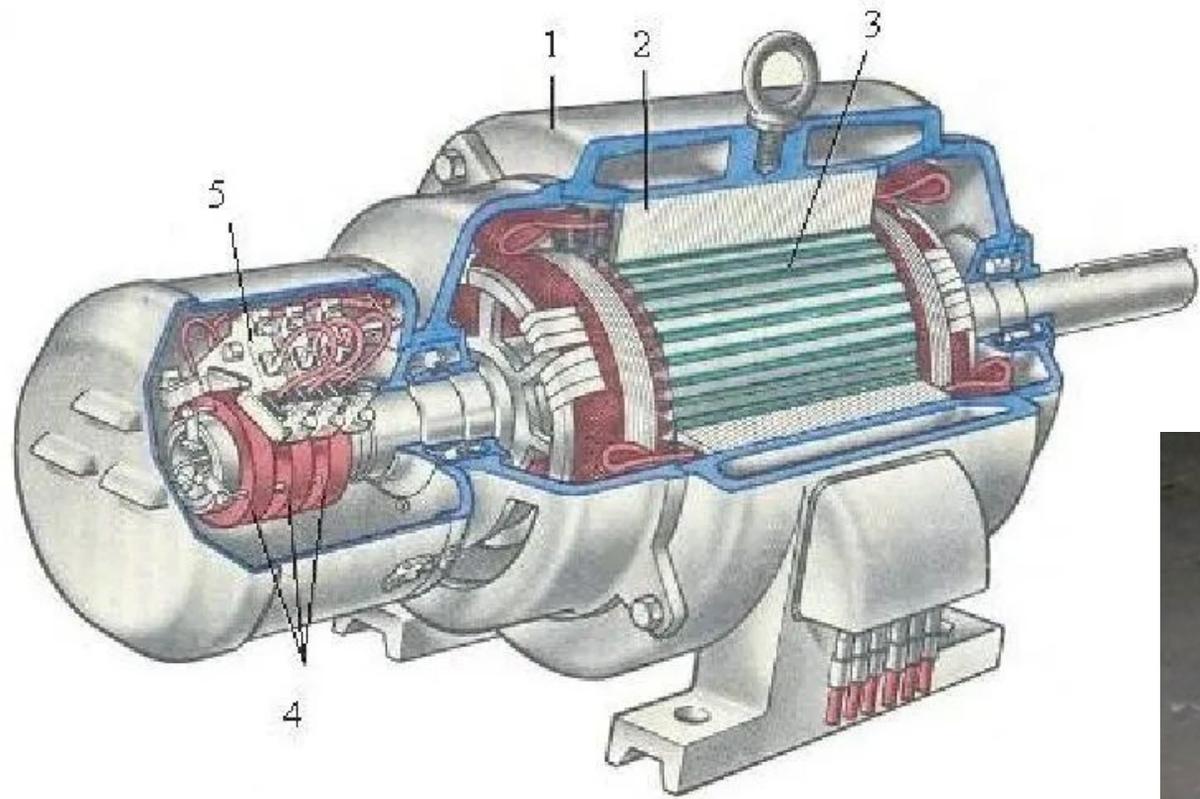
p	1	2	3	4	5	6	8	10	30	50
n_1 об/мин	3000	1500	1000	750	600	500	375	300	100	60

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

Режимы		Скольжение	Частота	Направления вращения ротора и магнитного поля статора
1.	Двигателя	$1 \geq S > 0$	$0 \leq n_2 < n_1$	совпадают
2.	Генераторный	$S < 0$	$n_2 > n_1$	совпадают
3.	Электромагнитного торможения	$S > 1$	$(n_2 < 0)^*$	не совпадают

где s – скольжение; n_2 – частота вращения ротора; n_1 – частота вращения магнитного поля статора;
 * - «отрицательная частота», абстрактное понятие, отражающее как скорость, так и направление вращения.







Короткозамкнутый ротор

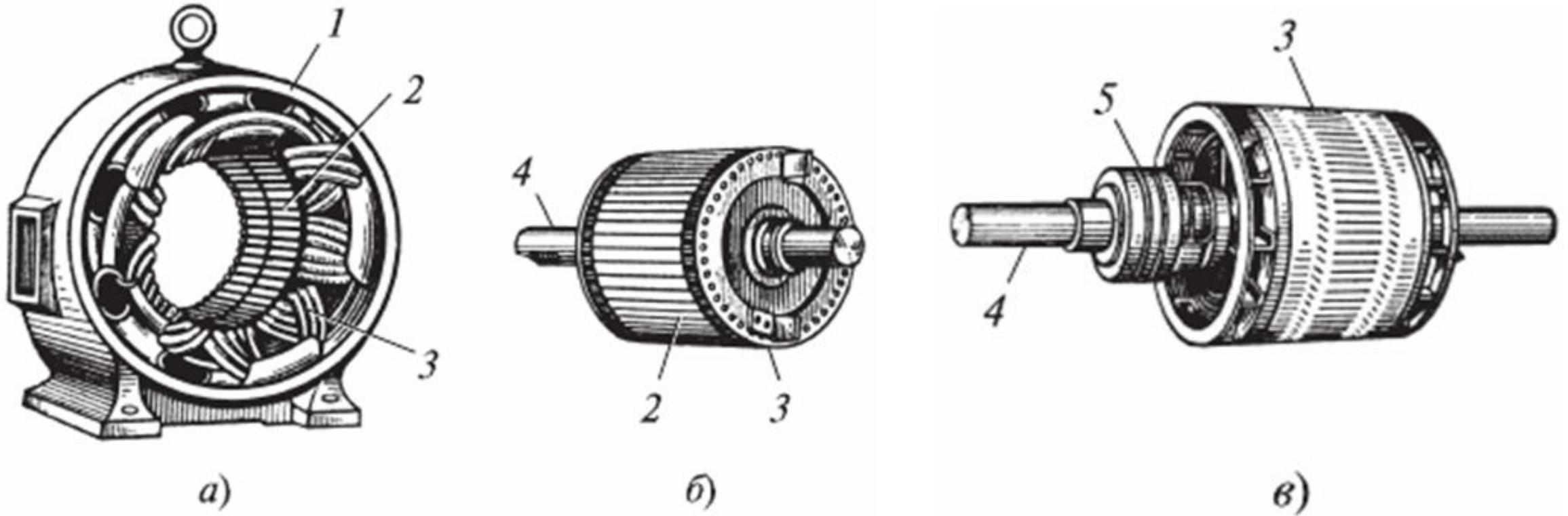
с короткозамкнутым ротором – имеет тяжелый пуск, но и меньшую стоимость;

с фазным ротором – на роторе устанавливается вспомогательная обмотка, делающая работу электродвигателя более плавной.



Фазный ротор

устройство асинхронных электродвигателей

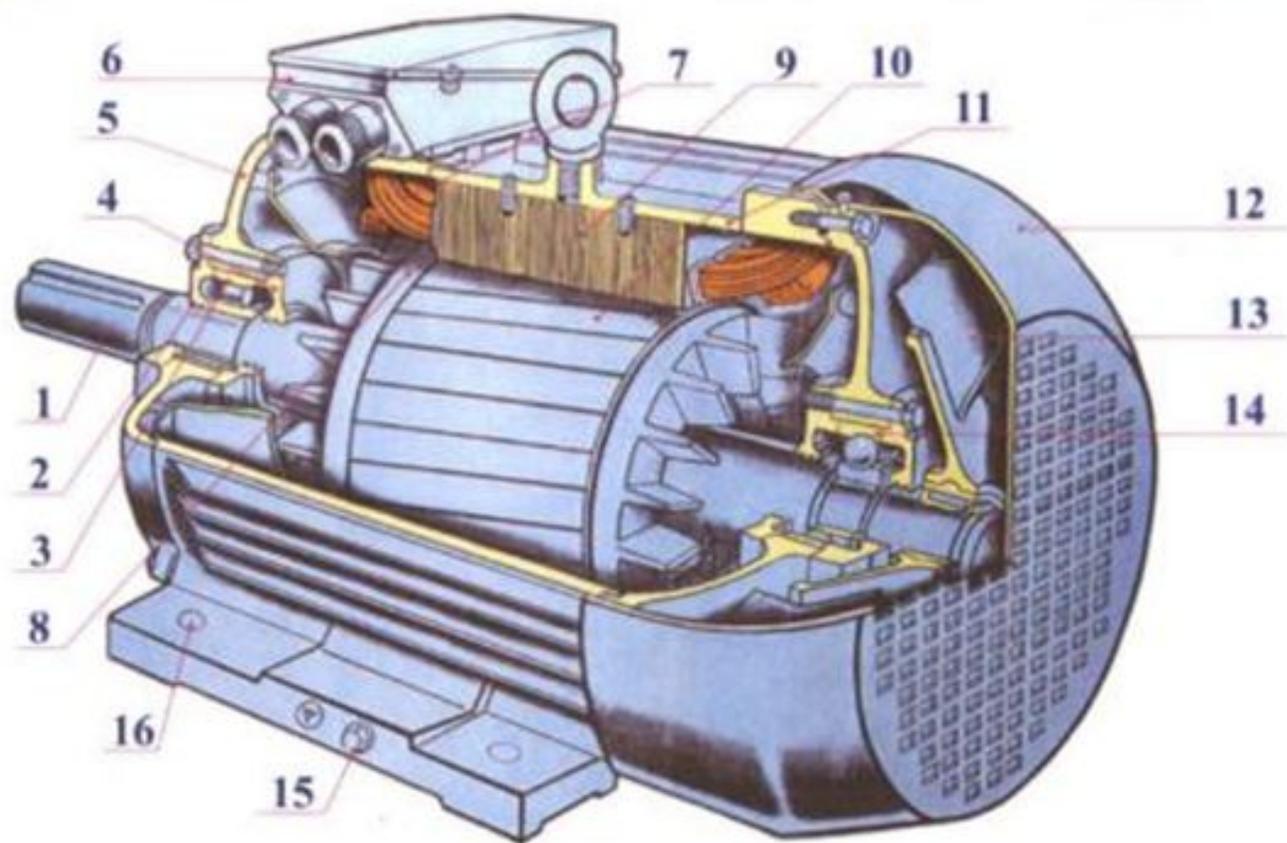


Асинхронный электродвигатель в разобранном виде:
а) статор; б) ротор в короткозамкнутом исполнении; в) ротор в фазном исполнении
(1 – станина; 2 – сердечник из штампованных стальных листов; 3 – обмотка;
4 – вал; 5 – контактные кольца)

МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

(ИСПОЛНЕНИЕ IP 44)

АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ



- 1 - вал;
- 2 - наружная крышка подшипника;
- 3 - роликовый подшипник;
- 4 - внутренняя крышка подшипника;
- 5 - подшипниковый щит;
- 6 - коробка выводов;
- 7 - обмотка статора;
- 8 - обмотка ротора;
- 9 - сердечник статора;
- 10 - сердечник ротора;
- 11 - корпус электродвигателя;
- 12 - кожух вентилятора;
- 13 - вентилятор;
- 14 - шариковый подшипник;
- 15 - болт заземления;
- 16 - отверстия для болта крепления двигателя.

Звезда и треугольник

Трехфазная обмотка статора электродвигателя соединяется по схеме "звезда" или "треугольник" в зависимости от напряжения питания сети. Концы трехфазной обмотки могут быть: соединены внутри электродвигателя (из двигателя выходит три провода), выведены наружу (выходит шесть проводов), выведены в распределительную коробку (в коробку выходит шесть проводов, из коробки три).

Фазное напряжение - разница потенциалов между началом и концом одной фазы. Другое определение для соединения "звезда": фазное напряжение это разница потенциалов между линейным проводом и нейтралью (обратите внимание, что у схемы "треугольник" отсутствует нейтраль).

Линейное напряжение - разность потенциалов между двумя линейными проводами (между фазами).

Схема соединения обмоток в треугольник (сеть 220 В)

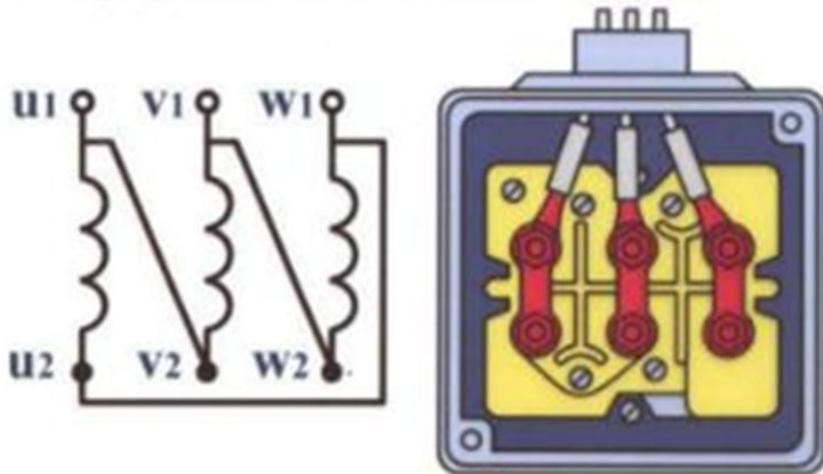
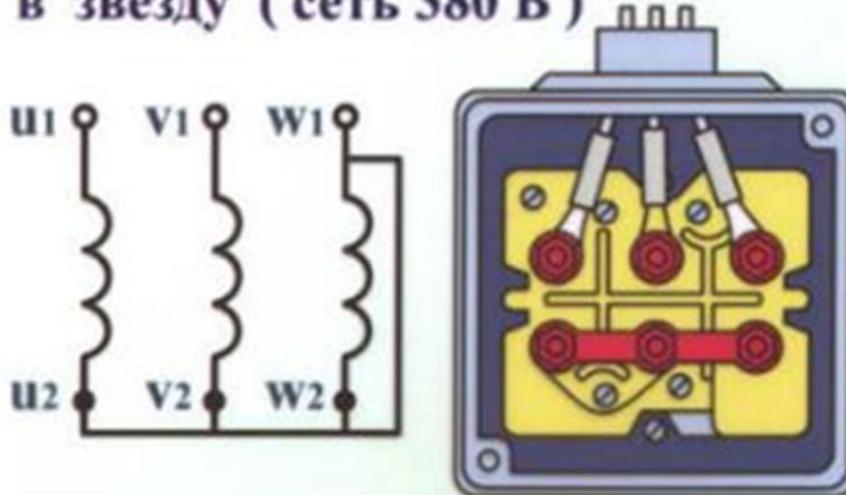


Схема соединения обмоток в звезду (сеть 380 В)



Основные достоинства асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором:

1. Очень простое устройство, что позволяет сократить затраты на его изготовление.
2. Цена намного меньше по сравнению с другими двигателями.
3. Очень простая схема запуска.
4. Скорость вращения вала практически не меняется с увеличением нагрузки.
5. Хорошо переносит кратковременные перегрузы.
6. Возможность подключения трёхфазных двигателей в однофазную сеть.
7. Надёжность и возможность эксплуатировать практически в любых условиях.
8. Имеет очень высокий показатель КПД и $\cos \varphi$.

Недостатки:

1. Нет возможности контролировать частоту вращения ротора без потери мощности.
2. Если увеличить нагрузку, то уменьшается момент.
3. Пусковой момент очень мал по сравнению с другими машинами.
4. При недогрузе увеличивается показатель $\cos \varphi$
5. Высокие показатели пусковых токов.

Достоинства двигателей с фазным ротором:

1. По сравнению с короткозамкнутыми двигателями, имеет достаточно большой вращающий момент. Что позволяет его запускать под нагрузкой.
2. Может работать с небольшим перегрузом, и при этом частота вращения вала практически не меняется.
3. Небольшой пусковой ток.
4. Можно применять автоматические пусковые устройства.

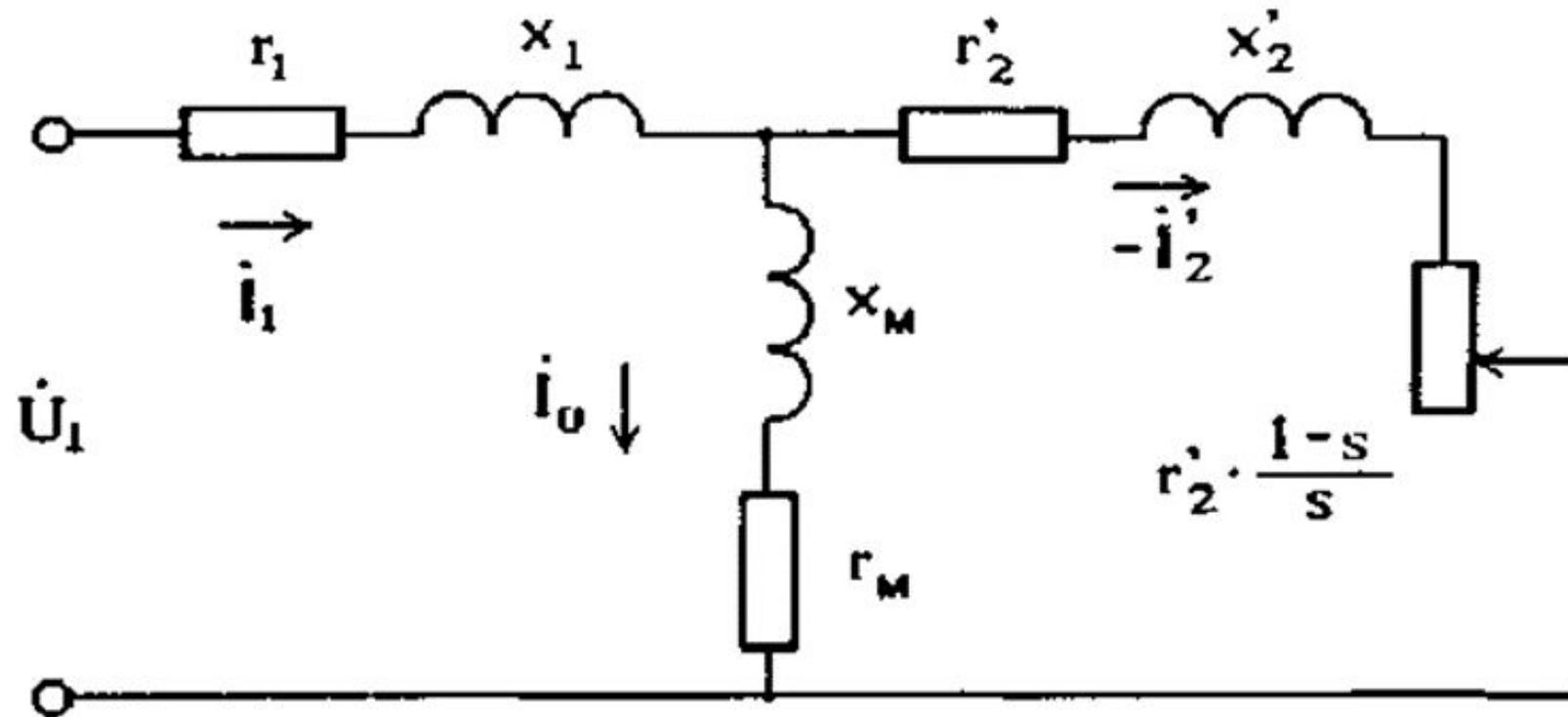
Недостатки:

1. Большие габариты.
2. Показатели КПД и $\cos \varphi$ меньше, чем у двигателей с короткозамкнутым ротором. И при недогрузе эти показатели имеют минимальное значение
3. Нужно обслуживать щёточный механизм.

$$E_1 = 4,44k_1f_1w_1\Phi_m; E_2 = 4,44 k_2f_1 w_2\Phi_m ,$$

где E_1 – фазное значение ЭДС, наводимой в обмотке статора; E_2 – фазное значение ЭДС, наводимой в обмотке ротора при неподвижном его состоянии ($s=1; n_2=0$); w_1, w_2 – число витков в фазных обмотках статора и ротора; Φ_m – амплитудное значение магнитного потока фазы асинхронного двигателя; k_1, k_2 – обмоточные коэффициенты статора и ротора асинхронного двигателя.

Обмоточные коэффициенты всегда меньше единицы и в современных асинхронных машинах составляют 0,85 – 0,95. Они обусловлены тем, что в машине переменного тока витки обмотки распределены по внутренней поверхности статора и не одновременно пересекаются магнитным потоком.

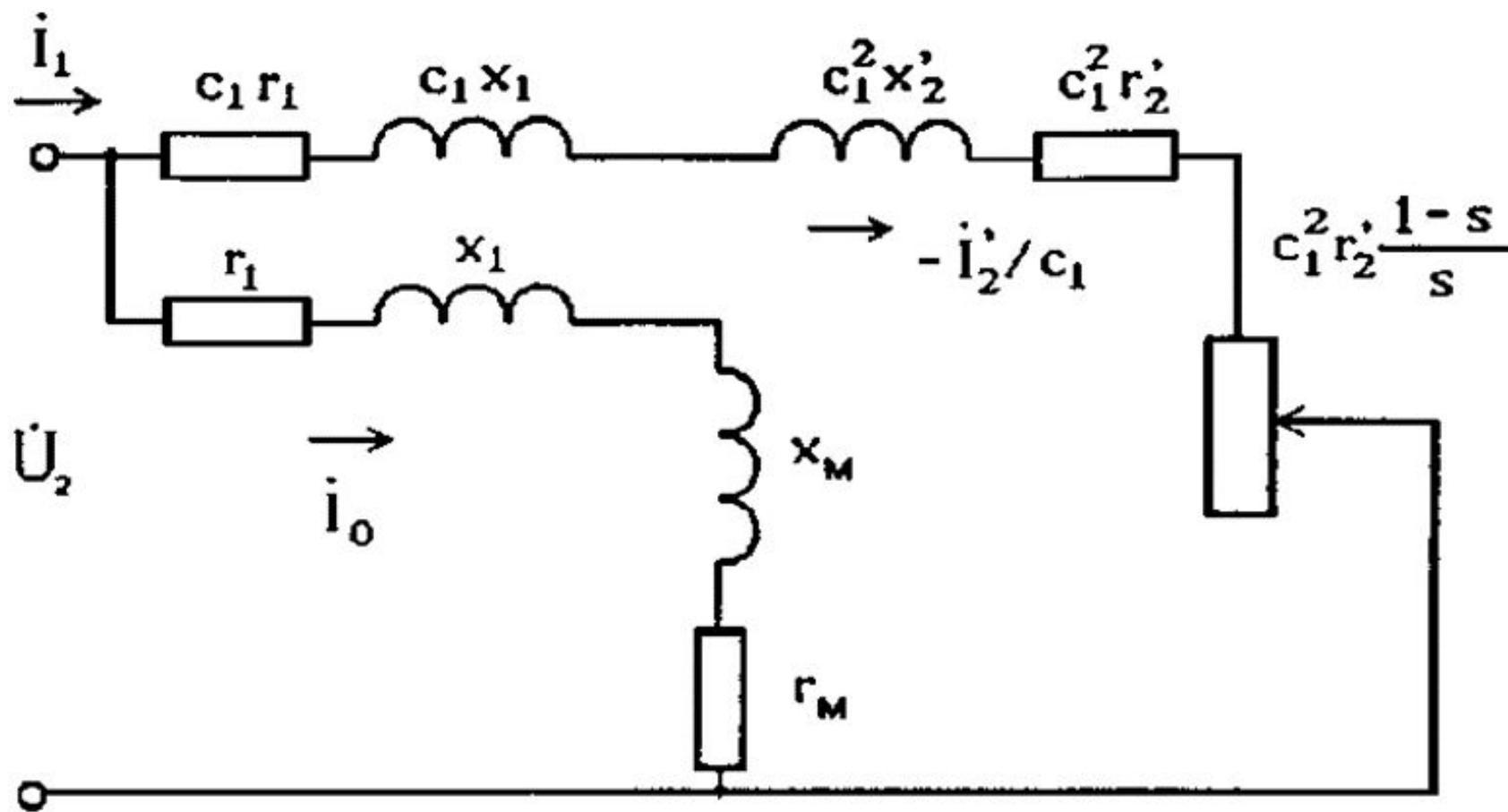


T-образная схема замещения АД.

$$U_1 = (-E_1) + A_1 \cdot r_1 + j \cdot A_1 \cdot x_1$$

$$F_2 \cdot r'_2 \cdot \frac{1-s}{s} = E'_2 - F_2 \cdot r'_2 - j \cdot F_2 \cdot x'_2$$

$$A_1 = A_0 + (-F_2)$$



Γ -образная схема замещения АД.

$$P_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left[r_1 + r'_2 + \frac{r'_2 \cdot (1-s)}{s} \right]^2 + (x_1 + x'_2)^2}}$$

После упрощения (с учетом

$$\frac{r'_2}{s} = \frac{r'_2}{s} - \frac{r'_2 \cdot s}{s} + \frac{r'_2 \cdot s}{s} = r'_2 + r'_2 \cdot \frac{1-s}{s}$$

получим:

$$P_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}}$$

В двигательном режиме активная мощность P_1 потребляется из сети и передается на вал, в генераторном – потребляется со стороны вала и отдается в сеть:

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

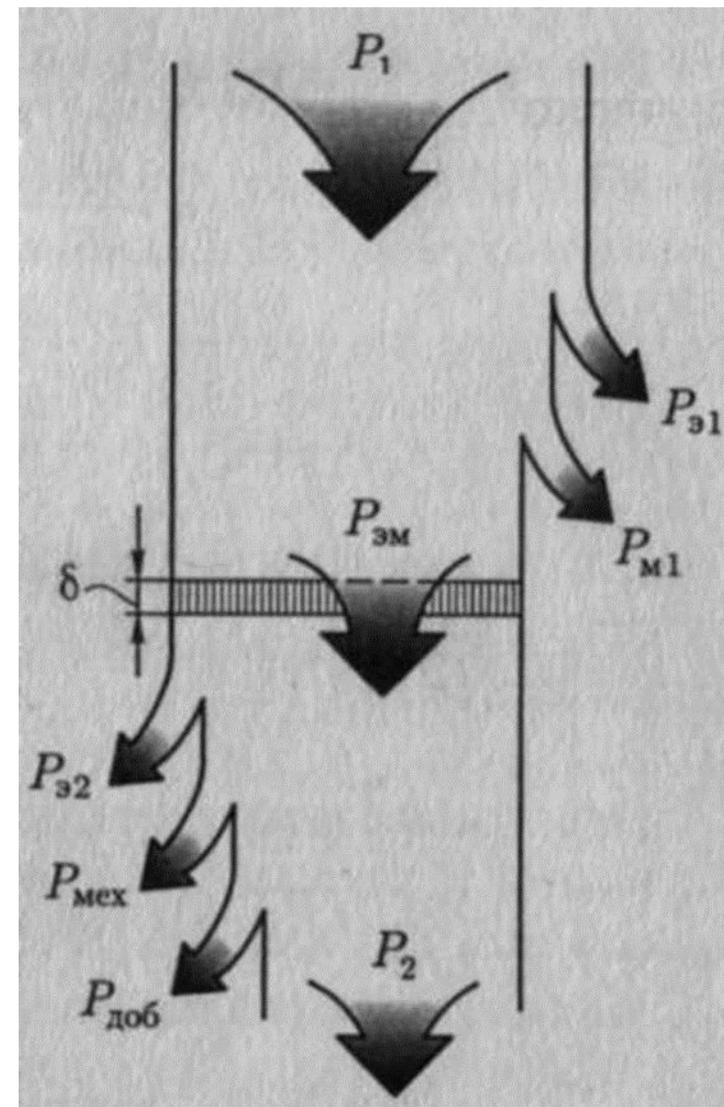
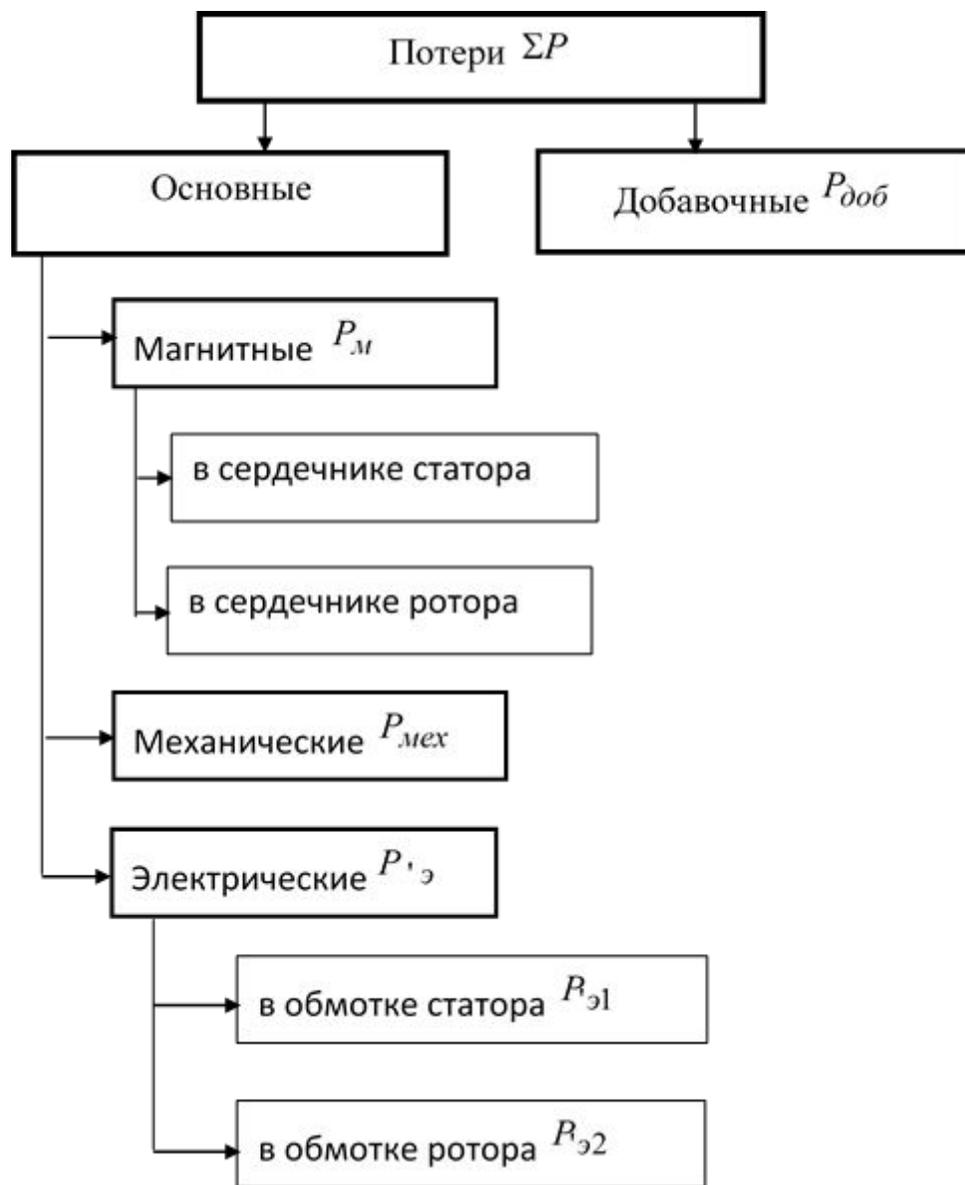
где m_1 - число фаз обмотки статора, U_1 - напряжение, подведенное к обмотке статора, I_1 - ток статора, $\cos \varphi_1$ - коэффициент мощности.

Преобразование электрической энергии в механическую в АД, как и других электрических машинах, связано с потерями энергии. Поэтому полезная мощность (мощность на валу) АД P_2 всегда меньше потребляемой из сети P_1 на величину потерь ΣP .

Сумма всех потерь АД

$$\Sigma P = P_m + P_{мех} + P_{\varepsilon 1} + P_{\varepsilon 2} + P_{доб}$$

Классификация потерь АД.



Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Магнитные потери

Магнитные потери P_m связаны с потерями на гистерезис и на вихревые токи в сердечниках статора и ротора при их перемагничивании. Частота перемагничивания сердечника статора равна частоте тока в сети f_1 , а частота перемагничивания сердечника ротора $f_1 - f_2 = f_1 \cdot s$. При $f_1 = 50$ Гц и скольжениях, соответствующих рабочему режиму работы АД, $s = 0,01 \dots 0,08$ $f_1 - f_2 = 0,5 \dots 2$ Гц. Поэтому магнитные потери в сердечнике ротора пренебрежимо малы.

Таким образом, при $f_1 = const$ можно принять, что $P_m = const$.

Механические потери

Механические потери P_{mex} – это потери на трение в подшипниках и вентиляцию. Величина этих потерь пропорциональна квадрату частоты вращения ротора.

Элект рические пот ери

Электрические потери в обмотках статора $P_{\text{э1}}$ и ротора $P_{\text{э2}}$:

$$P_{\text{э1}} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1 ,$$

$$P_{\text{э2}} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2 = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' .$$

Здесь m_2 – число ф аз обмотки статора, r_1 и r_2 - активные сопротивления обмоток ф аз статора и ротора, пересчитанные на рабочую температуру $\Theta_{\text{раб}}$.

$$r_1 = r_{1,20} \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\Theta_{\text{раб}} - 20) \right]; \quad r_2 = r_{2,20} \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\Theta_{\text{раб}} - 20) \right],$$

где $r_{1,20}$, $r_{2,20}$ – сопротивления обмоток соответственно статора и ротора при температуре 20°C .

Добавочные потери

Добавочные потери $P_{доб}$ включают в себя все виды трудно учитываемых потерь, вызванных действием высших гармоник магнитодвижущей силы, пульсацией магнитной индукции в зубцах и другими причинами. В соответствии с ГОСТ добавочные потери АД принимают равными 0,5 % от подводимой к двигателю мощности P_1 :

$$P_{доб} = 0,005 \cdot P_1$$

При расчете добавочных потерь для неноминального режима рекомендуется воспользоваться выражением

$$P'_{доб} = P_{доб} \cdot \beta^2,$$

где $\beta = \frac{I_1}{I_{1ном}}$ - коэффициент нагрузки.

Электромагнитная мощность

Электромагнитная мощность $P_{эм}$ - это электромагнитная мощность АД, передаваемая через воздушный зазор магнитным полем от статора к ротору,

$$P_{эм} = P_1 - (P_m + P_{э1}).$$

Электромагнитная мощность частично расходуется на электрические потери в роторе $P_{э2}$, а также на покрытие механических $P_{мех}$ и добавочных $P_{доб}$ потерь. Оставшаяся мощность и составляет полезную мощность P_2 :

$$P_2 = P_{эм} - P_{э2} - P_{мех} - P_{доб}.$$

Если пренебречь незначительными по величине добавочными потерями и не учитывать механические потери, то электромагнитную мощность можно выразить через мощность P_2 на валу АД как

$$P_{эм} = P_2 + P_{э2}.$$

С другой стороны электромагнитную мощность при тех же допущениях можно выразить через электромагнитный момент АД M , создаваемый в силу взаимодействия тока в обмотке ротора с вращающимся магнитным полем, как

$$P_{эм} = M \cdot \omega_1,$$

Мощность на валу АД

$$P_2 = M_2 \cdot \omega_2.$$

Отсюда

$$M \cdot \omega_1 = M_2 \cdot \omega_2 + P_{э2}$$

А, поскольку электромагнитный момент и есть момент на валу АД, т.е.

$M = M_2$, то

$$P_{э2} = M \cdot (\omega_1 - \omega_2) = M \cdot \omega_1 \cdot s = P_{эм} \cdot s.$$

Рабочие характеристики АД представляют собой графически выраженные зависимости частоты вращения ротора n_2 , полезного момента (момента на валу) M_2 , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$, к.п.д. η , и тока статора I_1 от полезной мощности P_2 при $U_1 = const$ и $f_1 = const$.

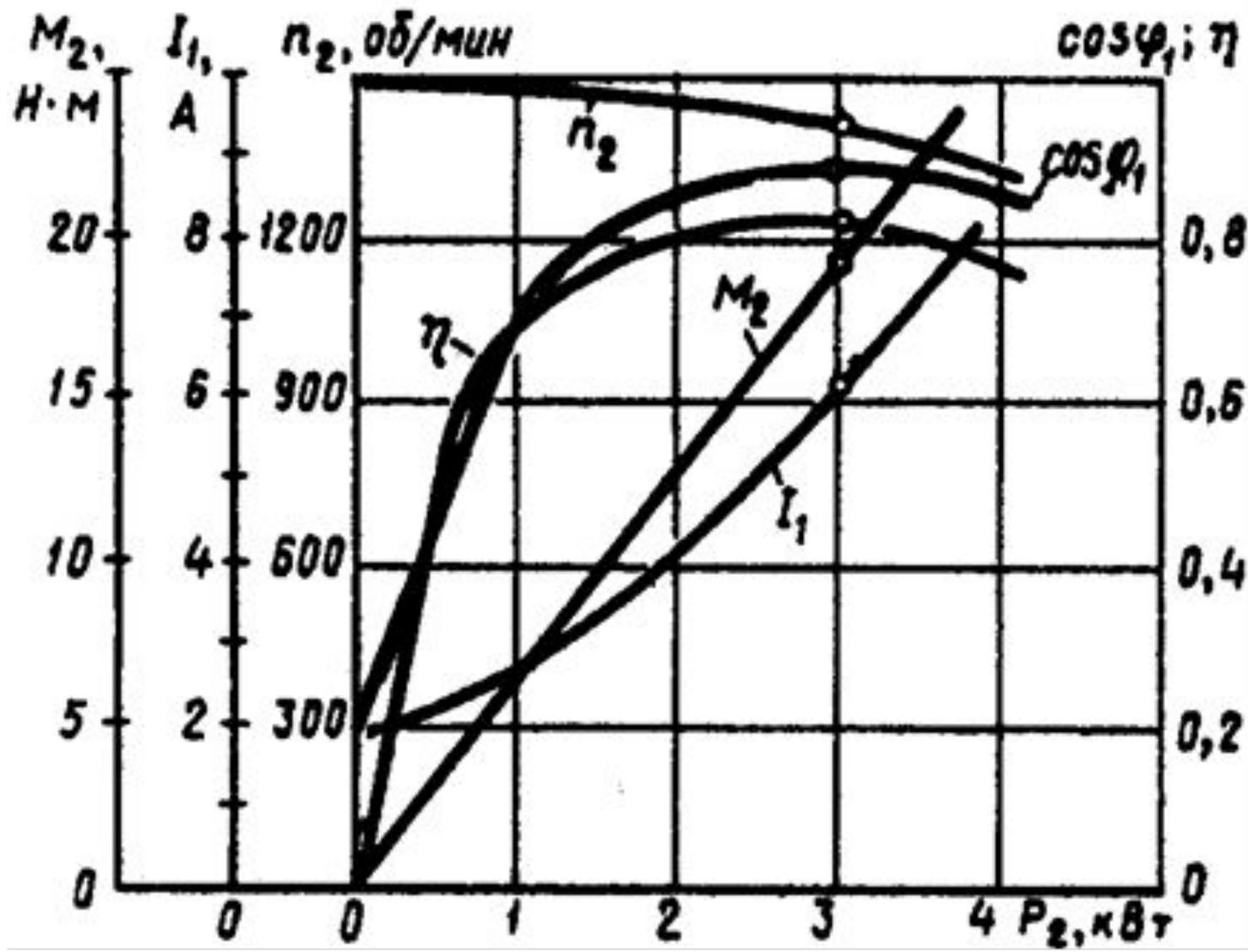
$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s)$$

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega_2}$$

$$s = \frac{P_{\text{э}2}}{P_{\text{эм}}}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_{1a}} = \frac{1 - s}{as + 1} \quad a = \frac{r_1}{r_2}$$

$$n_2 = n_1 \cdot \left(1 - \frac{P_{\text{э}2}}{P_{\text{эм}}}\right)$$



Примерный вид рабочих характеристик АД.

Скоростная характеристика $n_2 = f(P_2)$ -

Частота вращения ротора асинхронного двигателя

$$n_2 = n_1(1-s)$$

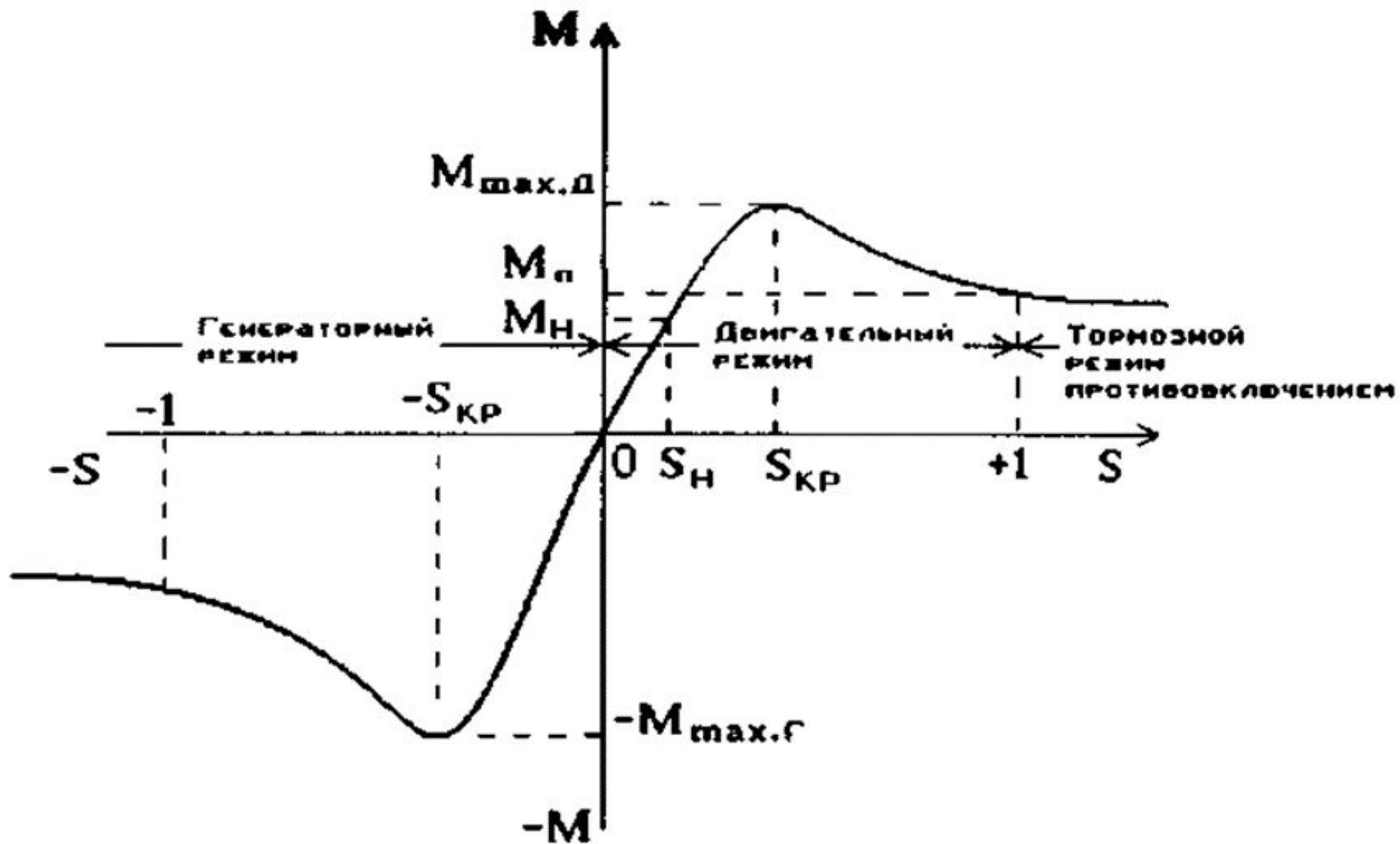
Скольжение

$$s = P_{\text{э2}}/P_{\text{эм}}$$

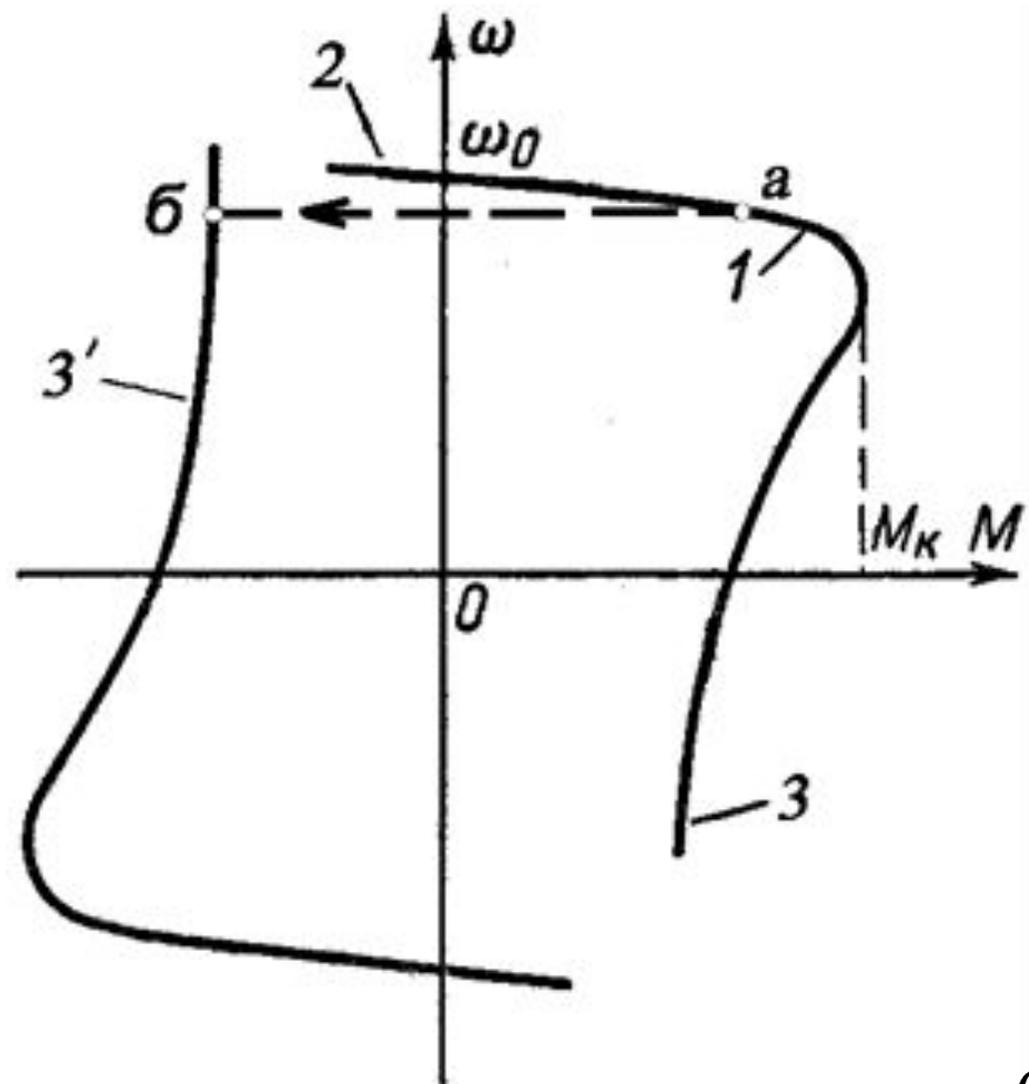
т. е. скольжение двигателя, а следовательно, и его частота вращения определяются отношением электрических потерь в роторе к электромагнитной мощности $P_{\text{эм}}$. Пренебрегая электрическими потерями в роторе в режиме холостого хода, ввиду их небольшой величины, можно принять $P_{\text{э2}} = 0$, поэтому скольжение в режиме холостого хода $s_0 \approx 0$ и $n_{20} \approx n_1$. По мере увеличения нагрузки на валу двигателя отношение $s = P_{\text{э2}}/P_{\text{эм}}$ растет, достигая значений 0,01 — 0,08 при номинальной нагрузке. В соответствии с этим зависимость $n_2 = f(P_2)$ представляет собой кривую, слабо наклоненную к оси абсцисс. Однако при повышении активного сопротивления ротора r_2 угол наклона этой кривой увеличивается. В этом случае изменения частоты вращения n_2 при колебаниях нагрузки P_2 возрастают. Объясняется это тем, что с увеличением r_2 возрастают электрические потери в роторе.

Зависимость $M = f(s)$ при $U_1 = const$ и $f_1 = const$ принято называть механической характеристикой АД.

$$M = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot r'_2 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s \cdot \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]}$$



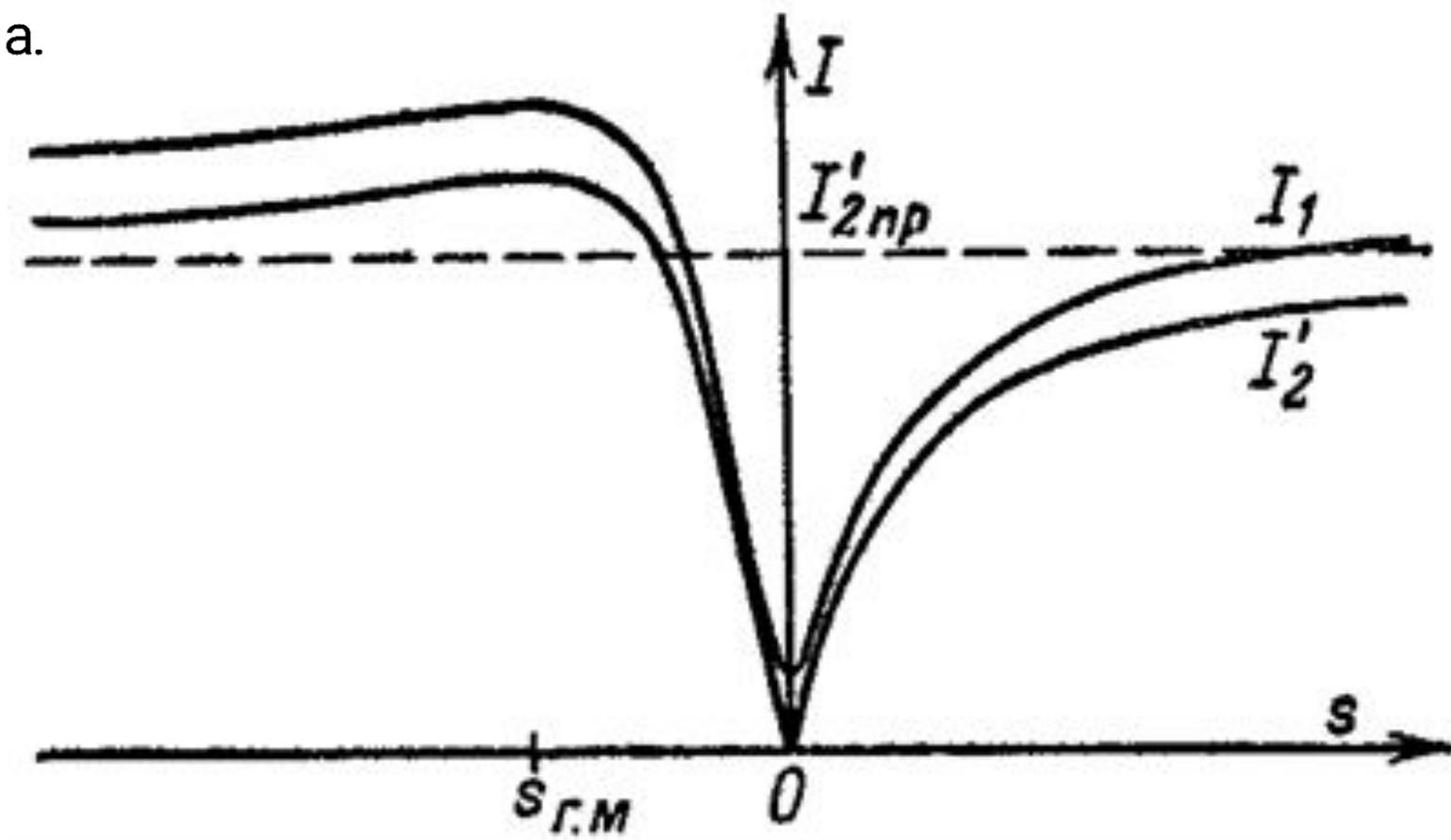
Механическая характеристика АД в координатах $M = f(s)$.



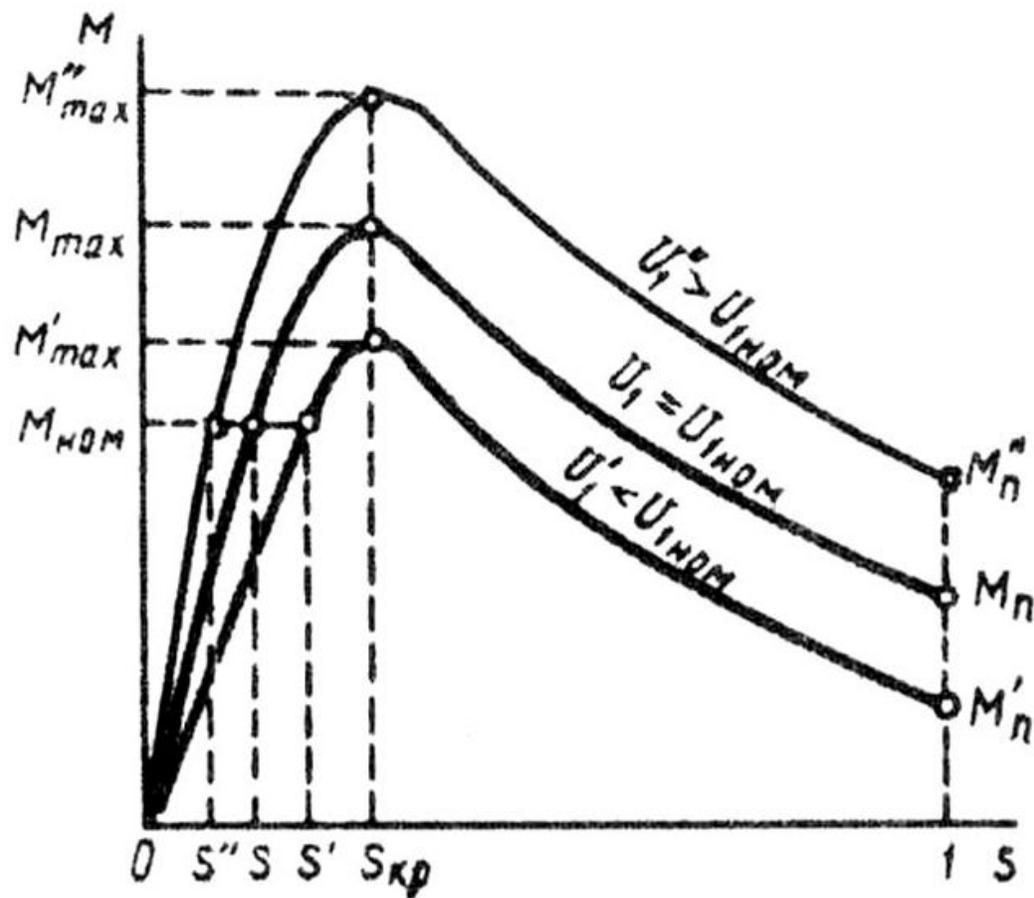
Механическая характеристика АД в координатах $\omega = f(M)$.

Электромеханические характеристики АД

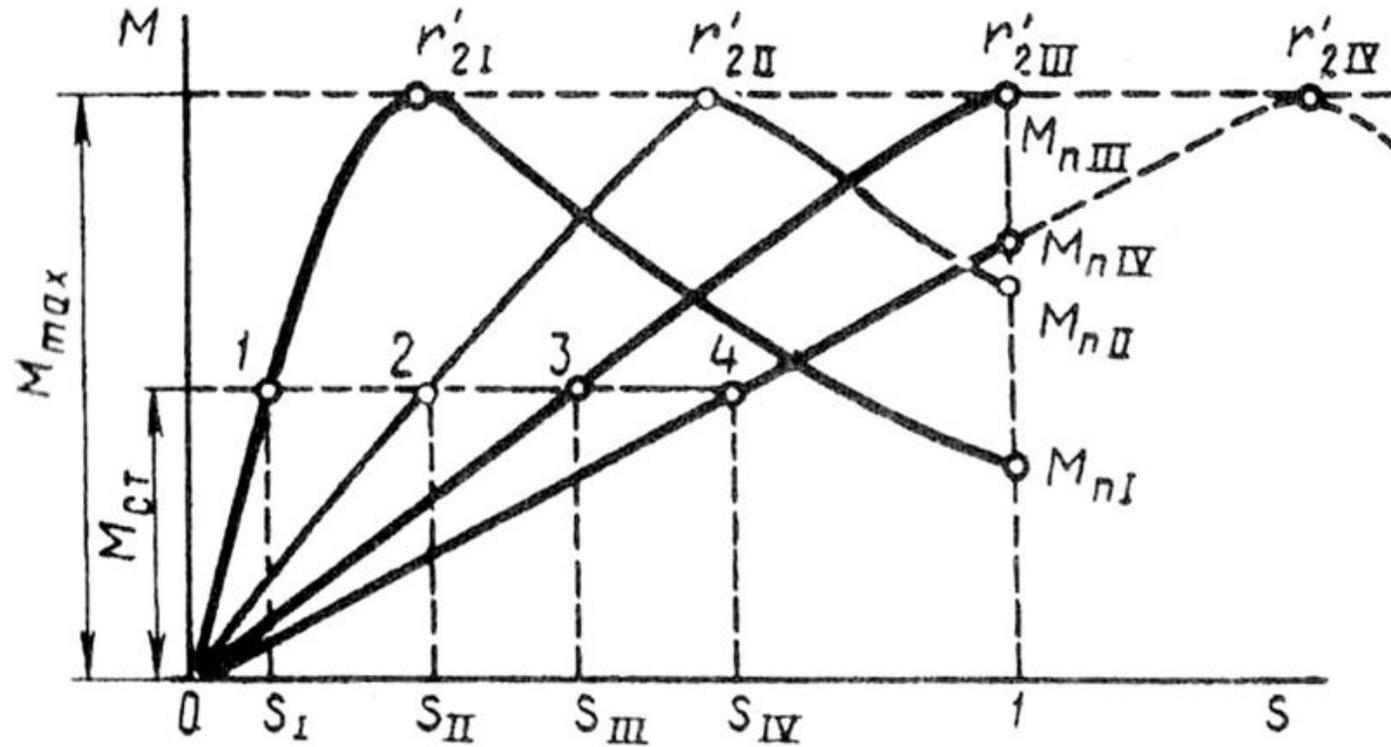
Для АД существуют два типа электромеханических характеристик $I_1(s)$ и $I_2'(s)$, то есть зависимости от скольжения или от угловой скорости ротора токов статора и ротора.



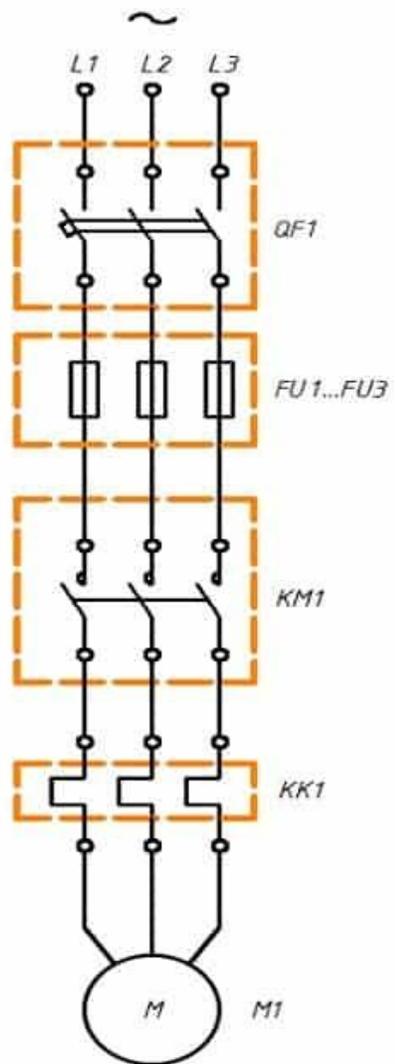
Примерный вид электромеханических характеристик АД



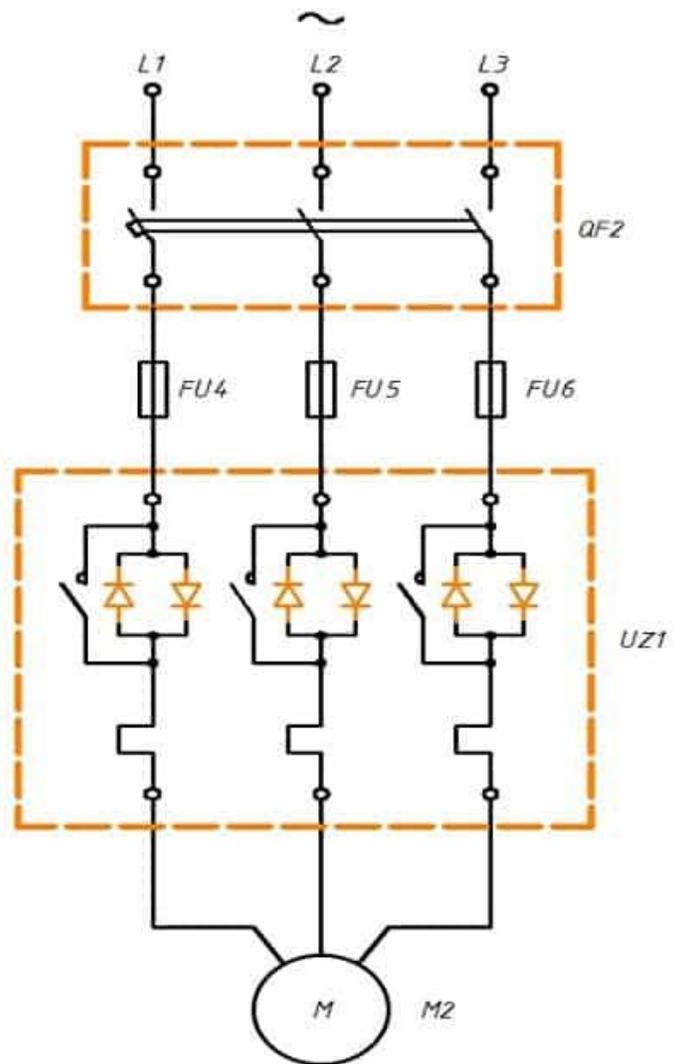
Влияние напряжения на вид механической характеристики асинхронного двигателя



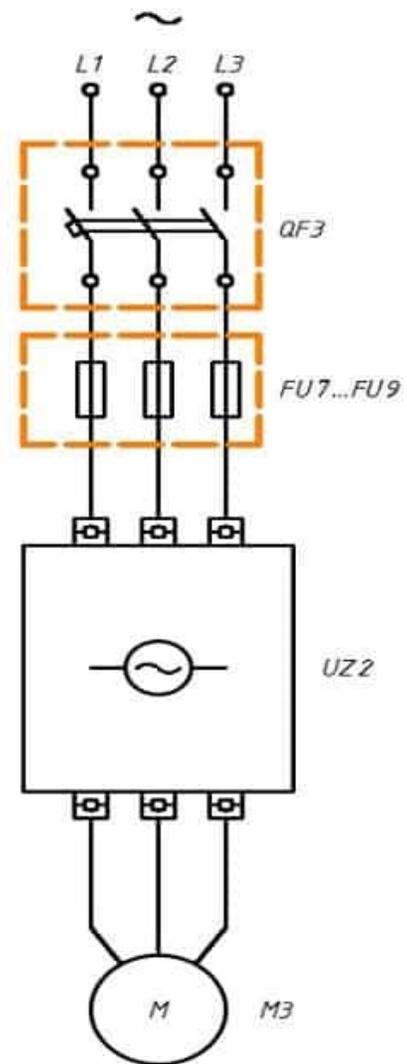
Влияние активного сопротивления обмотки ротора на механическую характеристику асинхронного двигателя



Прямого пуска



Плавного пуска



Через частотный преобразователь



ФГБОУ ВО ЮГУ
ИНСТИТУТ
НЕФТИ И ГАЗА