

# Электромеханические свойства двигателей постоянного и переменного тока

# Механические и электромеханические характеристики

**Механические характеристики**- это зависимость скорости от момента:

$$\omega = f(M); \quad \text{или} \quad n = f(M); \quad \omega = \frac{\pi n}{30}$$

**Электромеханической** (скоростной) характеристикой называется зависимость скорости от тока

$$\omega = f(I) \quad \text{или} \quad n = f(I)$$

.

# Естественные и искусственные характеристики

**Естественная (основная) характеристика** снимается у двигателя при номинальных параметрах сети и при номинальной схеме включения двигателя.

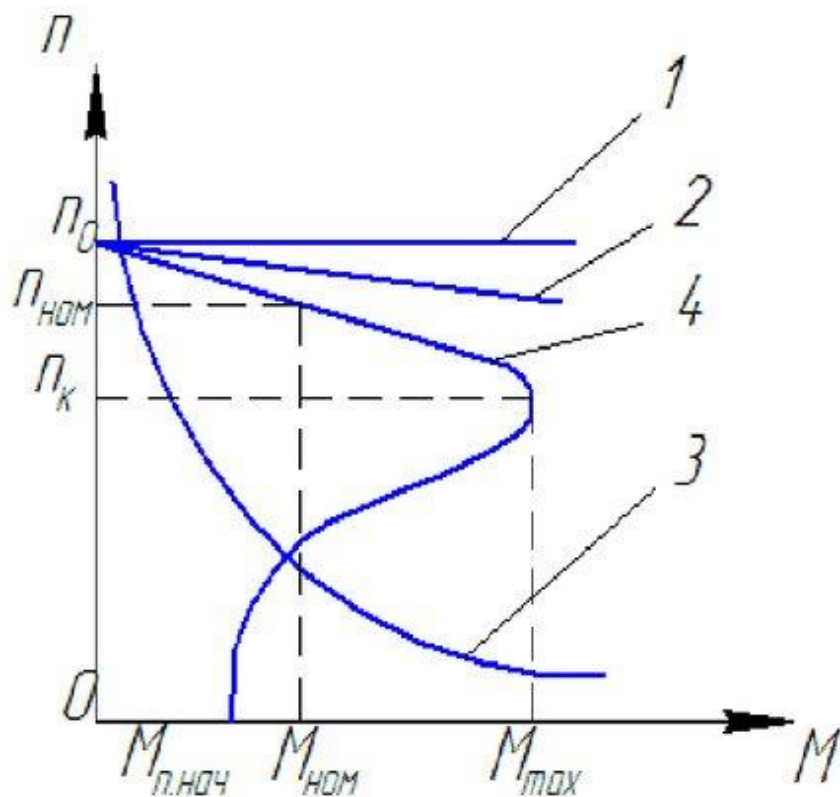
**Искусственная характеристика** получается при изменении различных параметров с целью получение различной скорости при одной и той же нагрузке.

Критерием механической и электромеханической характеристик является **жёсткость** - приращение момента по скорости.

$$\beta = \frac{dM^*}{d\omega^*}$$

\* - относительные единицы (отношение текущей величины к номинальной)

# Механические характеристики электродвигателей



Естественные механические характеристики двигателей

- 1 – синхронные двигатели (абсолютно жесткие –  $n$  не изменяется с изменением нагрузки)
- 2 – двигатели постоянного тока с параллельным возбуждением - шунтовые (жесткие –  $n$  изменяется с изменением  $M$ , но незначительно)
- 3 – двигатели пост.тока с последовательным возбуждением - серийные (мягкие –  $n$  значительно уменьшается с изменением момента)
- 4 – асинхронные двигатели

# Механические характеристики рабочих машин

## 1. Механические характеристики производственных механизмов

Зависимость между приведенными к валу двигателя скоростью и моментом сопротивления механизмов  $\omega = f(M_c)$  называют механической характеристикой производственного механизма.

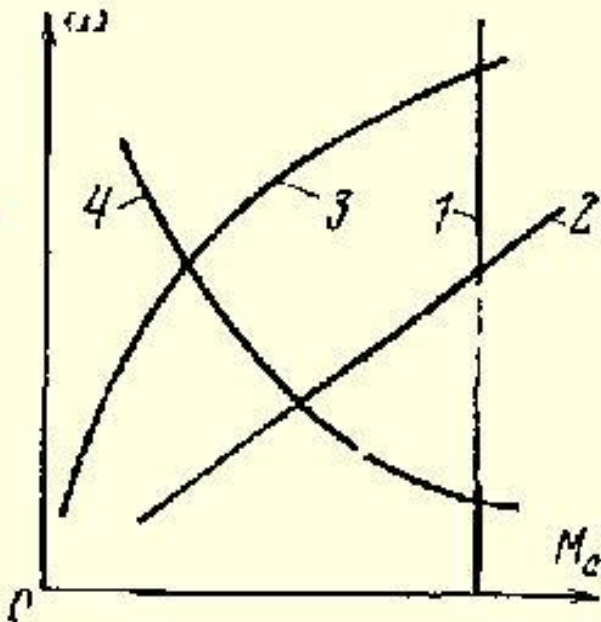
Различные производственные механизмы обладают различными механическими характеристиками. Однако, множество механических характеристик рабочих машин можно получить соотношением (формулой Бланка):

$$M_c = M_o + (M_{c,ном} - M_o) (\omega / \omega_{ном})^x$$

Приведенная формула позволяет классифицировать механические характеристики производственных механизмов на четыре группы.

1. Не зависящая от скорости механическая характеристика. При этом  $x = 0$  и момент сопротивления не зависит от скорости.

Такой характеристикой обладают: подъемные краны, лебедки, лифты, поршневые насосы, конвейеры ленточные, механизмы подачи станков.



# Механические характеристики рабочих машин

2. Линейно возрастающая характеристика.

$X = 1$  и  $M_c \equiv \omega$ . Такой характеристикой обладают зерноочистительные машины.

3. Нелинейно возрастающая (параболическая).

$X = 2$  и  $M_c \equiv \omega^2$ . Вентиляторы, насосы, сепараторы.

4. Нелинейно спадающая.

$X = -1$ ,  $M_c \equiv 1/\omega$ . Токарные, расточные, фрезерные станки, зерновые нории.

**Механические и  
электромеханические характеристики  
двигателя постоянного тока**

## продолжение

1)  $E = U - IR$  - уравнение баланса энергии

2)  $E = C_e \Phi n$ ;  $C_e$  - конструкционный коэффициент машины

3)  $M = C_M \Phi I$ ;  $\Phi$  - ПОТОК;

$n$  - скор (об/мин)

$$n = \frac{U - IR}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - I \frac{R}{C_e \Phi}$$



# механические и электрохимические характеристики двигателя

ПОСТОЯННОГО ТОКА

$$\omega = \frac{U - I R}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - I \frac{R}{C_e \Phi}$$

$$\omega = \frac{U}{C_e \Phi} - M \frac{R}{C_e C_m \Phi^2}$$

Под регулированием скорости понимается изменения скорости без изменения нагрузки:

- 1) Изменение напряжения;
- 2) Изменения сопротивления якорной цепи;
- 3) Изменения потока возбуждения

# ДВИГАТЕЛЬ С НЕЗАВИСИМЫМ (ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ) ВОЗБУЖДЕНИЕМ

$$I_{\epsilon} = \frac{U}{R_{\epsilon}}; \quad I = I_{\text{я}} + I_{\epsilon}; \quad \Phi = \frac{I_{\epsilon} W}{R_M}$$

$$\omega = \frac{U}{C_e \Phi} - M \frac{R}{C_e C_m \Phi^2}$$

Естественная характеристика- прямая линия

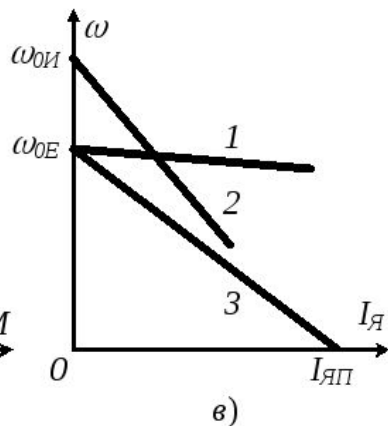
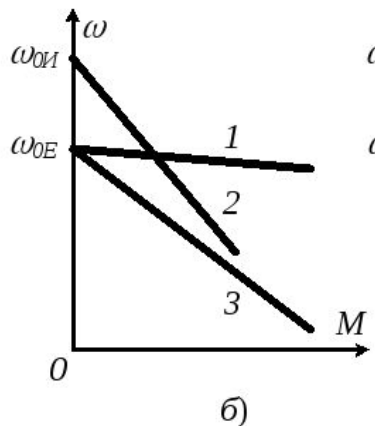
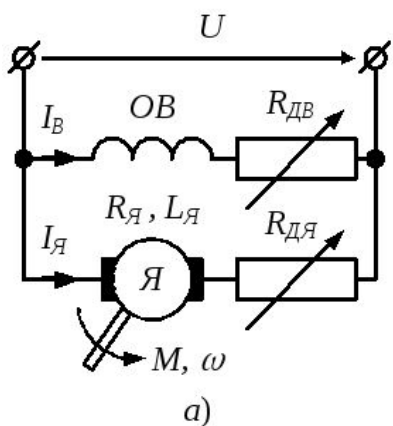
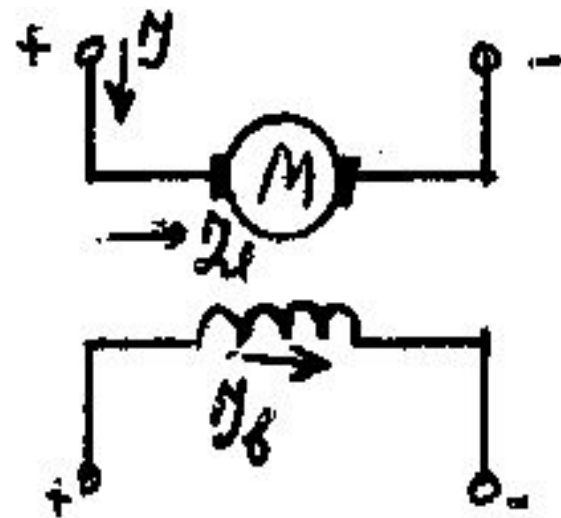


Рисунок 3.13 - Схема включения ДПТ с параллельным возбуждением (а), механическая (б) и электромеханическая (в) характеристики



# Реверсирование двигателей

- Направление вращения  $M$  меняется, путём смены направления  $\Phi$  и  $I$  якоря.

## ПУСК ДВИГАТЕЛЯ

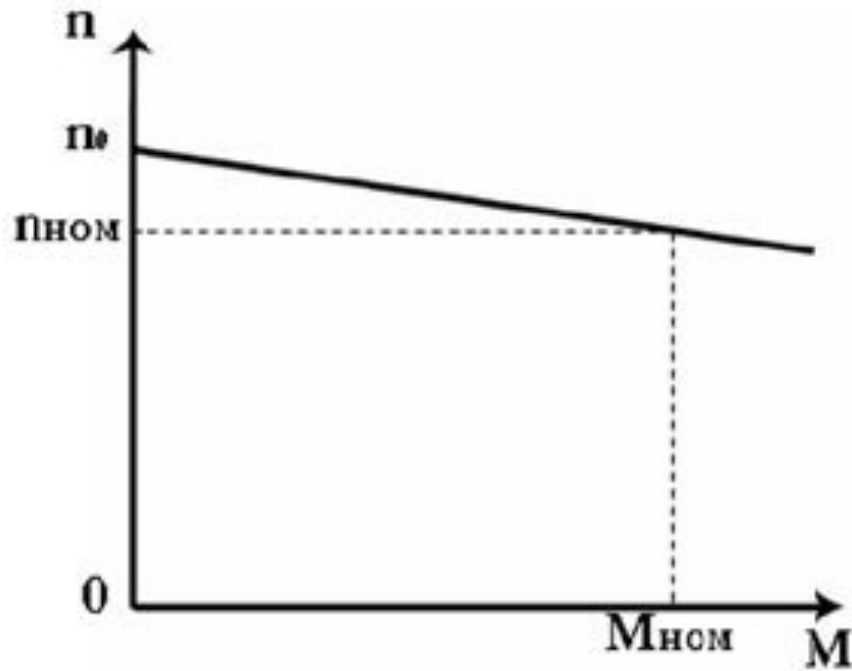
1) Прямой пуск ( до 8 кВт);

2) Реостатный пуск

$$I_n = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{доб}}} \quad R_{\text{доб}} = \frac{U}{2I_H} - R_{\text{я}}$$

3) Пуск с пониженным напряжением в сети

# ПОСТРОЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПО ПАСПОРТНЫМ ДАННЫМ $U_H, I_H, P_H, n_H$



$$\omega_H = \frac{\Pi n}{30}$$

$$\eta = P_H / U_H I_H$$

$$R_{\text{я}} = 0,5(1 - \eta)U_H / I_H$$

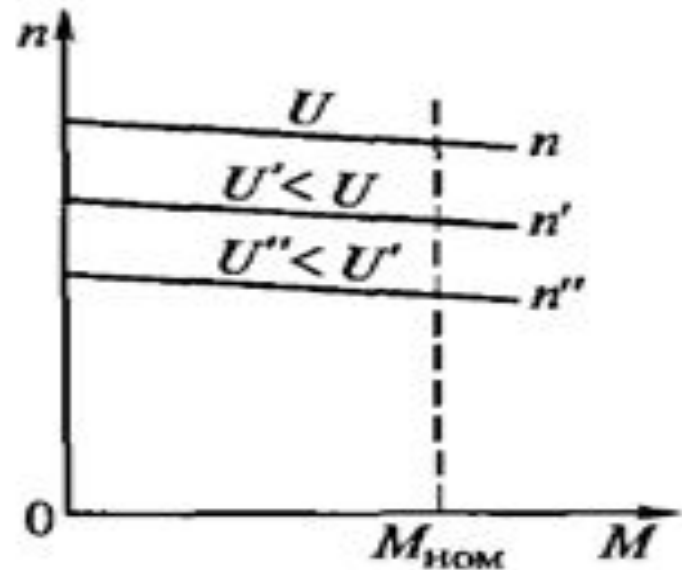
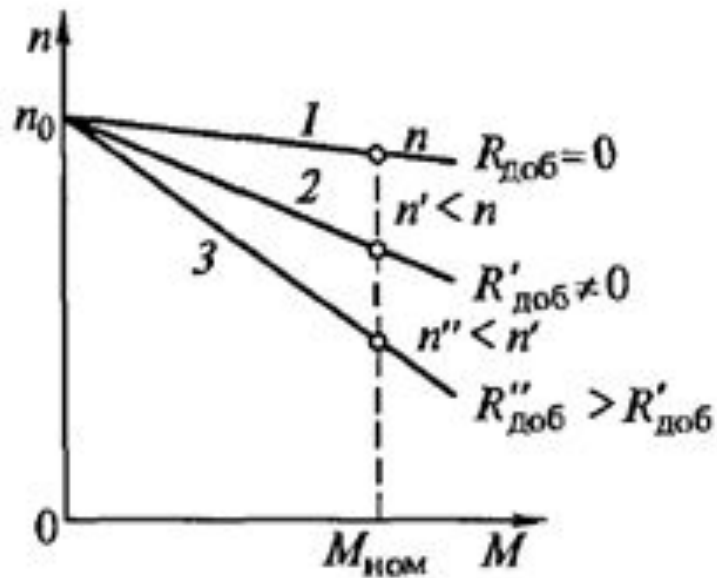
$$C_e \Phi = \frac{U - I_H R_{\text{я}}}{\omega_H}$$

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} \quad \omega_0 = \frac{U_H}{C_e \Phi}$$

# Искусственные характеристики ДПТНВ

При изменении сопротивления

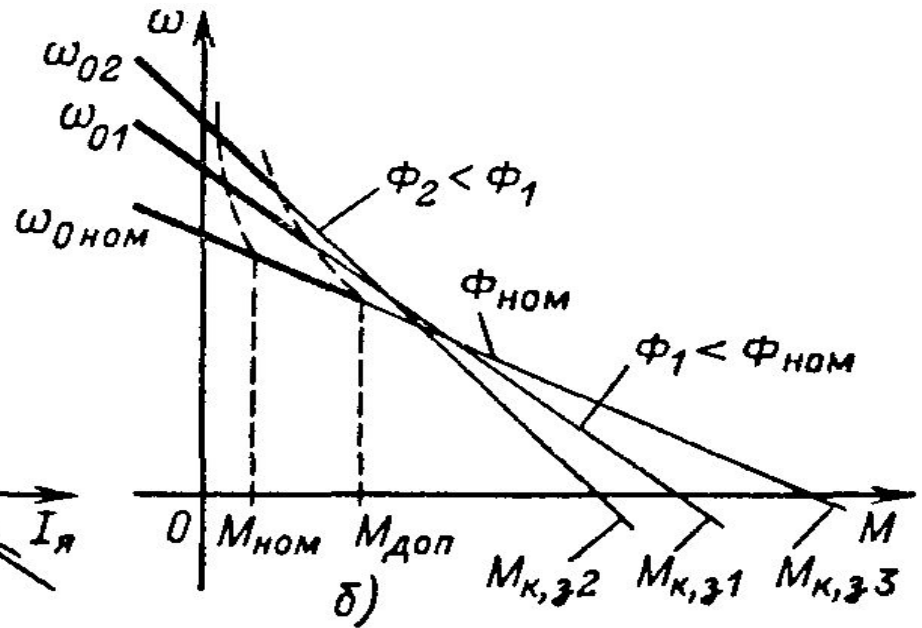
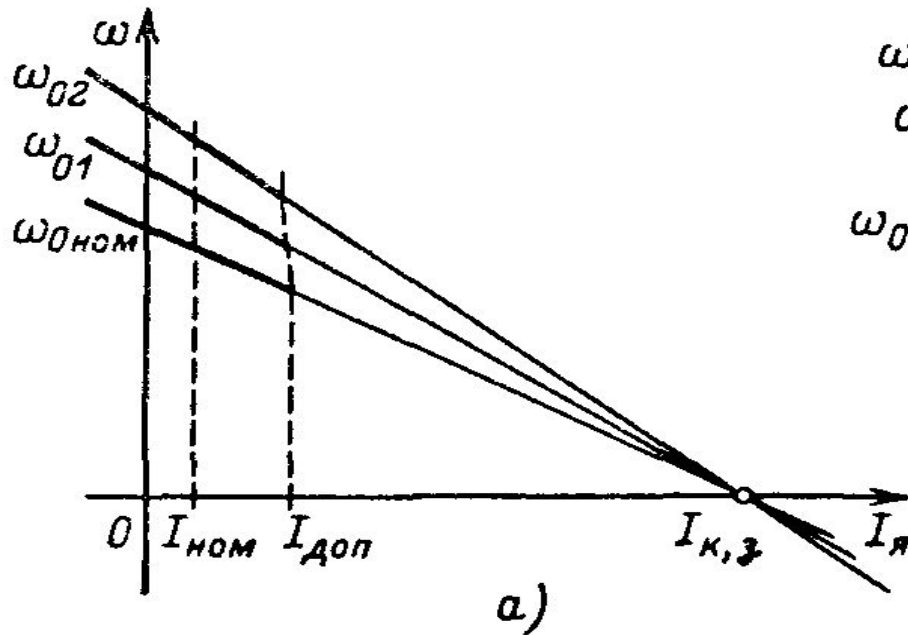
При изменении напряжения



$$\omega = \frac{U}{C_e \Phi} - M \frac{R}{C_e C_m \Phi^2}$$

# Искусственные характеристики

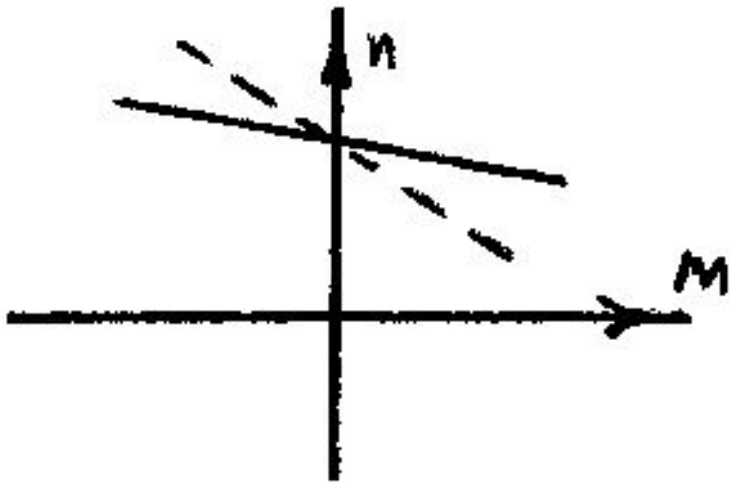
При изменении магнитного потока



$$\omega = \frac{U}{C_e \Phi} - M \frac{R}{C_e C_m \Phi^2}$$

# Тормозные режимы двигателя

1) **Рекуперативный (генераторный)**: двигатель разгоняется выше скорости идеального холостого хода, ЭДС больше, чем приложенное напряжение, ток и момент меняют свое направление, и двигатель начнёт работать в генераторном режиме.



$$\omega = \frac{U_e}{C_e \Phi} + M \frac{R_{я}}{C_e C_m \Phi^2};$$

Наклон характеристики зависит от  $R$ , чем оно больше, тем круче характеристика.

# Тормозные режимы двигателя

2) Динамическое торможение. Якорь отключается от сети и замыкается на сопротивление, обмотка возбуждения подключена к сети.



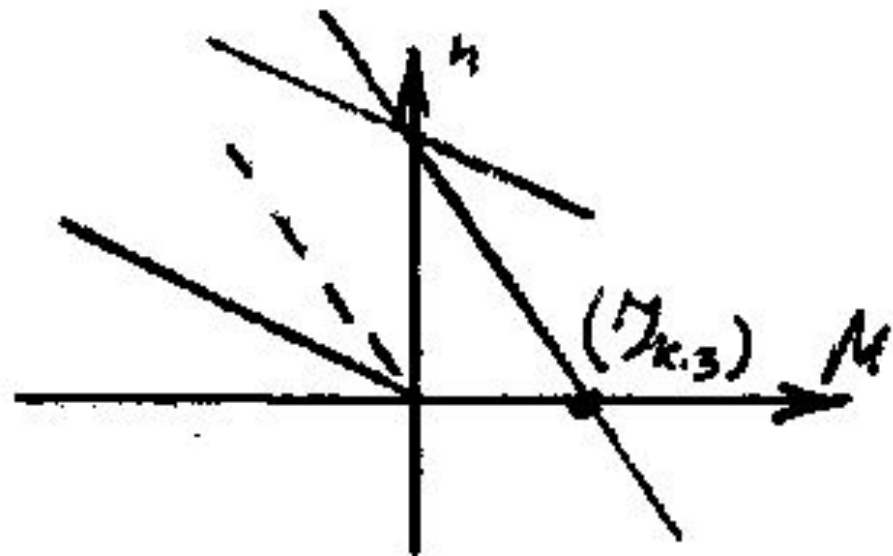
$$\omega = +M \frac{R_{я}}{C_e C_m \Phi^2}$$

Механическая энергия с вала двигателя выделяется в виде тепла  $I^2 R$  на сопротивление в цепи якоря.



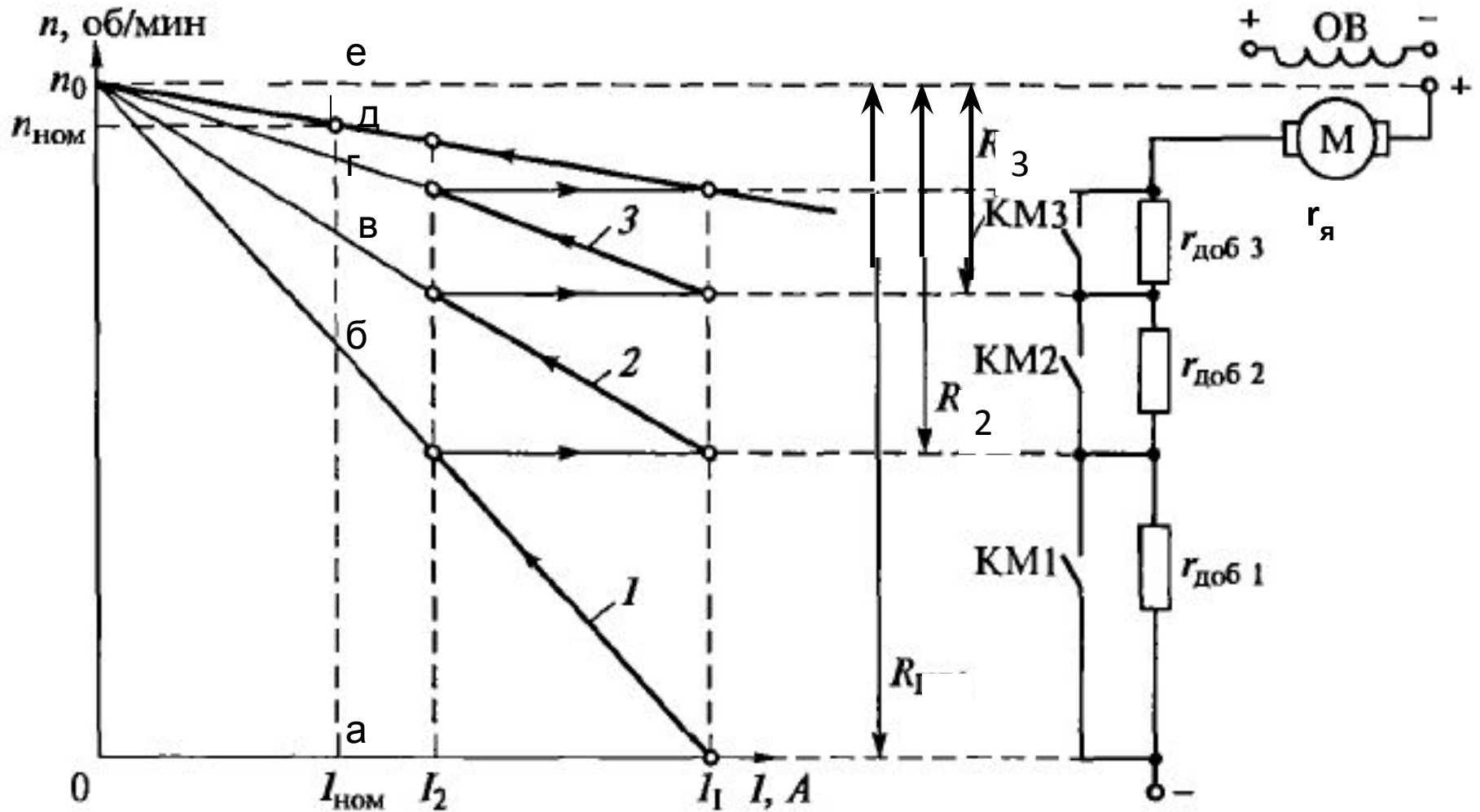
# ТОРМОЗНЫЕ РЕЖИМЫ ДВИГАТЕЛЯ

3) Режим противовключения. Скорость обратного знака.



$$\omega = M \frac{R_{я}}{C_e C_m \Phi^2} - \frac{U_2}{C_e \Phi};$$

# РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДПТНВ



# РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДПТНВ (продолжение)

## *Аналитический метод*

Выбрать пределы изменения тока при пуске:

$$\lambda = \frac{I_1}{I_2}, \quad \text{где } I_1 = (2 \dots 2,5)I_H$$
$$I_2 = (1,2 \dots 1,5)I_H$$

Определить общее сопротивление цепи якоря при полностью включенном пусковом сопротивлении:

Найти число пусковых ступеней

$$R_m = \frac{U_H}{I_1}$$

$$m = \frac{\lg \frac{R_m}{r_{я}}}{\lg \lambda}$$

# РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДПТНВ (продолжение)

Если число ступеней получается дробным, то его округляют до целого числа и определяют новое значение

$$\lambda = m \sqrt{\frac{R_m}{r_{я}}}$$

Определить значения сопротивлений ступеней пускового реостата

$$r_m = r_{я} \cdot \lambda^{m-1} \cdot (\lambda - 1)$$

Выполнить проверочный расчет.

$$R_m = r_1 + r_2 + \dots + r_n + r_{я}$$

# РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДПТ НВ (продолжение)

## *Графический метод*

Номинальное сопротивление электродвигателя

$$R_H = \frac{U_H}{I_H}$$

Масштаб сопротивлений

$$\mu_R = \frac{R_H}{a\epsilon}$$

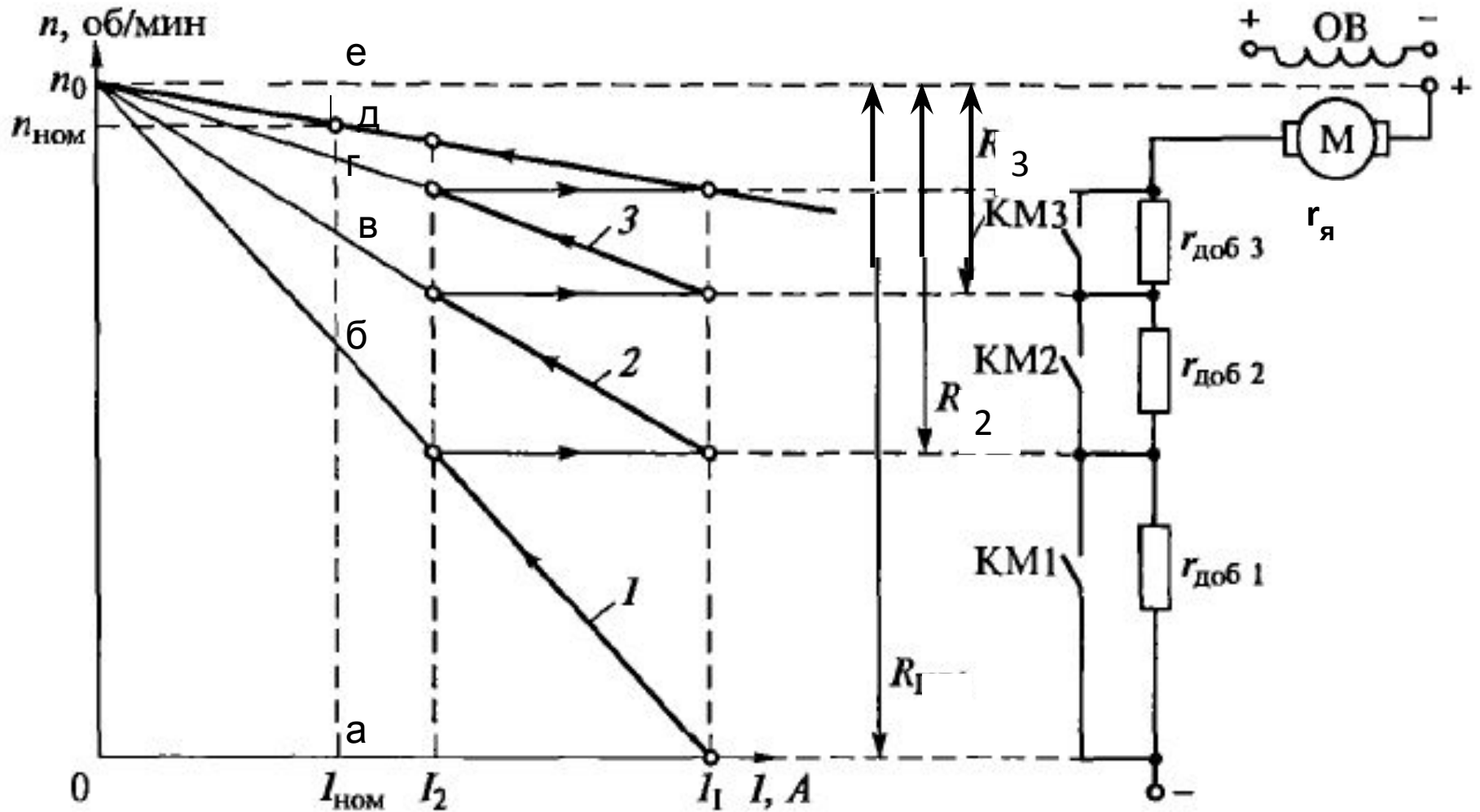
Сопротивление ступеней пускового реостата

$$r_1 = \mu_R \cdot бв$$

$$r_2 = \mu_R \cdot зв$$

$$r_3 = \mu_R \cdot зд$$

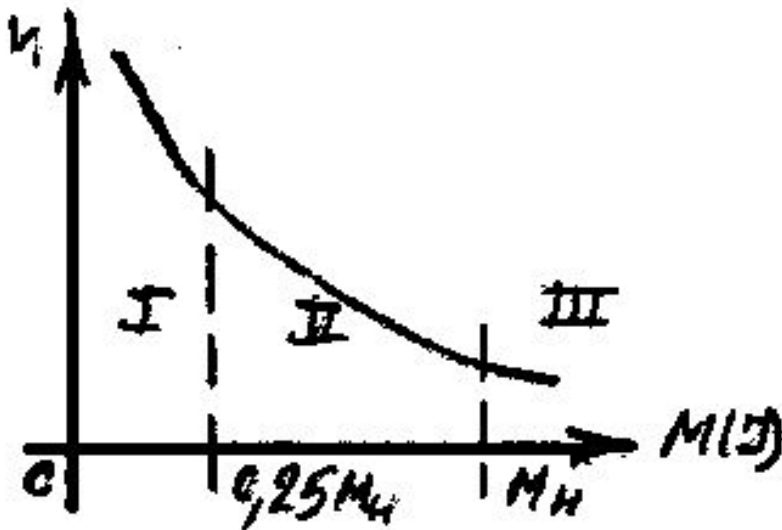
# РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДПТ НВ



# ДВИГАТЕЛЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ (ДПТ ПВ)



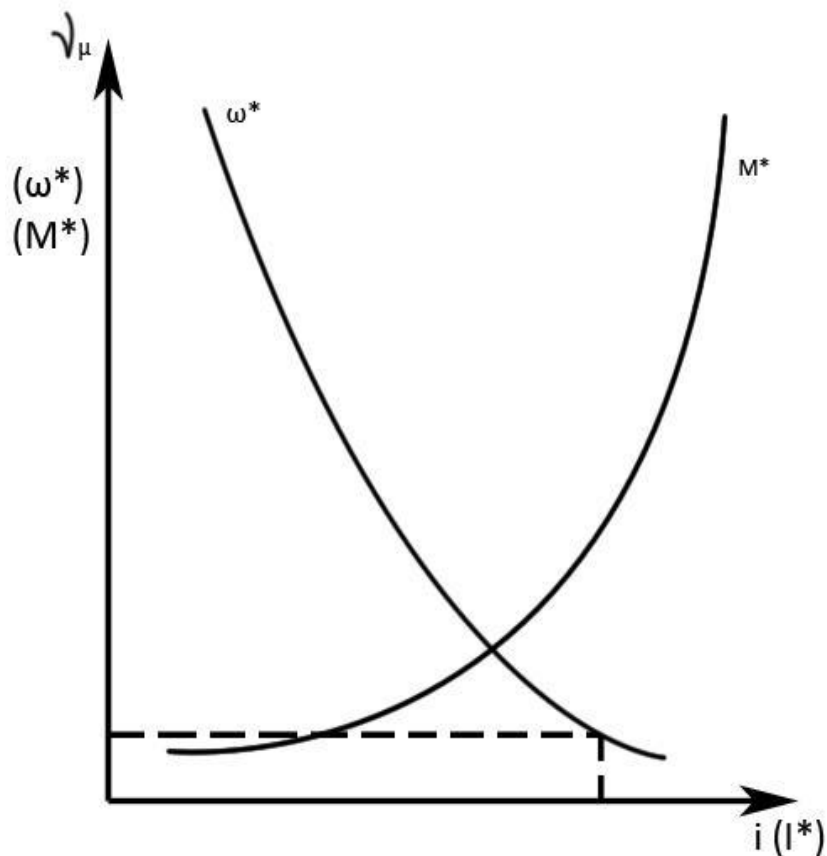
$$\omega = \frac{U}{\sqrt{K'M}} - \frac{R_{я}R_{об}}{K'}$$



- 1-опасный;
- 2-рабочий;
- 3-пусковой

# ПОСТРОЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПО ПАСПОРТНЫМ ДАННЫМ

Строятся характеристики по типовым характеристикам, дающимся в справочниках, причём характеристика даётся в относительных единицах.

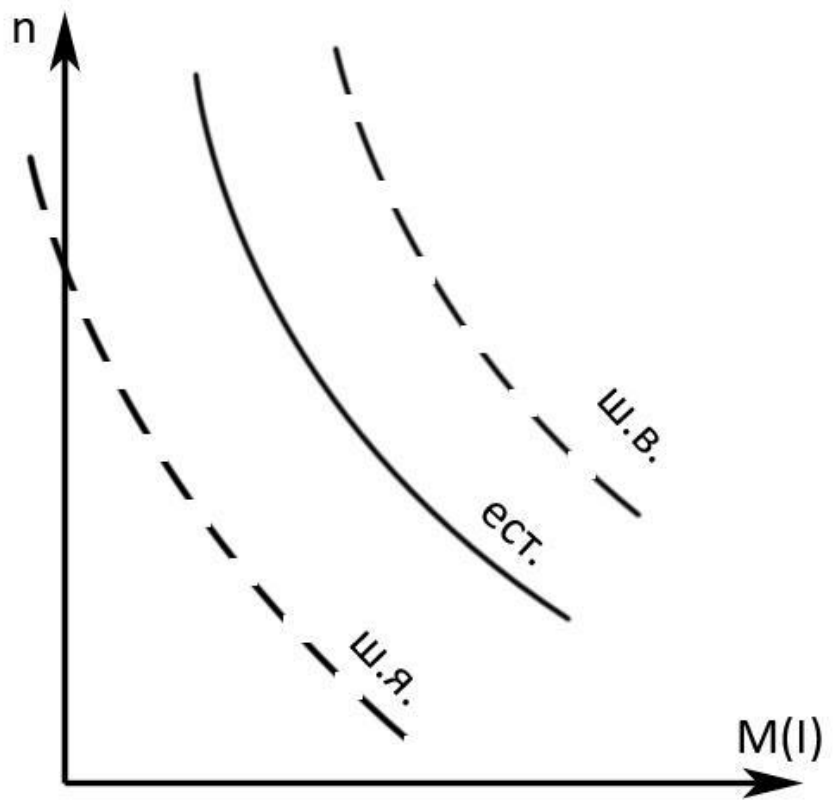
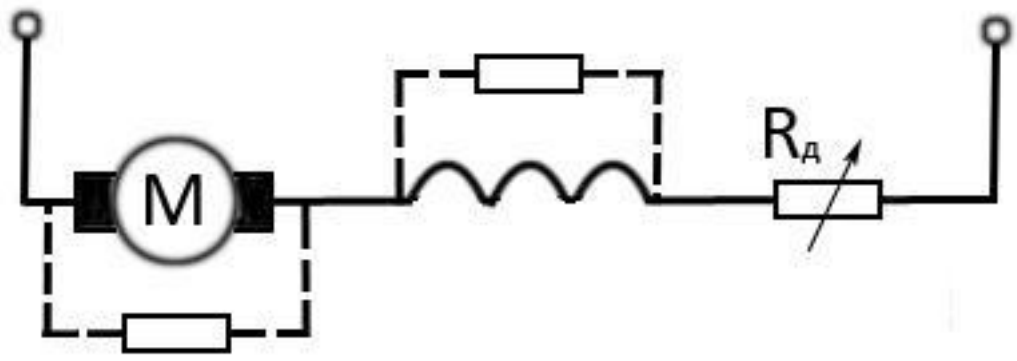


$$I = I^* I_H ;$$

$$M = M^* M_H ;$$

$$\omega = \omega^* \omega_H ;$$

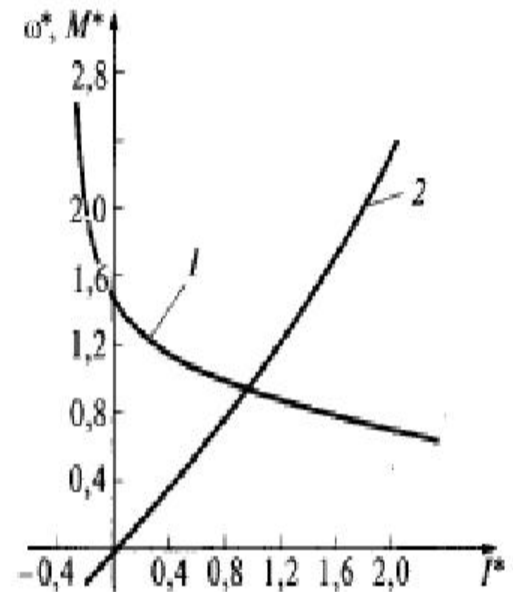




## Механическая и электромеханическая характеристики ДПТ СВ:

Для практических расчетов используются универсальные характеристики ДПТ СВ, которые приводятся в справочной литературе.

Наличие двух обмоток возбуждения существенно увеличивает расход материалов на изготовление двигателя, и следовательно, его массу, габариты и стоимость. По этой причине такой тип двигателя применяется только в тех случаях, когда его использование диктуется какими-либо специфическими требованиями со стороны рабочей машины и обосновывается технико-экономическими расчетами.



Универсальные характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения:

1 — зависимость скорости от тока; 2 — зависимость момента от тока

1 — зависимость скорости от тока; 2 — зависимость момента от тока

# АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

**Неподвижная часть статор** состоит из корпуса, сердечника и обмотки. Корпус бывает листовой или сварной. Сердечник находится внутри статора, ось каждой фазы сдвинута на  $120^\circ$ , минимум 3 обмотки, или кратно трём. Обмотки соединены либо звездой, либо треугольником.

**Вращающаяся часть ротор.** Бывают роторы с коротко замкнутым включением. У двигателей мощностью до 100 кВт заливается прямо в обмотку алюминий (короткозамкнутый ротор); также бывают двигатели с фазным ротором и контактными кольцами. Если мощность больше, 100 кВт, то клеиваются медные стержни.

# АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

*Принцип работы двигателя.* При подаче в статорные обмотки трёхфазного тока образуется магнитное вращающееся поле. Поскольку ротор замкнут, то в этой обмотке возникает ток. А на проводнике с током в магнитном поле действуют силы, и ротор начинает двигаться вслед за полем.

*Реверс* двигателя осуществляется сменой направления вращения поля (две любых фазы меняются местами).

# АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Мера отставания скорости вращения двигателя от скорости поля называется *скольжением*.

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1};$$

$$n_1 = \frac{60f}{P}; \quad \omega_1 = \frac{2\pi f}{P};$$

$$S = 0 \div 1 (\text{в двигательном режиме})$$

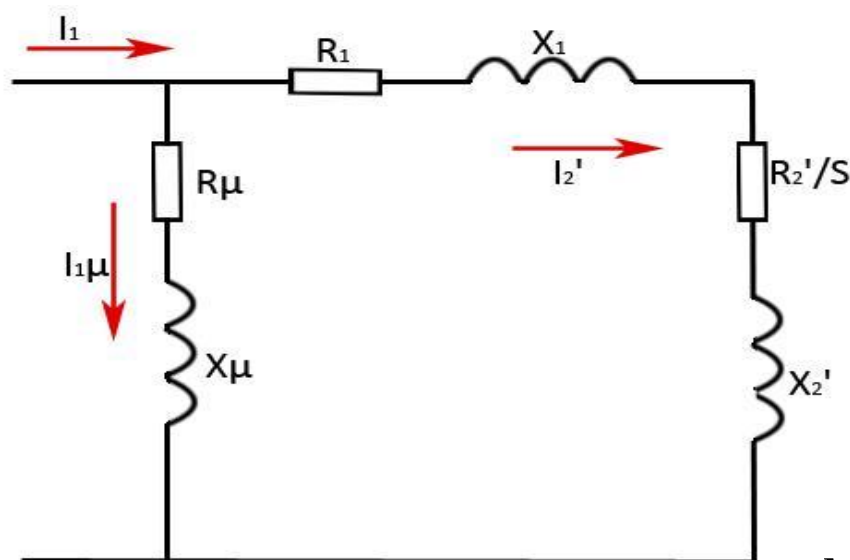
# МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АД

$$n = f(M)$$

$$\omega = f(M)$$

$$M = f(S)$$

Для вывода уравнения механической характеристики пользуются упрощённой схемой замещения



$$M = \frac{3U_{1\phi}^2 R_2}{\left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{S} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right] \omega_1 S}$$

$$M_{кр} = \frac{3U_{\phi}^2}{\left[ R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right] 2\omega_1}$$

$$M_n = \frac{3U_{\phi}^2 R_2'}{\left[ R_1 \pm \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (x_1 + x_2')^2} \right] \omega_1}$$

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}};$$

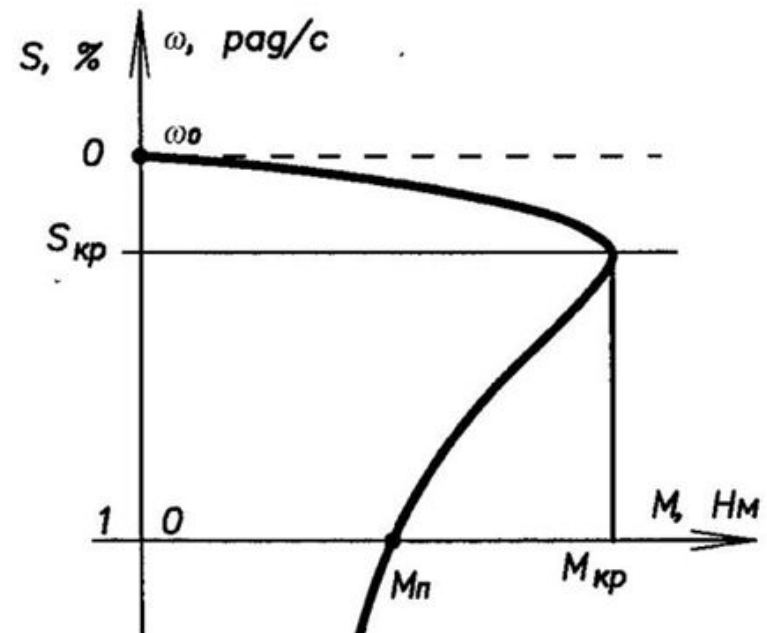
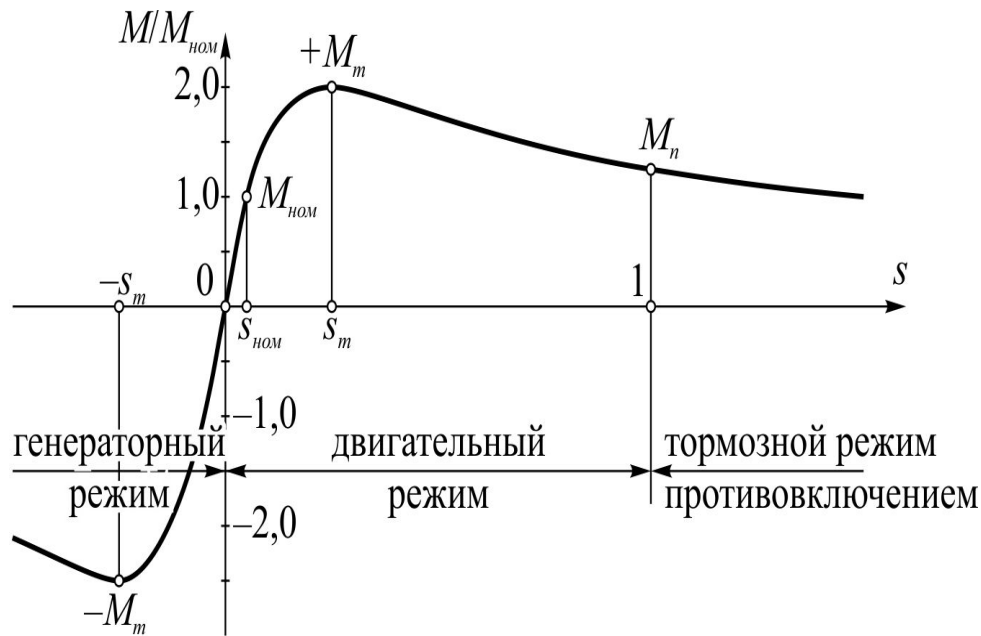
# Построение естественных характеристик АД по паспортным данным

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = 9,55 \frac{P_H}{n_H}; \quad S_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1}; \quad P_H; n_H; \lambda_{кр}; \lambda_n; \lambda_{\min}$$

$$M_{кр} = \lambda_{кр} M_H; S_{кр} = S_H (\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1}); \omega_{кр} = \omega_0 (1 - S_{кр}) = \frac{2\pi f}{p} (1 - S_{кр})$$

$$M_n = \lambda_n M_H; S = 1; \omega = 0;$$

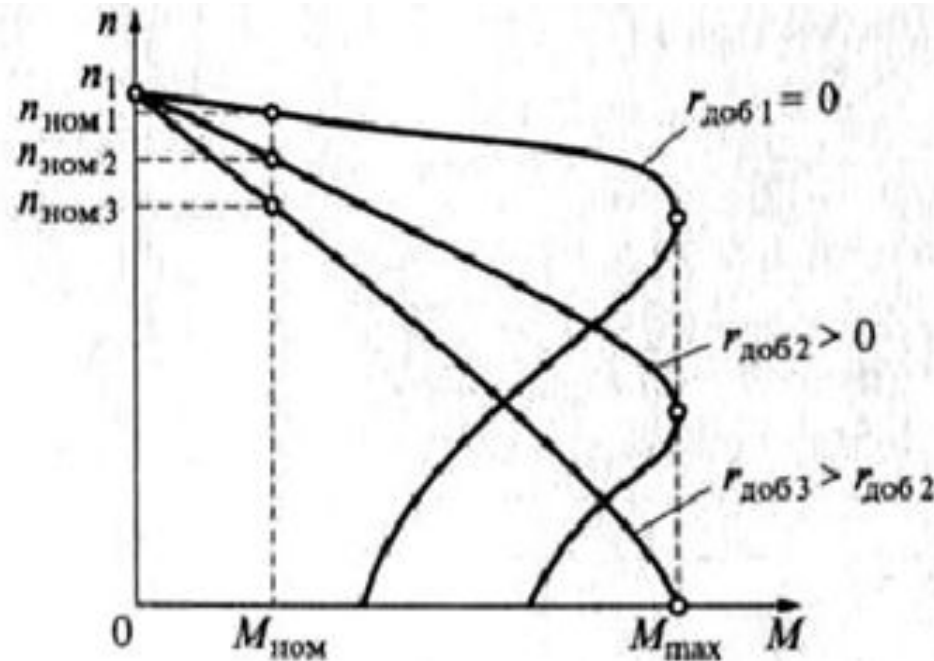
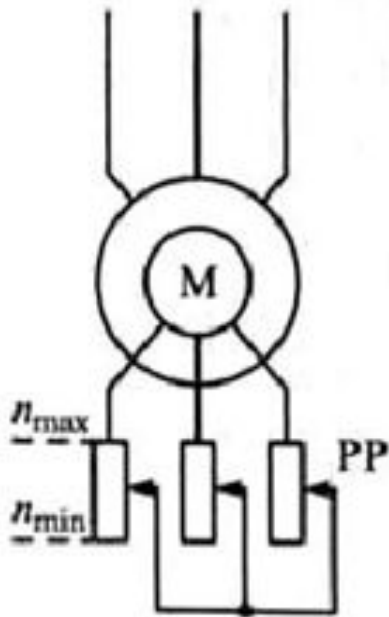
$$M_{\min} = \lambda_{\min} M_H; S_{\min} = 0.856.$$



# Регулирование скорости АД

$$\omega_o = \frac{2\pi f}{p}; \quad M_{кр} = \frac{mU_1^2}{2\omega_o x_k}; \quad S_{кр} = \frac{R'_2}{x_k}$$

1) *изменением скольжения.* Возможно только путём введения  $R_{доб}$  в цепь ротора (только для двигателя с фазным ротором);



$$\omega_o = const;$$

$$M_{кр} = const;$$

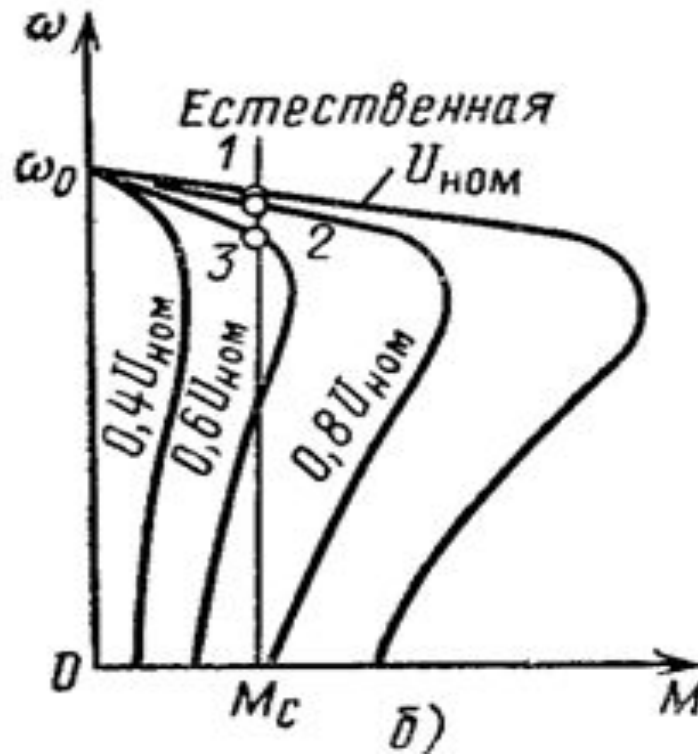
$$S_{кр} \equiv R_2$$



## Регулирование скорости АД

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}; M_{кр} = \frac{mU_1^2}{2\omega_0 x_k}; S_{кр} = \frac{R'_2}{x_k}$$

2) *изменением напряжения* на обмотках статора;



$$\omega_0 = const;$$

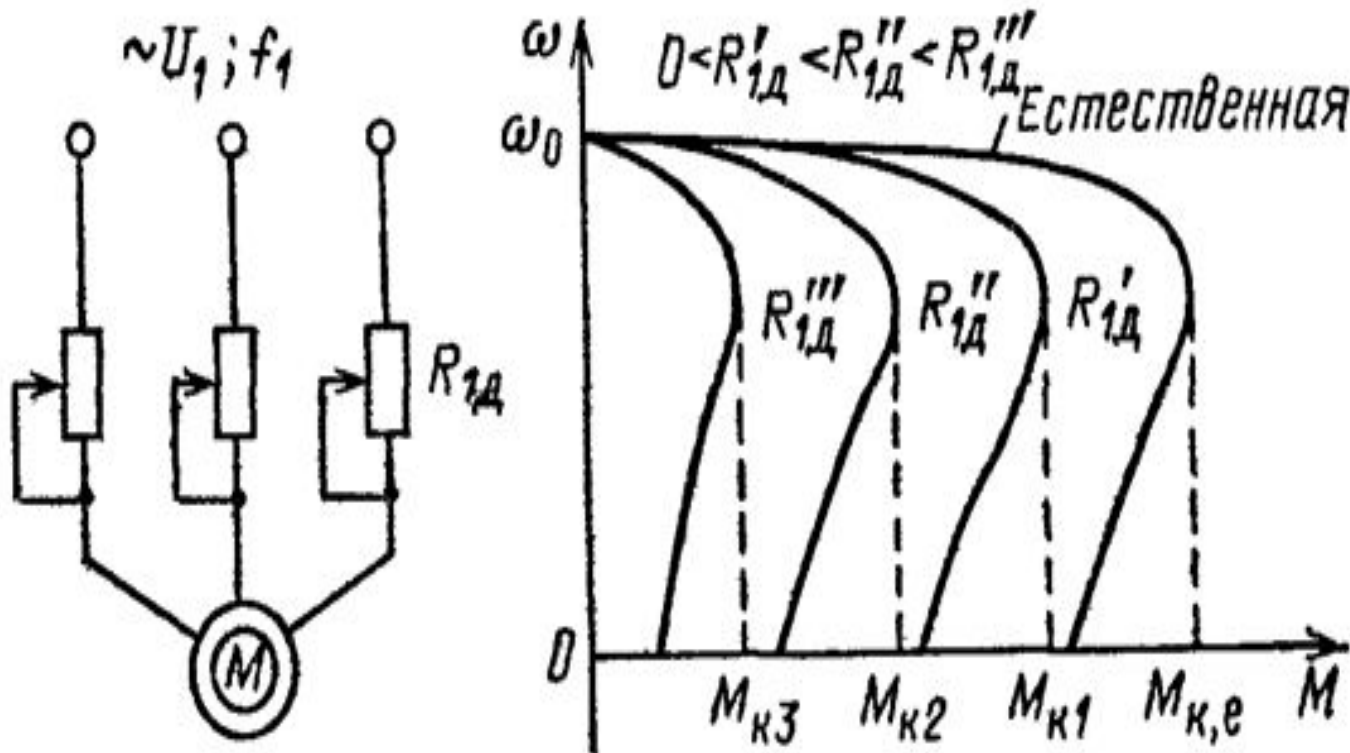
$$M_{кр} \equiv U^2;$$

$$S_{кр} = const$$

## Регулирование скорости АД

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}; M_{кр} = \frac{mU_1^2}{2\omega_0 x_k}; S_{кр} = \frac{R'_2}{x_k}$$

2) *изменением напряжения* путем введения сопротивления в цепь статора;



$$\omega_0 = const;$$

$$M_{кр} \equiv U^2;$$

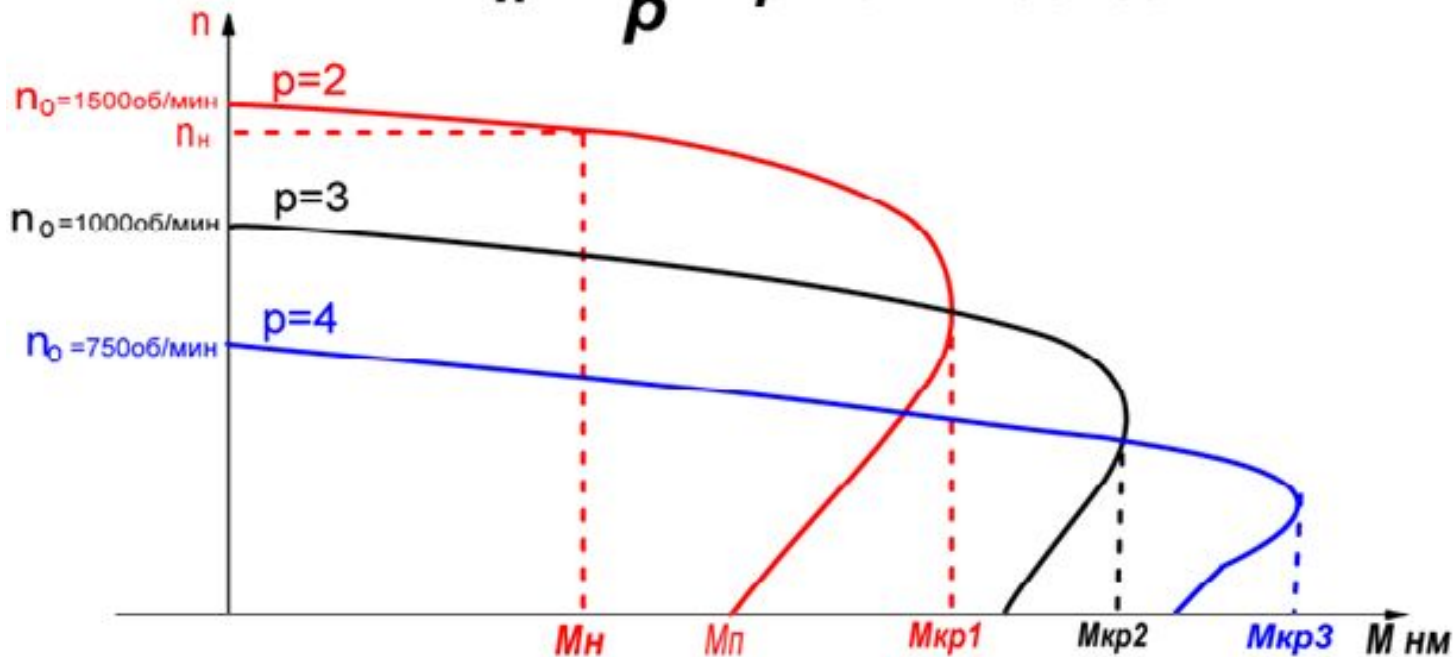
$$S_{кр} = const$$

## Регулирование скорости АД

$$\omega_o = \frac{2\pi f}{p}; M_{кр} = \frac{mU_1^2}{2\omega_o x_k}; S_{кр} = \frac{R'_2}{x_k}$$

3) *изменением числа пар полюсов* ВОЗМОЖНО ТОЛЬКО ДЛЯ МНОГОСКОРОСТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ;

$$n = \frac{60f}{p} \quad p = \text{var} \quad f = \text{const}$$



$$\omega_o \equiv \frac{1}{p};$$

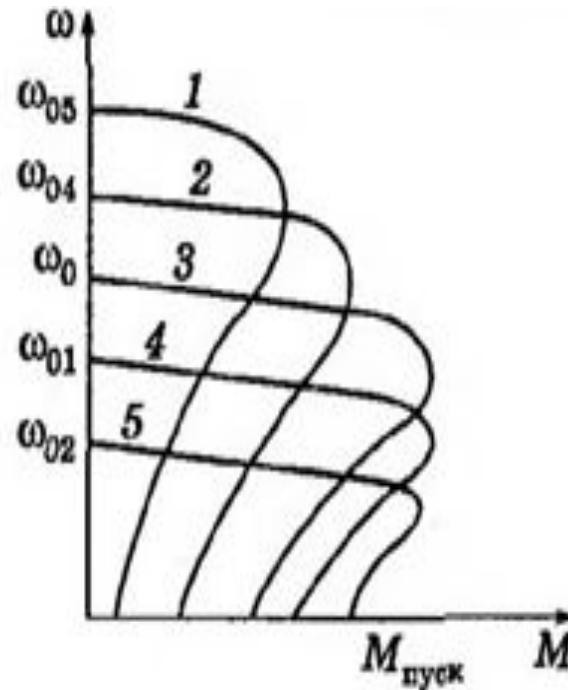
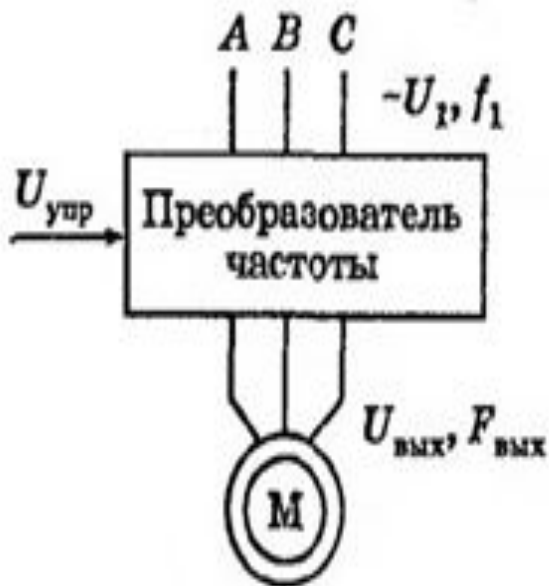
$$M_{кр} \equiv p;$$

$$S_{кр} = \text{var}$$

# Регулирование скорости АД

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}; M_{кр} = \frac{mU_1^2}{2\omega_0 x_k}; S_{кр} = \frac{R'_2}{x_k}$$

4) *изменением частоты питающего тока* (для любых типов двигателей).



$$\omega_0 \equiv f;$$

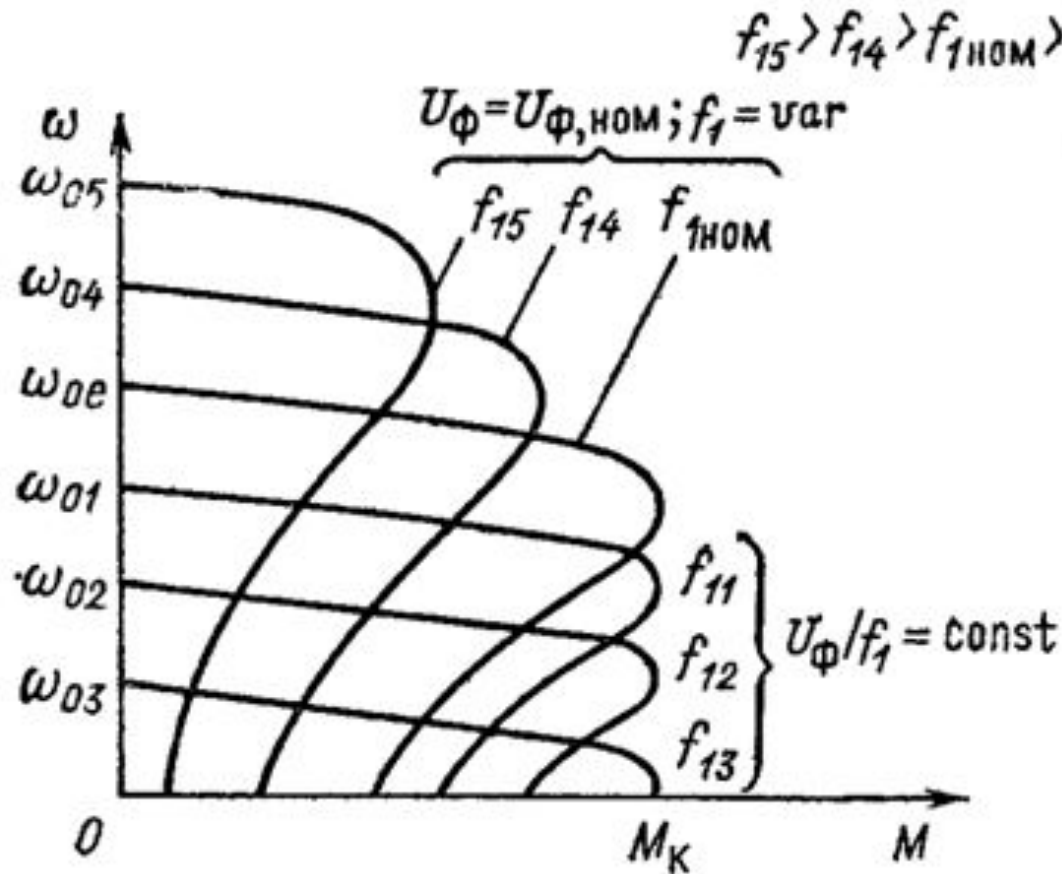
$$M_{кр} = \text{var};$$

$$M \approx f_i^2$$

$$S_{кр} = \text{var}$$

# Регулирование скорости АД

4) изменением частоты питающего тока (для эффективного использования электродвигателя необходимо с изменением частоты одновременно изменять напряжение).



$$\omega_0 \equiv f;$$

$$M \approx f_i^2$$

$$M_{\text{кр}} = \text{var};$$

$$S_{\text{кр}} = \text{var}$$

# Пуск асинхронного двигателя

Пусковые свойства двигателя оцениваются пусковыми характеристикам:

- кратность пускового тока  $\frac{I_n}{I_{ном}}$
- кратность пускового момента  $\frac{M_n}{M_{ном}}$

- 1) **Прямой пуск.** применяется для двигателей небольшой мощности. Недостаток - большой пусковой ток малой длительности.
- 2) **Реактивный пуск.** Реактор - это большое индуктивное сопротивление. Под большой нагрузкой двигатель может не провернуться.

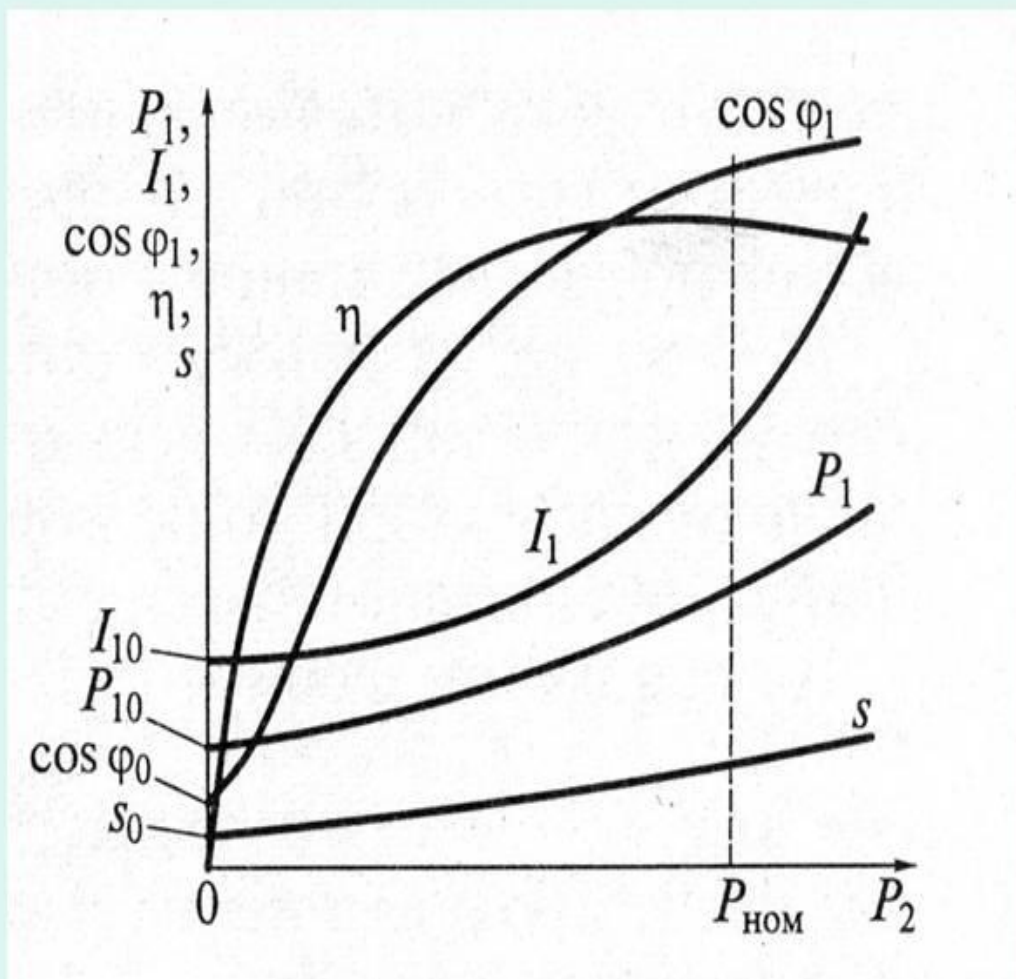
## Пуск асинхронного двигателя

3) *Автотрансформаторный.* Сначала подают пониженное напряжение через автотрансформатор, а после разгона дают полное напряжение.

4) *С переключением обмоток статора со звезды на треугольник.* На звезде напряжение на каждой фазе в  $\sqrt{3}$  раз меньше, при переключении на треугольник, ток возрастает в 3 раза.

5) *Специальные короткозамкнутые двигатели с повышенным пусковым моментом (двигатели с двухколодочным ротором).*

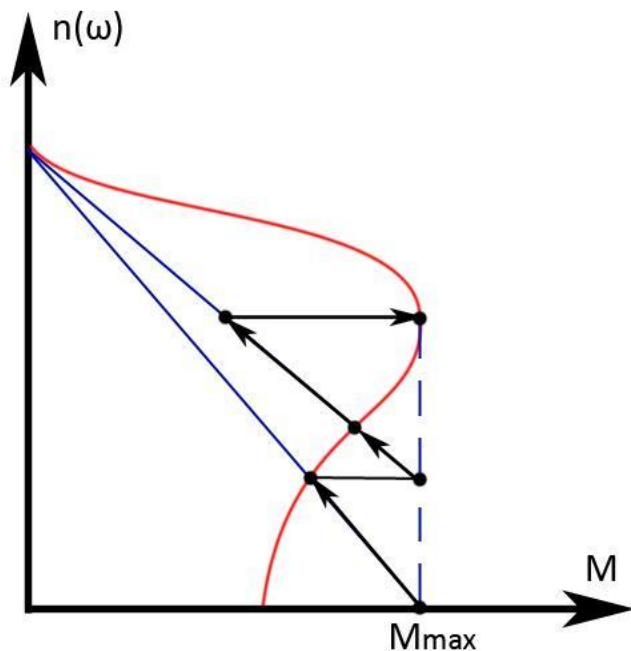
# Рабочие характеристики асинхронного двигателя





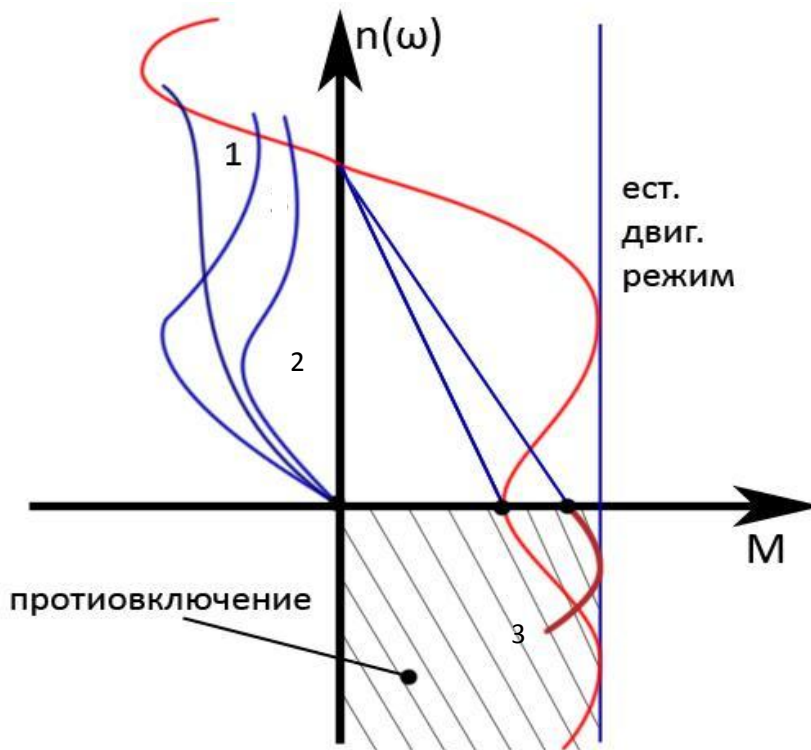
## Пуск асинхронного двигателя (продолжение)

б) *Двигатели с фазным ротором* применяют для ответственных пусков.



При таком пуске пусковой момент близок к максимуму, а кратность пускового тока снижается до 3 раз.

# Тормозные режимы асинхронного двигателя



**1) Генераторное (рекуперативное)**

**2) Динамическое.** В обмотку статора подводится постоянный ток, он создаёт постоянный тормозящий момент и ротор тормозится.

**3) Противовключение.** При реверсировании привода и введении  $R_{доб}$  в цепь ротора.