

Механические характеристики рабочих механизмов

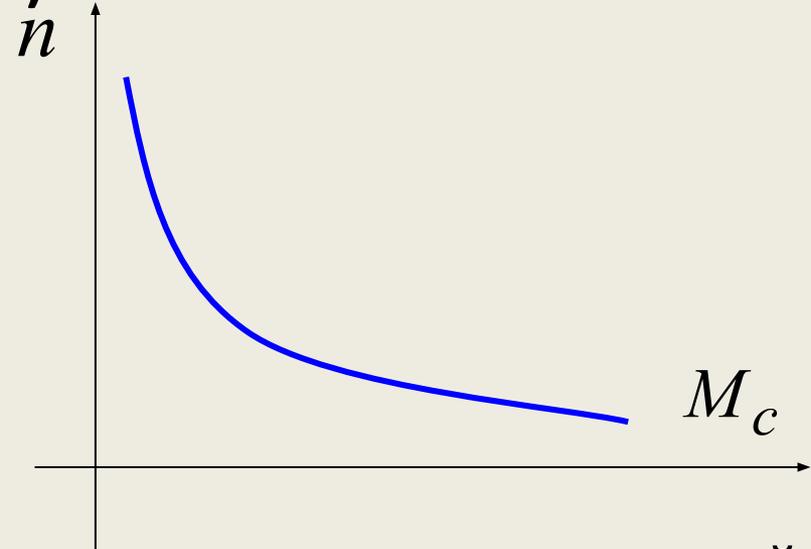
4. $X = -1$

Момент нелинейно падающий

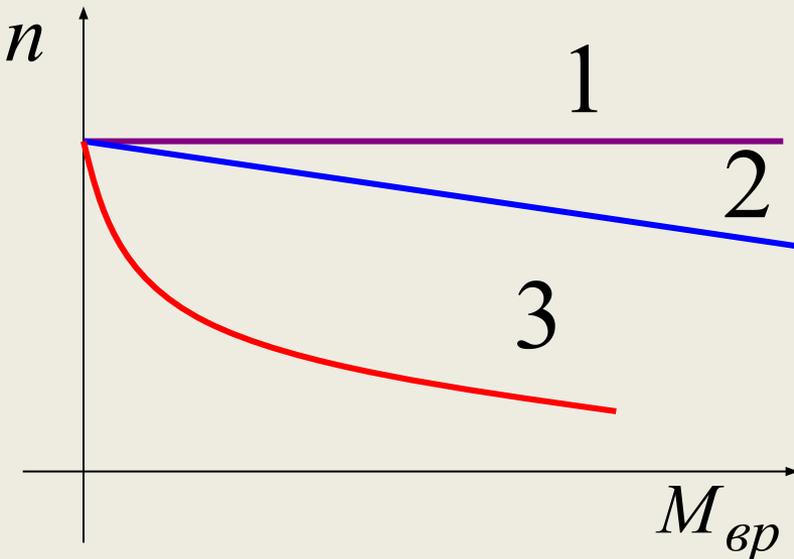
Например:

- металлорежущие станки

(PM)



Механические характеристики электродвигателей



- 1 – абсолютно жесткая характеристика;
- 2 – жесткая характеристика;
- 3 – мягкая характеристика

Механические характеристики производственных механизмов и электрических двигателей

При рассмотрении механических характеристик ЭП и механизмов используется стандартная координатная сетка с четырьмя квадрантами. Иногда пользуются только одним квадрантом, если рассматривают один отдельный режим работы электрической машины.



Для устойчивого функционирования привода надо хорошо знать характеристики как производственного механизма, так и двигателя. А точнее речь идет о их совместимости.

Все производственные механизмы можно по типу характеристик разделить на четыре основные группы и описать их общим выражением:

$$M_c = M_0 + (M_{c.n} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^x,$$

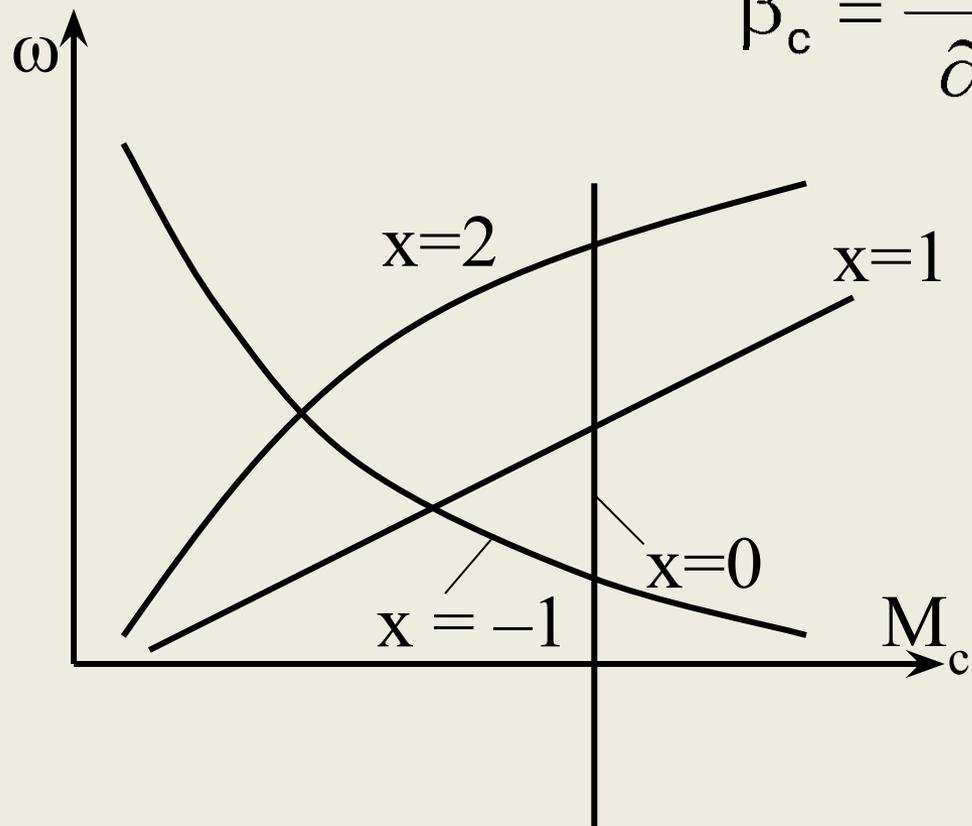
где $M_{c.n}$, ω_n – момент сопротивления механизма при номинальном режиме вращения;

M_0 – момент, обусловленный потерями холостого хода;

x – показатель степени.

Введем понятие жесткости механической характеристики механизма, т.е. ее наклон, как

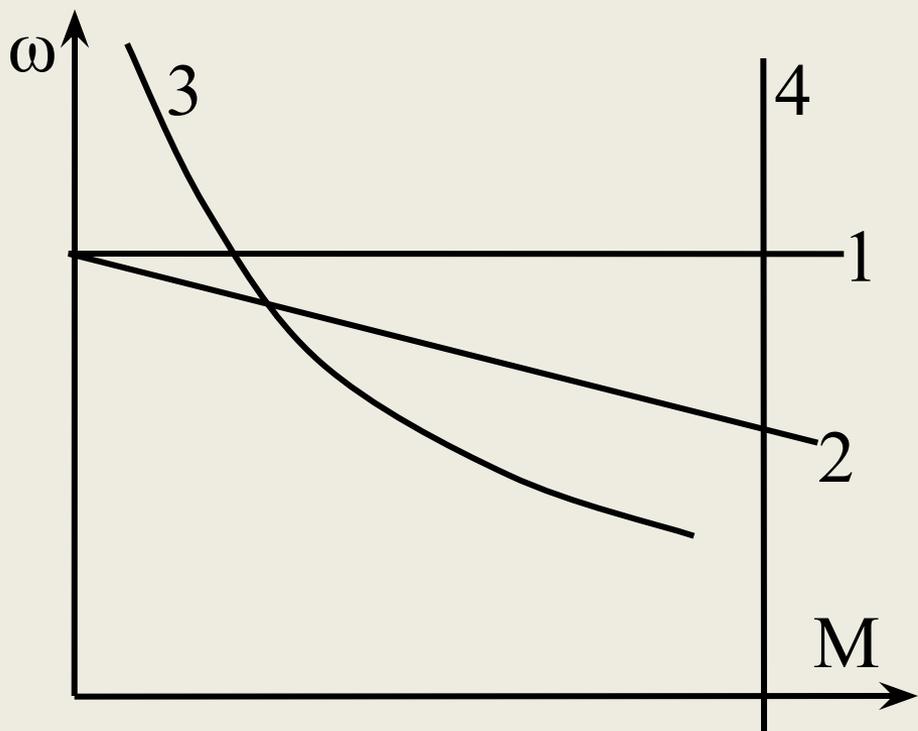
$$\beta_c = \frac{\partial M_c}{\partial \omega}.$$



1. $x = 0; \beta_c = 0.$
2. $x = 1; \beta_c > 0.$
3. $x = 2; \beta_c > 0.$
4. $x = -1; \beta_c < 0.$

Все электродвигатели по своим механическим характеристикам можно тоже разделить на четыре группы.

Жесткость характеристик двигателя $\beta = \frac{\partial M}{\partial \omega}$.



1. $\beta = \infty$ – абсолютно жесткая.
2. $\beta < 0$ – жесткая.
3. $\beta < 0$ – мягкая.
4. $\beta = 0$ – абсолютно мягкая.

Понятие о статической устойчивости привода

Под статической устойчивостью понимается такое состояние установившегося режима работы привода, когда при случайно возникшем отклонении скорости от установившегося значения привод возвращается в точку установившегося режима.

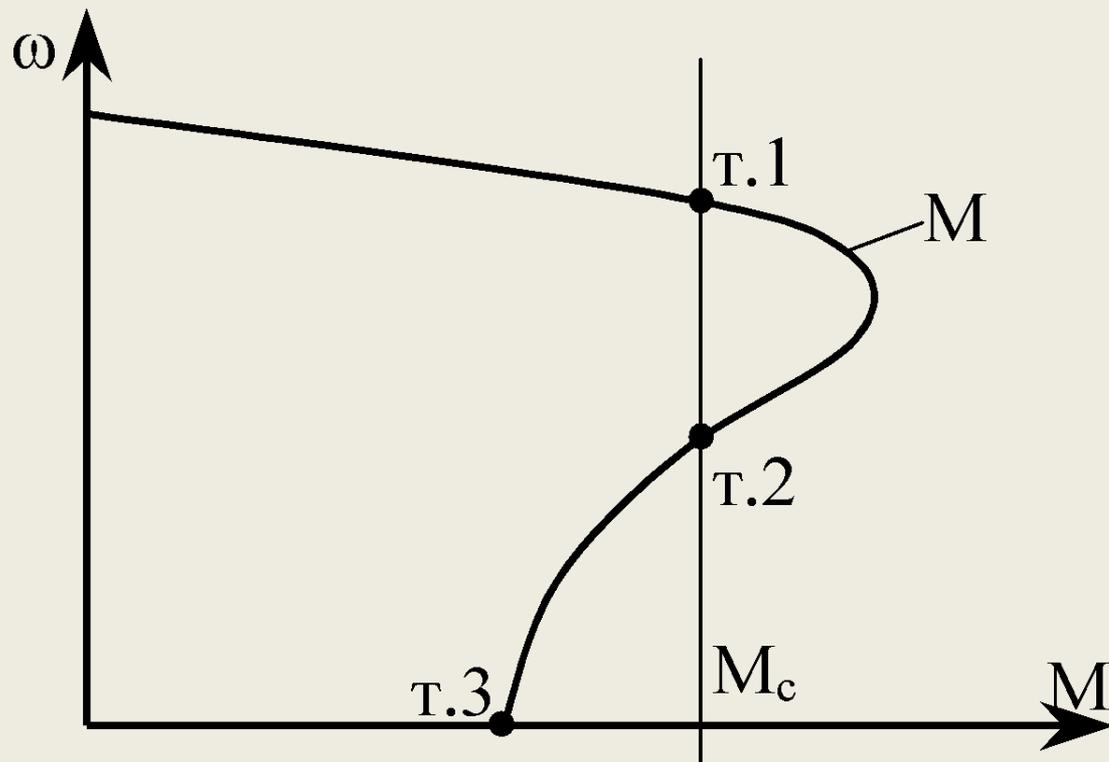
Статически не устойчивая система не возвращается в равновесное состояние.

Система статически устойчива, если в точке равновесия выполняется условие

$$\frac{\partial M}{\partial \omega} - \frac{\partial M_c}{\partial \omega} < 0;$$

или $\beta - \beta_c < 0.$

Возьмем, например, механическую характеристику асинхронного двигателя M и рабочего механизма M_c .



В т.1 $\beta_c = 0$, $\beta < 0$, $\beta - \beta_c < 0 \Rightarrow$ условие (11) выполняется.

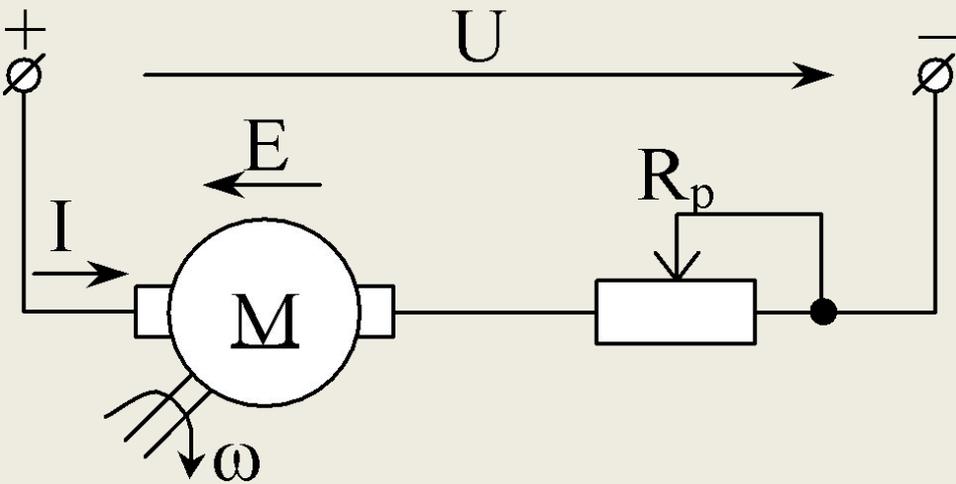
В т.2 $\beta_c = 0$, $\beta > 0$, $\beta - \beta_c > 0 \Rightarrow$ условие (11) не выполняется.

В т.2 достаточно сместиться несколько вправо и двигатель перейдет в т.1, а если влево, то двигатель остановится, т.к. в т.3 $M_{\Pi} < M_c$.

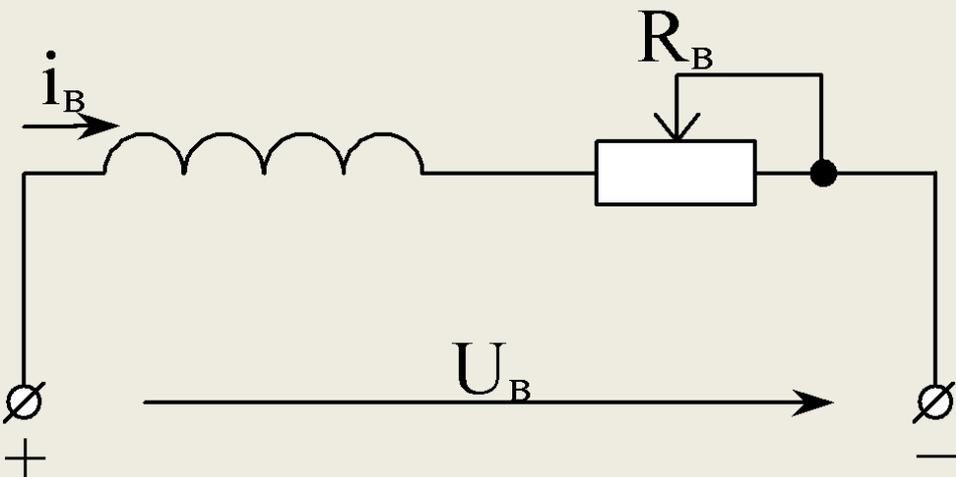
Механические характеристики электродвигателей

Механические характеристики ДПТ независимого возбуждения

Двигательный режим ($U > E$).



$$U = E + I \cdot R; \quad k = \frac{pN}{2\pi a};$$
$$E = k\Phi \omega;$$
$$M = k\Phi I;$$
$$R = r_a + R_p;$$
$$\omega = f(I) - \text{электромеханическая (скоростная) хар-ка};$$



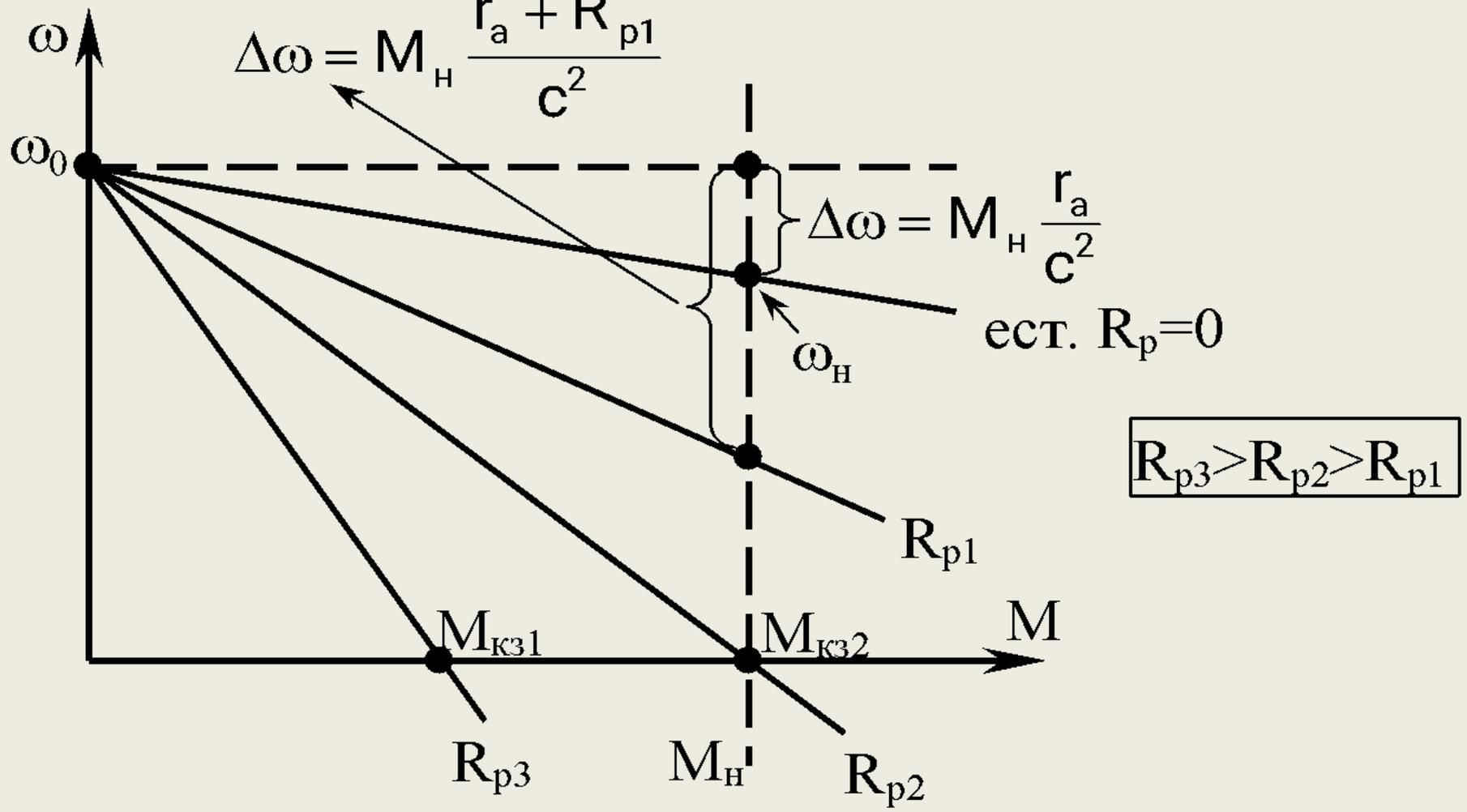
$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R}{k\Phi} I = \omega_0 - \Delta\omega;$$
$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi} - \text{скорость идеального холостого хода.}$$

Механическая характеристика $\omega = f(M)$.

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R}{k\Phi} \cdot \frac{M}{k\Phi} = \frac{U}{C} - \frac{R}{C^2} \cdot M = \omega_0 - \Delta\omega,$$

$$\Delta\omega = \frac{R}{C^2} \cdot M = \frac{R}{C} \cdot I \quad \text{— изменение скорости.}$$

$$\Delta\omega = M_H \frac{r_a + R_{p1}}{C^2}$$



Построение механической характеристики

Механическую характеристику можно построить по паспортным данным: I_H ; ω_H ; P_H ; U_H ; η_H . Так как характеристика без учета реакции якоря может приниматься линейной, то достаточно иметь две точки характеристики: $\omega = \omega_0$; $M = 0$ и $\omega = \omega_H$; $M = M_H$.

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = c_H \cdot I_H;$$

$$\omega_0 = \frac{U_H}{c_H} = \omega_H \cdot \frac{U_H}{U_H - I_H \cdot r_a}.$$

Принимается, что половина потерь в двигателе приходится на якорь, т.е.

$$I_H^2 r_a = 0,5(1 - \eta_H) U_H \cdot I_H;$$

$$r_a = 0,5(1 - \eta_H) \frac{U_H}{I_H};$$

$$\omega_{\text{нр}} = \omega_0 \left[1 - I_H \frac{r_a + R_p}{U_H} \right];$$

$$M_{\text{кз}} = M_H \frac{I_{\text{кз}}}{I_H}; \quad I_{\text{кз}} = \frac{U_H}{R}.$$

Анализ характеристик или их построение можно вести в относительных единицах:

$$\omega_* = \frac{\omega}{\omega_0}; \quad I_* = \frac{I}{I_H}; \quad M_* = \frac{M}{M_H}; \quad R_* = \frac{R}{R_H};$$

$$R_H = \frac{U_H}{I_H}; \quad \Delta\omega_* = I_* R_* = M_* R_*.$$

Механические характеристики в тормозных режимах

Существуют три вида торможения.

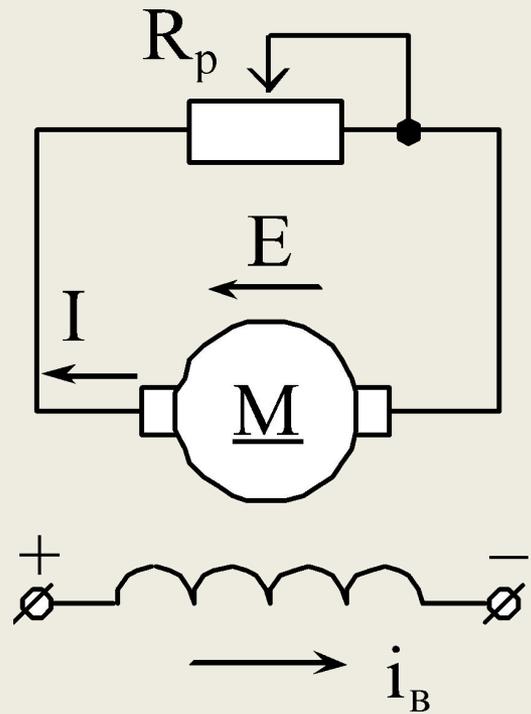
1. Торможение с отдачей энергии в сеть. Это рекуперация, двигатель переходит в генераторный режим и работает на сеть. Это возможно при $E > U$, т.е. $\omega > \omega_0$.

На графике это во II квадранте выше значения ω_0 , при этом

$$\omega = \omega_0 + M_{\tau} \frac{R}{C^2}; \quad M = -M_{\tau}.$$

Момент на валу стал отрицательным, механическая энергия со стороны вала преобразуется в электрическую.

2. Динамическое торможение – двигатель отключается от сети и подключается к тормозному резистору.

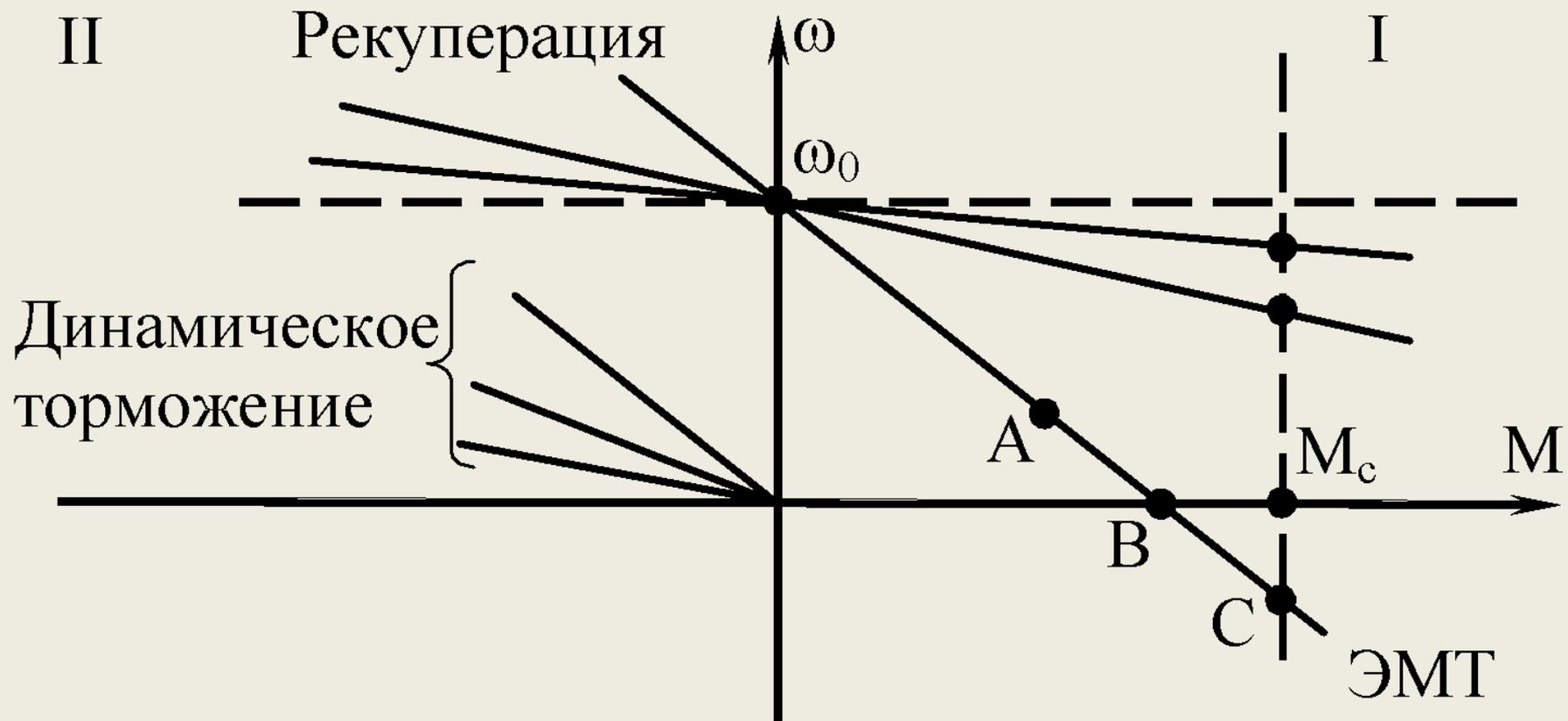


$$I = \frac{U - E}{R} = -\frac{E}{R};$$

$$M = -M_T;$$

$$\omega = M_T \frac{R}{C^2}.$$

Характеристики располагаются во втором квадранте и проходят через начало координат.



3. Торможение противовключением или режим электромагнитного тормоза – это когда на вращающийся двигатель подается напряжение другой полярности, при этом приложенное напряжение складывается с ЭДС якоря, ток торможения определяется

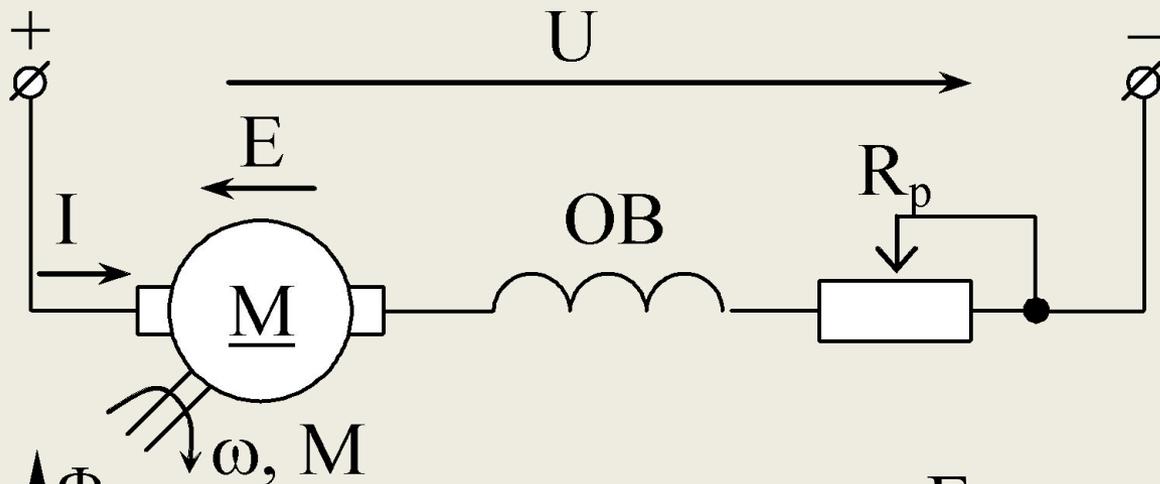
$$I = \frac{U + E}{R}.$$

На графике это точка С, в т. В режим короткого замыкания, а в т. А двигательный режим с дополнительным сопротивлением в цепи якоря, что поясняется таблицей

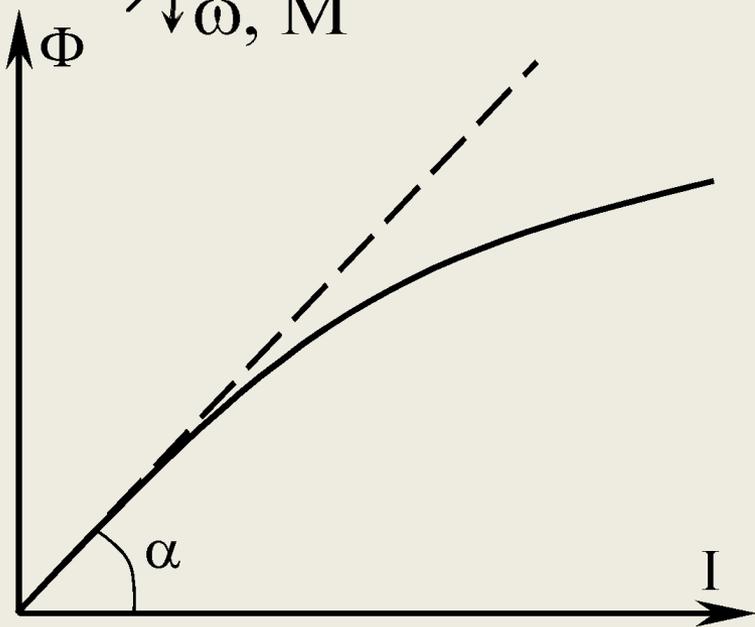
Точка	Режим	Соотношение
А	<p>Двигатель</p> <p>\xrightarrow{U} \xleftarrow{E} \xrightarrow{IR}</p>	$I = \frac{U - E}{R}$
В	<p>Режим к.з. ($\omega = 0$)</p> <p>\xrightarrow{U} $E = 0$ \xrightarrow{IR}</p>	$I = \frac{U}{R}$
С	<p>ЭМТ</p> <p>\xrightarrow{U} \xrightarrow{E} \xrightarrow{IR}</p>	$I = \frac{U + E}{R}$

Механические характеристики ДПТ последовательного возбуждения

Двигательный режим



$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}.$$

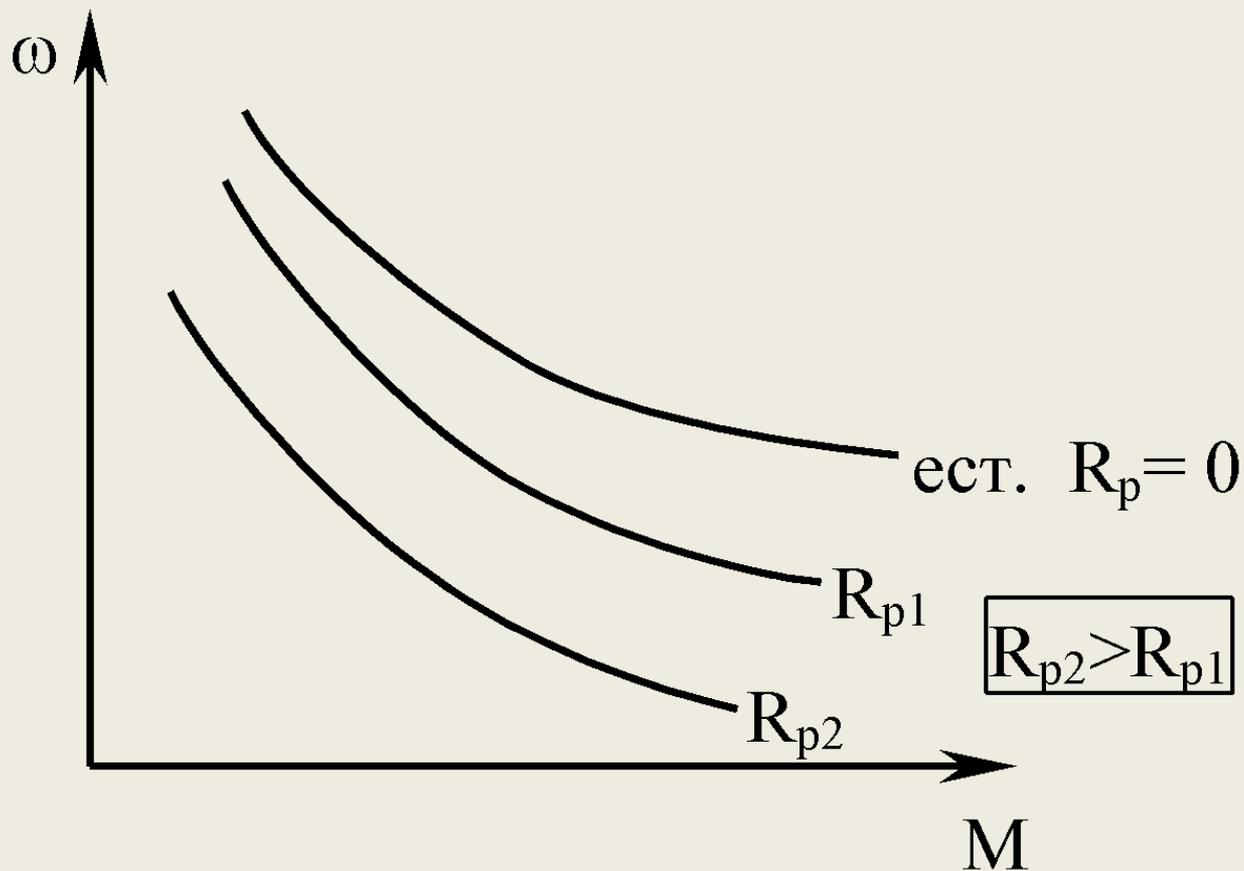


Если считать в пределах ненасыщенной части кривой намагничивания $\Phi = \alpha I$, то

$$M = k\Phi I = k\alpha I^2.$$

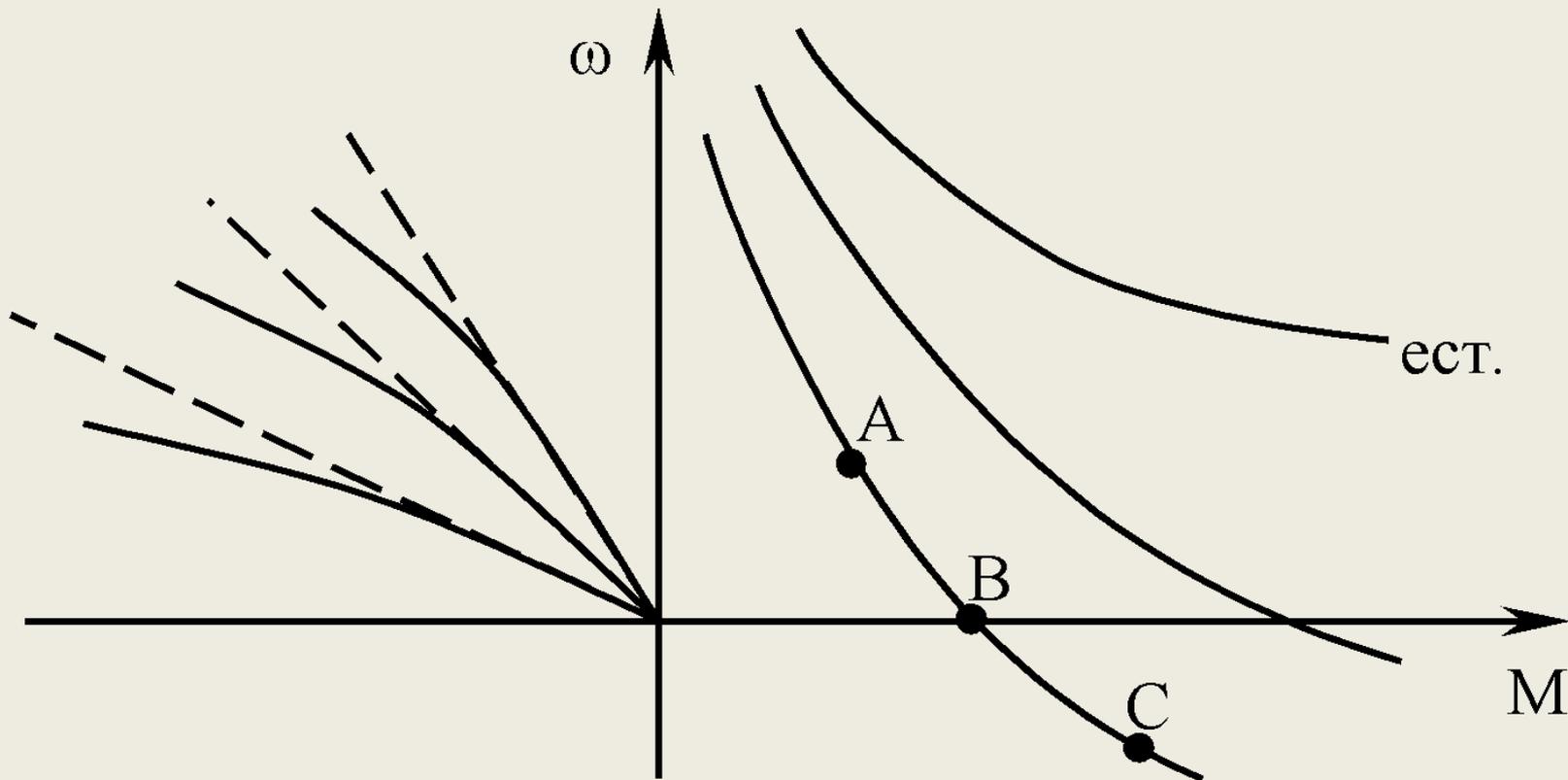
Тогда $\omega = \frac{U}{k\alpha\sqrt{\frac{M}{k\alpha}}} - \frac{R}{k\alpha};$

$$\omega = \frac{A}{\sqrt{M}} - B.$$

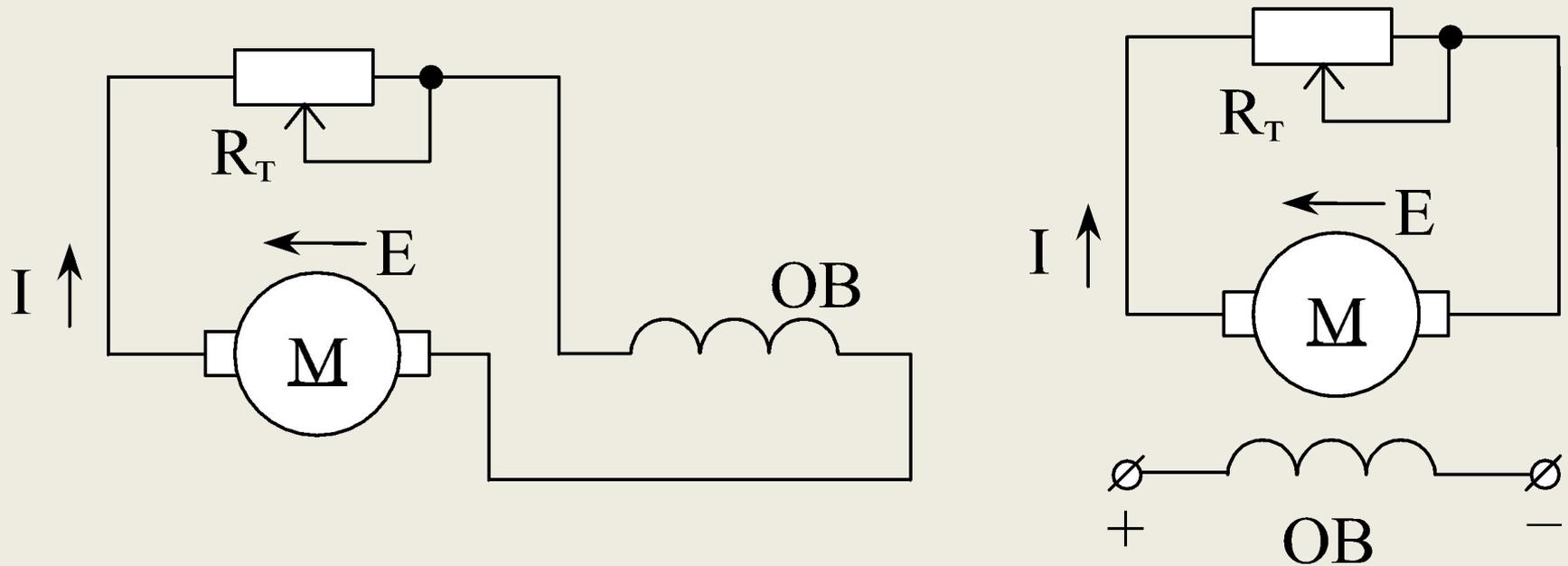


Тормозные режимы

1. Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения не имеет пересечения с осью ω , т.е. не имеет определенного значения ω_0 , следовательно, он не может перейти автоматически в генераторный режим. Рекуперация возможна только после перехода на схему независимого возбуждения.



2. Режим динамического торможения аналогичен предыдущему двигателю. Но надо иметь ввиду следующую особенность. Для того, чтобы двигатель возбуждился в генераторном режиме, необходимо изменить полярность подключения обмотки возбуждения.



На графике характеристики расположены во II квадранте. Пунктирные линии соответствуют условию с независимым возбуждением.

3. Режим противовключения возможен в двух случаях:

- внешний момент больше момента $M_{к.з.}$ и двигатель вращается в противоположную сторону;
- изменяется направление тока в обмотке возбуждения.

Механические характеристики асинхронного двигателя

Двигательный режим

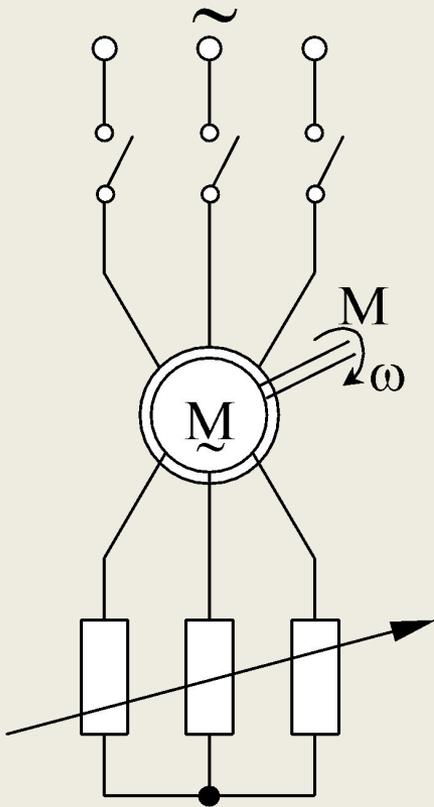
Из Г-образной схемы замещения, приняв $\sigma = 1$, имеем

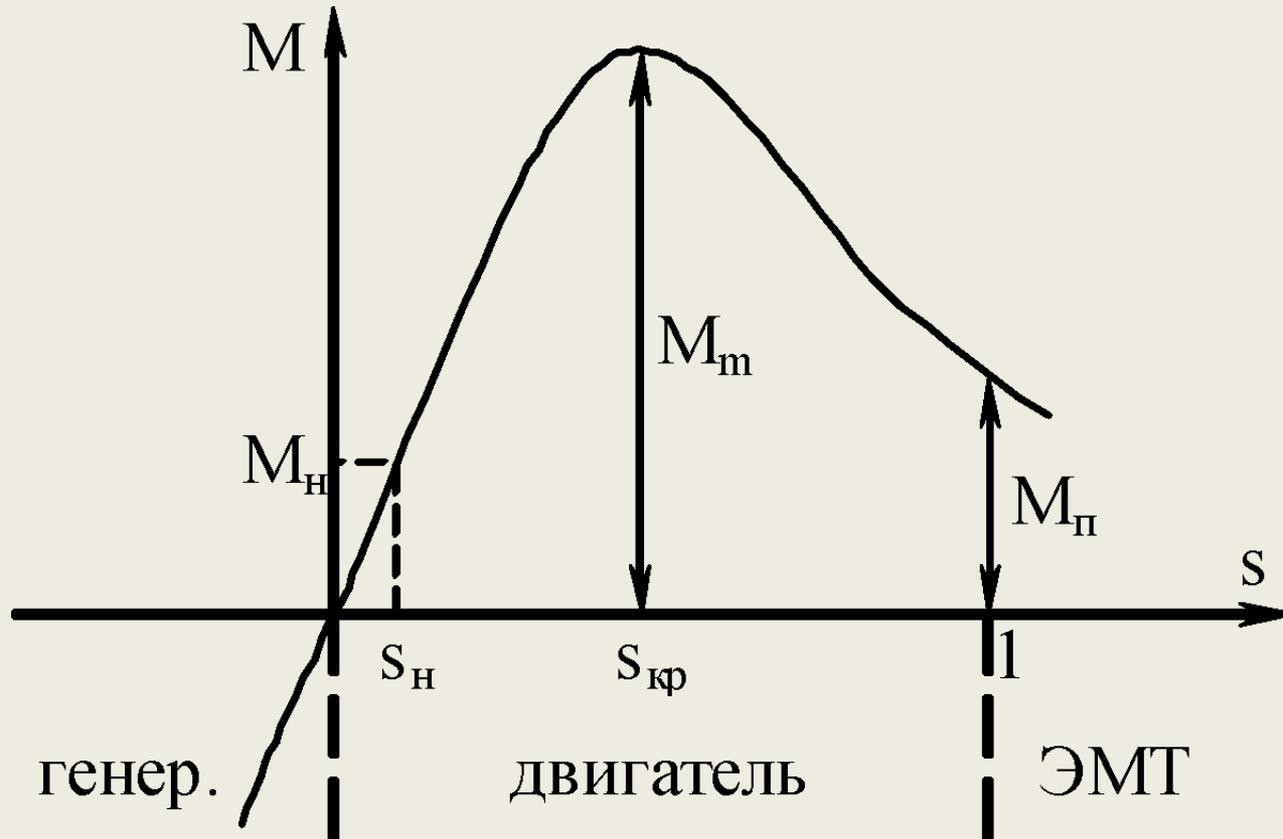
$$M = \frac{3U_{\phi}^2 R'_2}{\omega_0 [(R_1 + R'_2/s)^2 + (x_1 + x'_2)^2] s}$$

$R_1; R'_2; x_1; x'_2$ – параметры обмоток статора и ротора.

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}; \quad \omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60} = \frac{2\pi f}{p};$$

$$s_{кр} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}}$$





1. $s = 0, M = 0; \omega = \omega_0$.
2. $s = s_H, M = M_H; \omega = \omega_H$ – номинальный режим.
3. $s = s_{кр}, M = M_m$ – максимальный момент двигателя.
4. $s = 1, M = M_p$ – пусковой момент.
5. $s < 0, M = -M$ – генераторный режим.
6. $s > 1, M = -M_T$ – ЭМТ.

Формула Клосса

$$M = \frac{2M_m}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}};$$

$$s_{кр} = s_H \left(\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1} \right); \quad \lambda = \frac{M_m}{M_H}.$$

Из анализа выражения (18) следует:

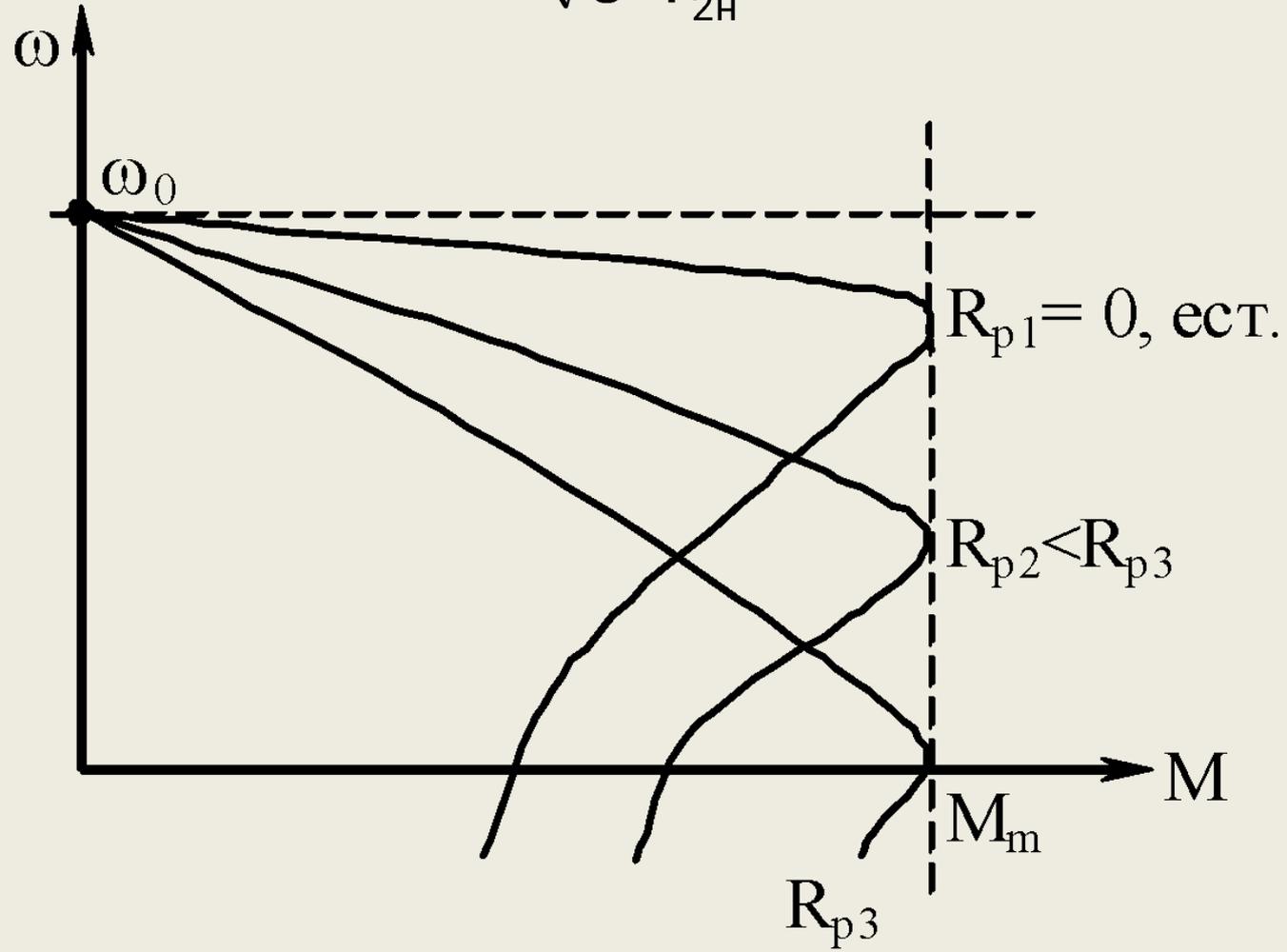
1. $s > s_{кр} \rightarrow s_{кр}/s \approx 0 \rightarrow M = 2M_m s_{кр}/s$ – гипербола;

2. $s < s_{кр} \rightarrow s/s_{кр} \approx 0 \rightarrow M = 2M_m s/s_{кр}$ – прямая.

Следовательно, рабочая часть характеристики может быть признана прямой линией, а нерабочая часть – гиперболой.

Сопротивление обмотки ротора может быть определено из условия:

$$R_2 = \frac{S_H \cdot E_2}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}}$$



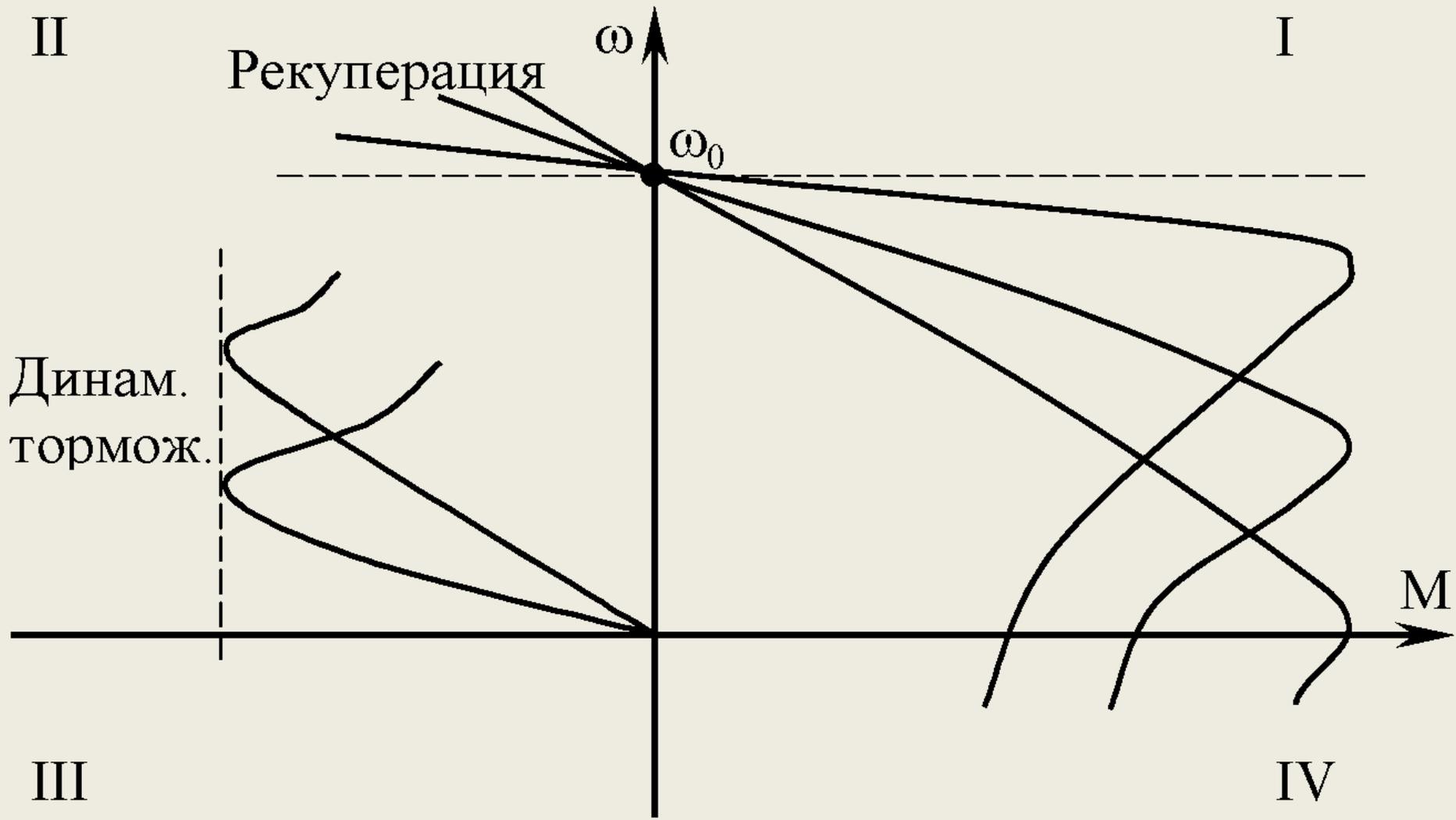
Тормозные режимы

Асинхронный двигатель обладает режимами торможения:

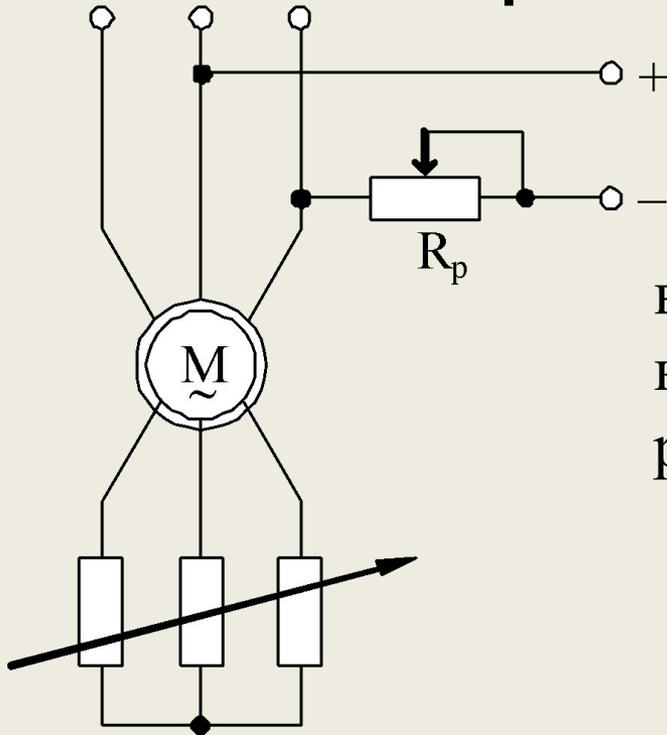
1. АД может автоматически перейти в генераторный режим, если частота вращения ротора превзойдет синхронную скорость, т.е.

$$\omega > \omega_0.$$

В этом случае в сеть возвращается активная мощность, т.е. имеем режим рекуперации, при этом АД продолжает потреблять реактивную мощность из сети, которая идет на поддержание вращающегося магнитного поля.



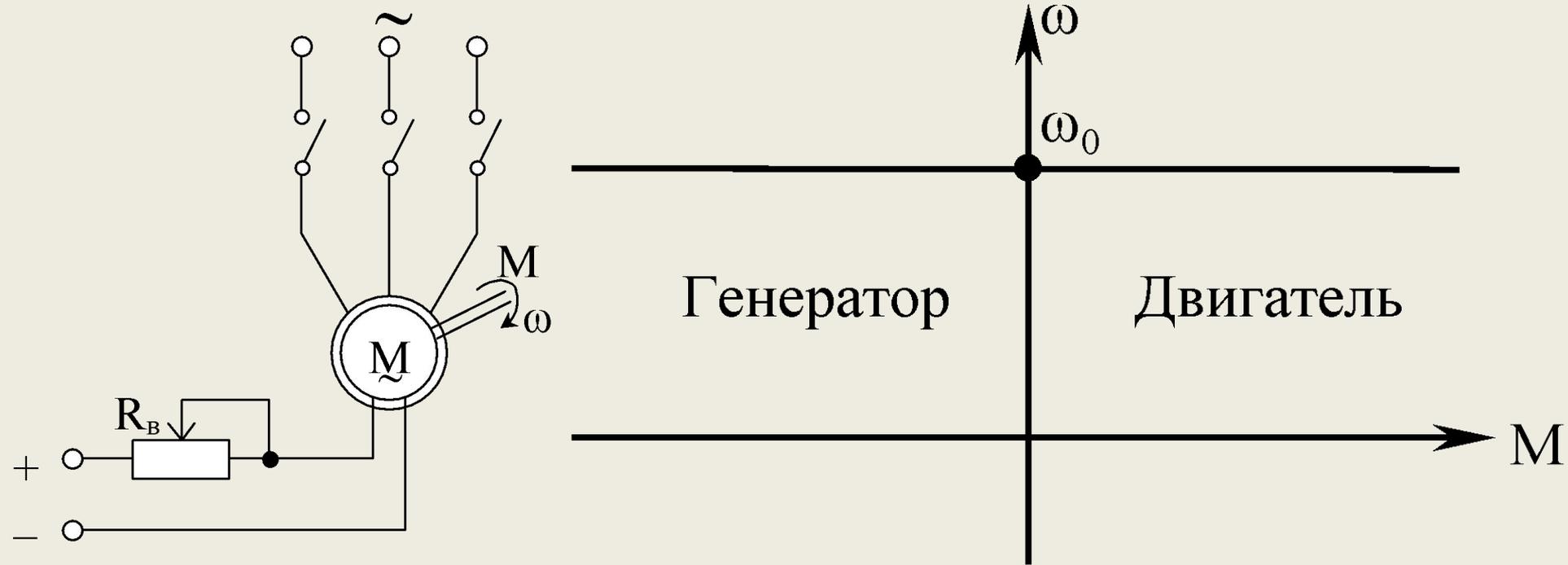
2. Динамическое торможение – двигатель отключается от сети, а на обмотку статора подается постоянное напряжение.



Механическая мощность со стороны вала преобразуется в электрическую, которая гасится на сопротивлении в цепи ротора и его обмотке.

3. Режим противовключения (ЭМТ) – на ходу меняют чередование фаз при подключении обмотки статора. Магнитное поле реверсируется, момент на валу двигателя становится тормозным.

Механические и угловые характеристики синхронного двигателя



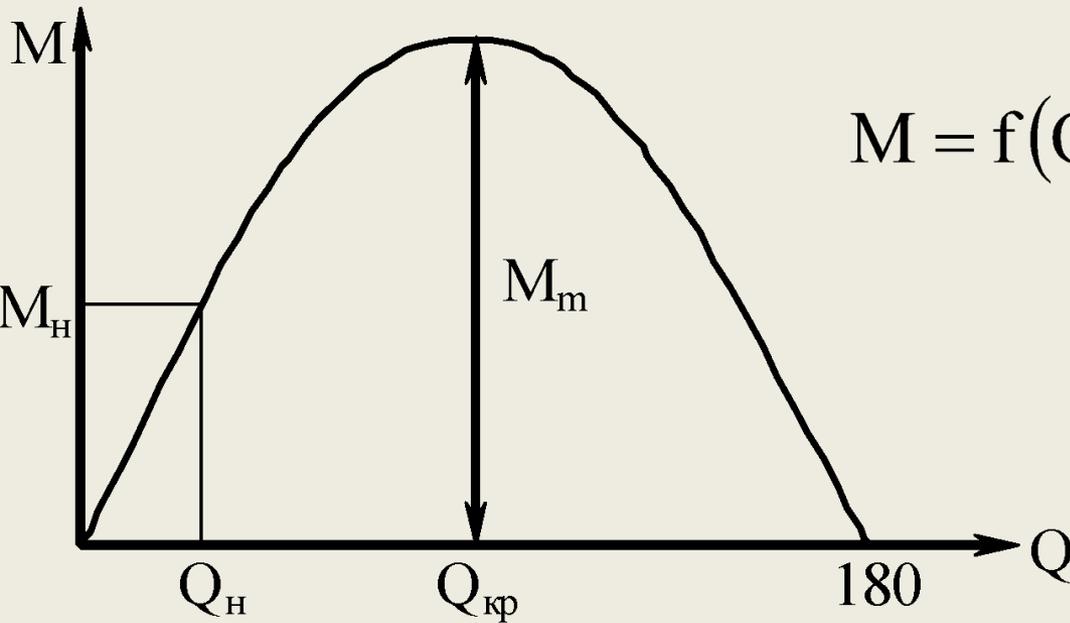
Абсолютно жесткая ($\beta = \infty$) характеристика

$$-M_m \leq M \leq M_m ;$$

$$\omega = \omega_0.$$

Момент на валу СД зависит от угла нагрузки Q .

Для неявнополюсной машины имеем:



$$M = f(Q) = \frac{P}{\omega_0} = \frac{mUE}{\omega_0 X_d} \sin(Q).$$

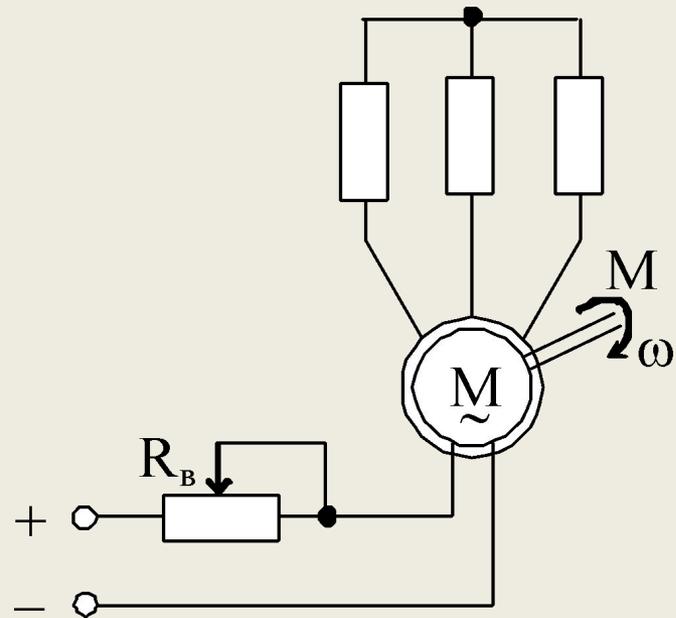
$$M_m = \frac{mUE}{\omega_0 X_d};$$

$$\lambda = \frac{M_m}{M_n} = 2 \div 2,5(3,5 \div 4);$$

$0 \leq Q \leq 90^0$ – рабочая часть характеристики.

Режимы торможения:

1. Рекуперация возможна, но она не дает снижения скорости.



2. Динамическое торможение – СД отключается от сети и присоединяется к тормозному резистору. СМ переходит в генераторный режим.

3. Противовключение не применяется, т.к. асинхронный режим при торможении не эффективен.

Регулирование угловой скорости ЭП

Основные показатели регулирования

1. Диапазон регулирования: $D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}$, D 10:1.

2. Плавность регулирования: $\varphi_{\text{пл}} = \frac{\omega_i}{\omega_{i-1}}$,

если число ступеней регулирования $z \rightarrow \infty$, то $\varphi_{\text{пл}} \rightarrow 1$.

$$D = \varphi_{\text{пл}}^{z-1}.$$

3. Экономичность: $\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}$;

$$\eta_p = \frac{\sum_1^m P_{2q} t_q}{\sum_1^m (P_{2q} + \Delta P_q) t_q}$$

— средневзвешанный,
 m — число ступеней.

Для привода переменного тока еще добавляется:

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad \text{— коэффициент мощности;}$$

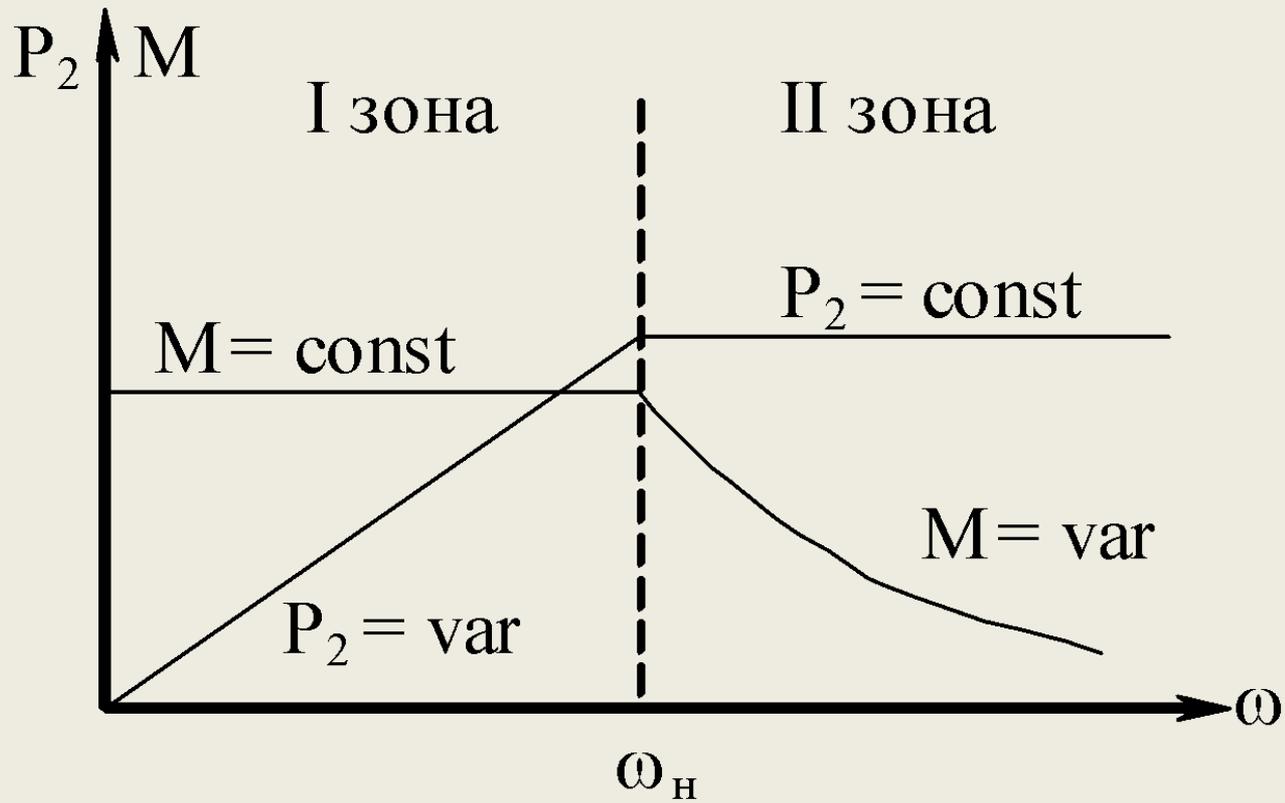
$$\cos(\varphi_p) = \frac{\sum_1^m P_q t_q}{\sum_1^m \sqrt{P_q^2 + Q_q^2} \cdot t_q} \quad \text{— средневзвешанный.}$$

4. Стабильность угловой скорости (жесткость характеристики).

5. Направления регулирования — вверх от основной, вниз от основной, однозонное, двухзонное.

6. Допустимая нагрузка двигателя при регулировании.

Можно представить график двухзонного регулирования



Регулирование угловой скорости ДПТ независимого возбуждения

Все способы регулирования вытекают из известного выражения электромеханической характеристики:

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}.$$

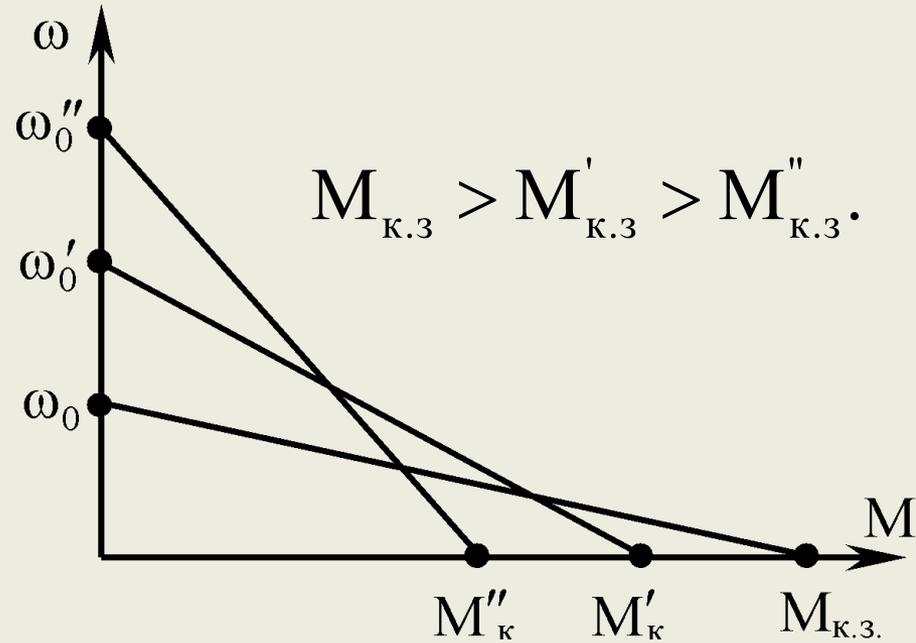
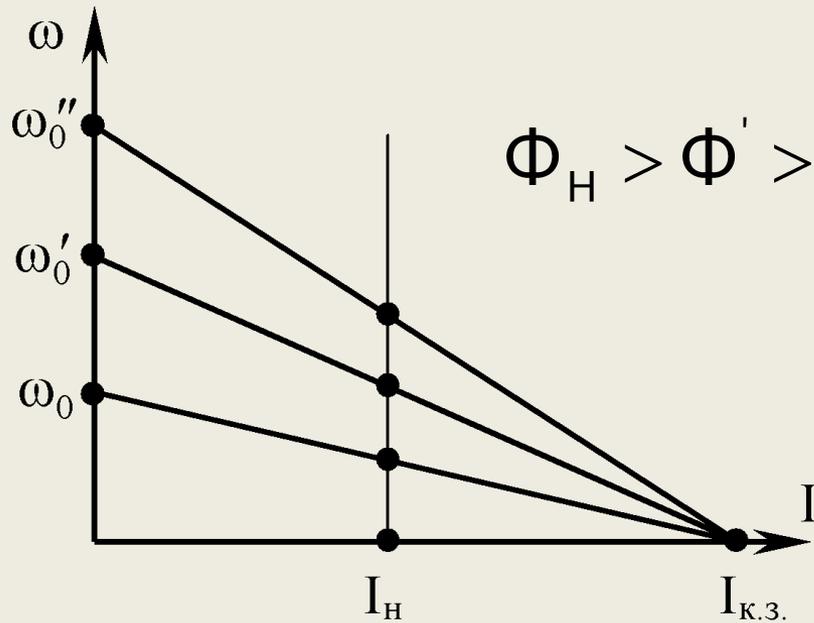
Их три. Дело в том, как ими управлять.

Изменением магнитного потока ($\Phi = \text{var}$)

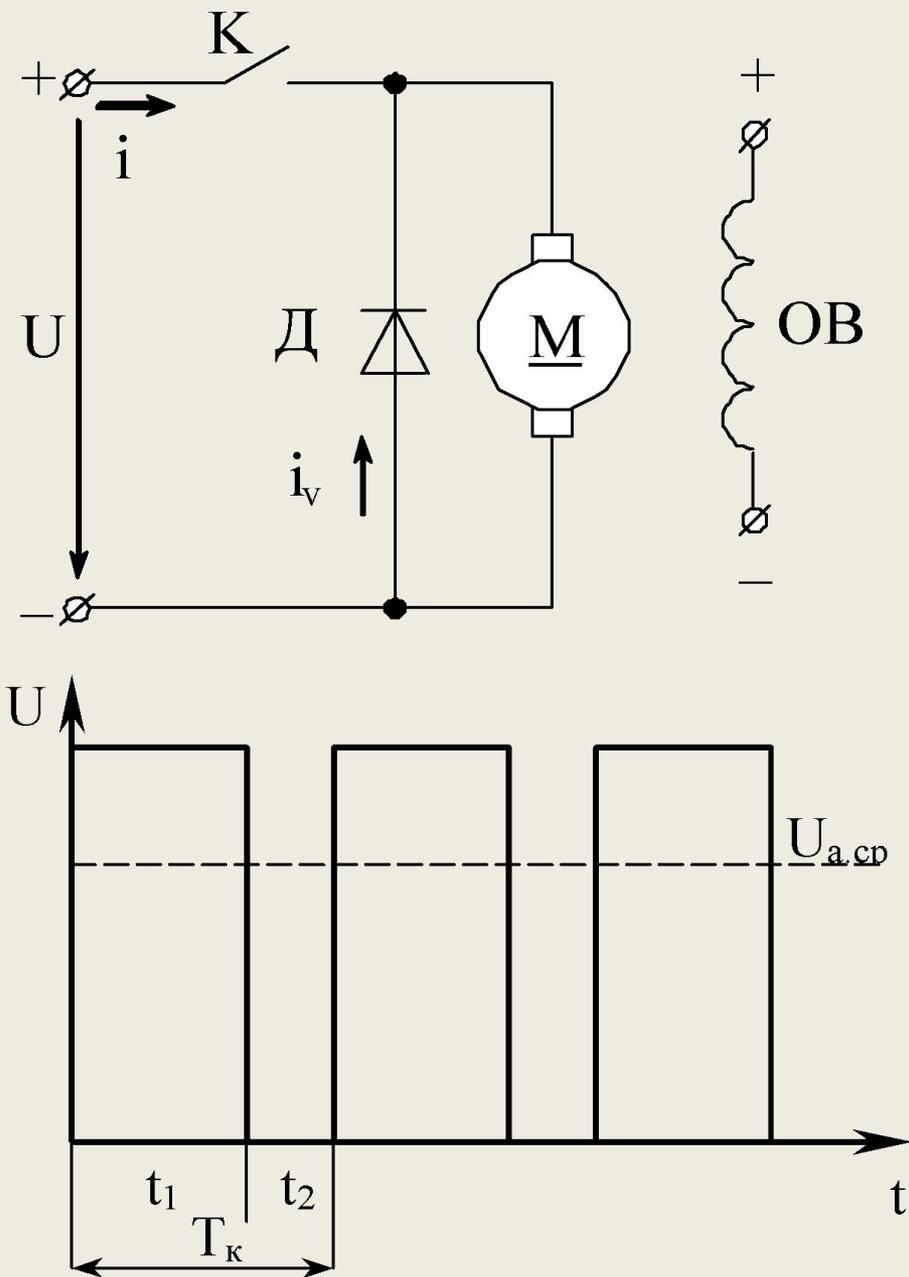
$$\omega \equiv \frac{1}{\Phi}.$$

Потери на возбуждение электрической машины составляют $\Delta P_B \approx 2 \div 2,5\%$ от P_H , поэтому этот метод регулирования считается экономичным. Однако, регулирование возможно только уменьшением потока. Регулирование во второй зоне – выше номинальной скорости.

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_H}; \quad \omega = 0; \quad I = \frac{U}{r_a} = I_{к.з.}$$



Импульсное регулирование напряжения ($U = \text{var}$)



K – электронный ключ.

ШИР – широтно-импульсное регулирование

$$T_k = \text{const};$$

$$\varepsilon = \frac{t_1}{T_k} \text{ скважность};$$

$$\omega = \frac{\varepsilon U}{k\Phi} - M_{ср} \frac{R}{(k\Phi)^2};$$

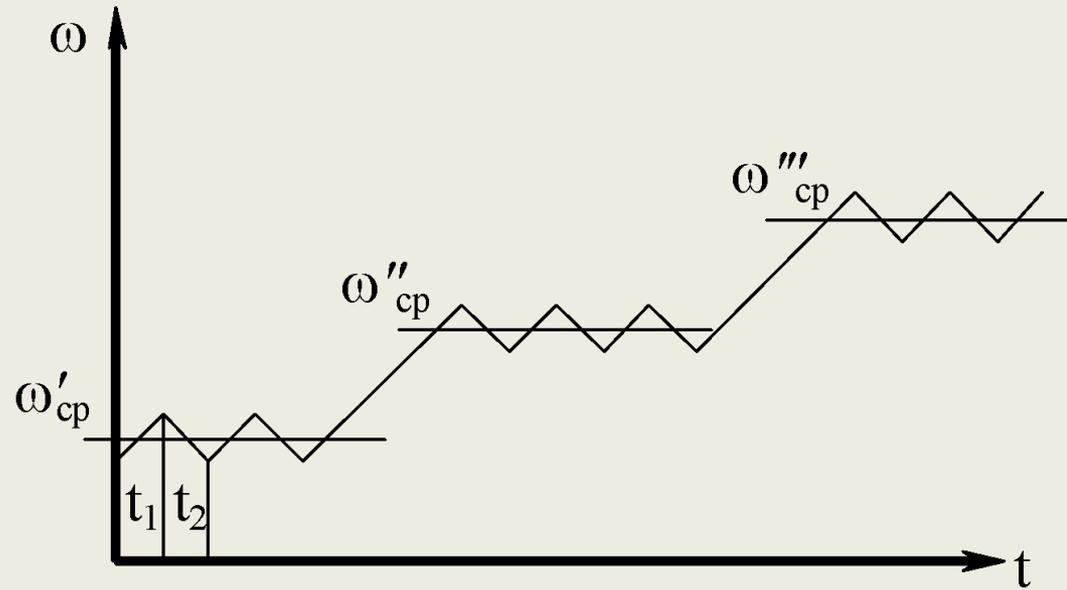
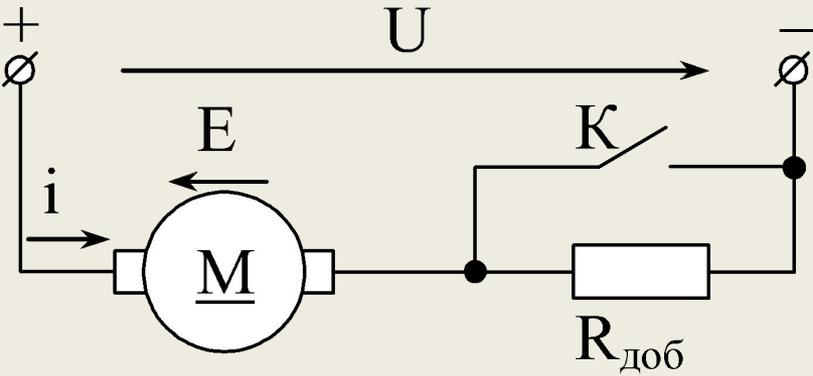
$$U_{a.ср} = \varepsilon \cdot U;$$

$$f \approx 800 \div 1200 \text{ Гц.}$$

ШИМ – широтно-импульсная модуляция;

$$t_1 = \text{const}, f = \text{var.}$$

Реостатно-импульсное регулирование

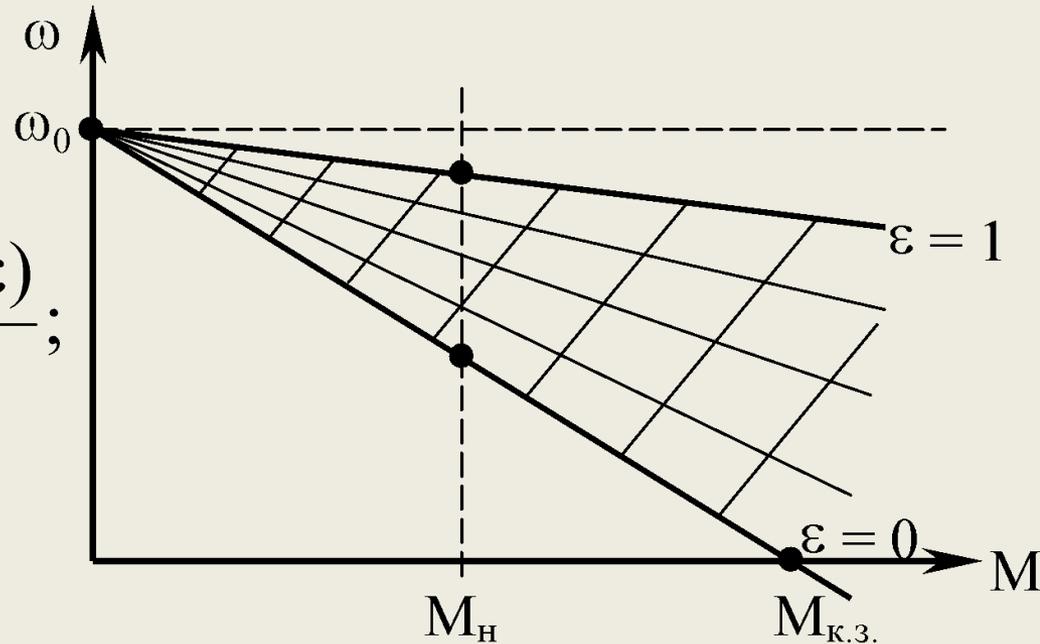


$$\varepsilon = \frac{t_1}{t_1 + t_2} -$$

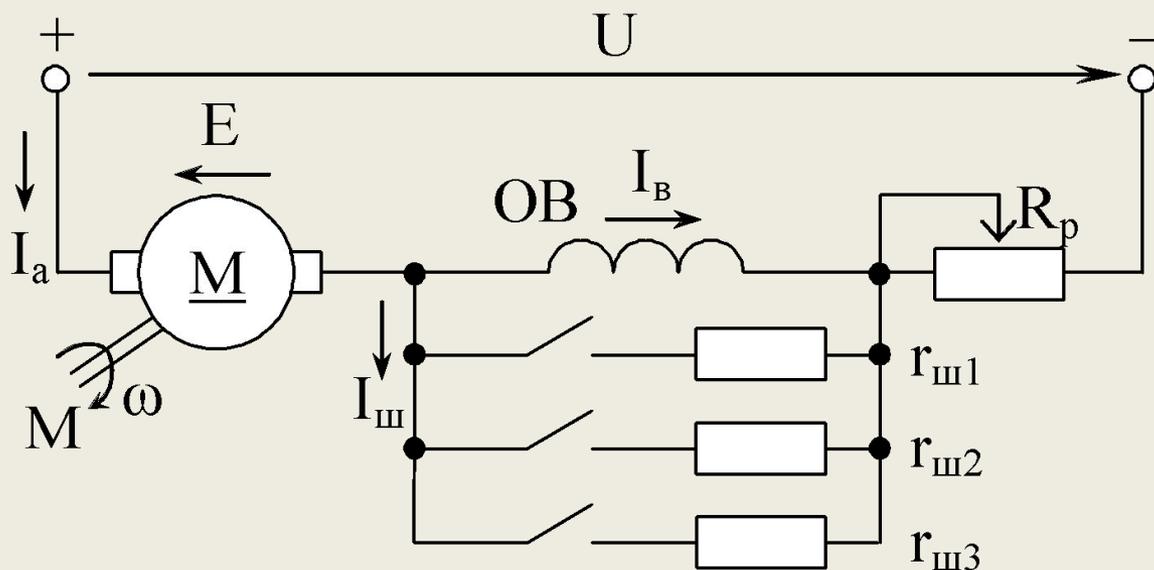
$$R_{\Theta} = R_{\text{доб}} (1 - \varepsilon);$$

$$\omega_{\text{cp}} = \frac{U}{k\Phi} - M_{\text{cp}} \frac{r_a + R_{\text{доб}} (1 - \varepsilon)}{(k\Phi)^2};$$

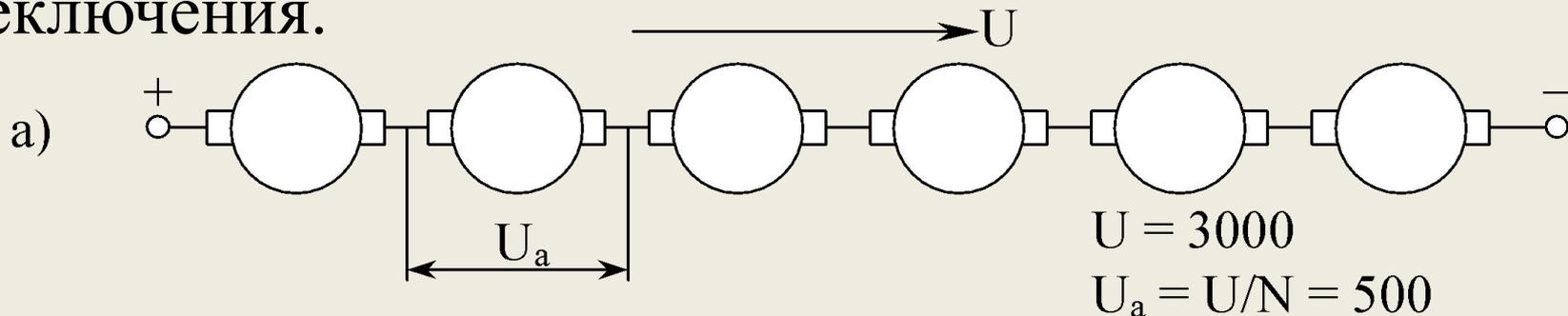
$$\eta \cong \frac{\omega}{\omega_0}.$$

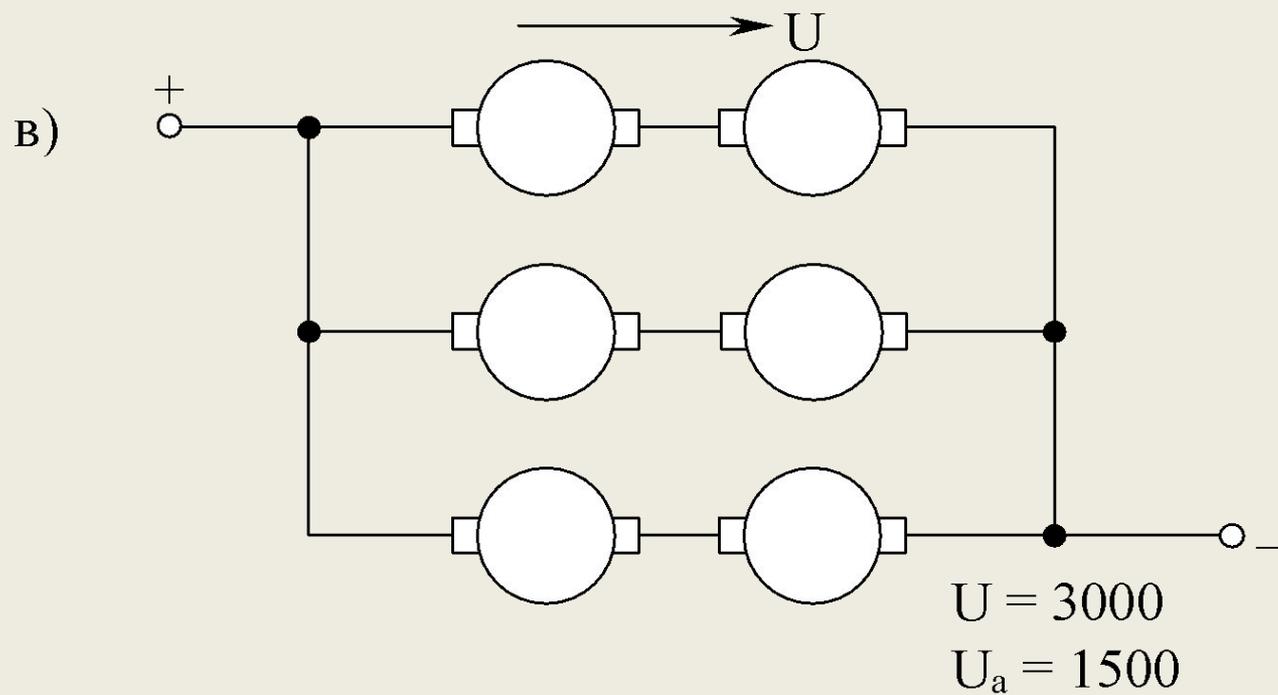
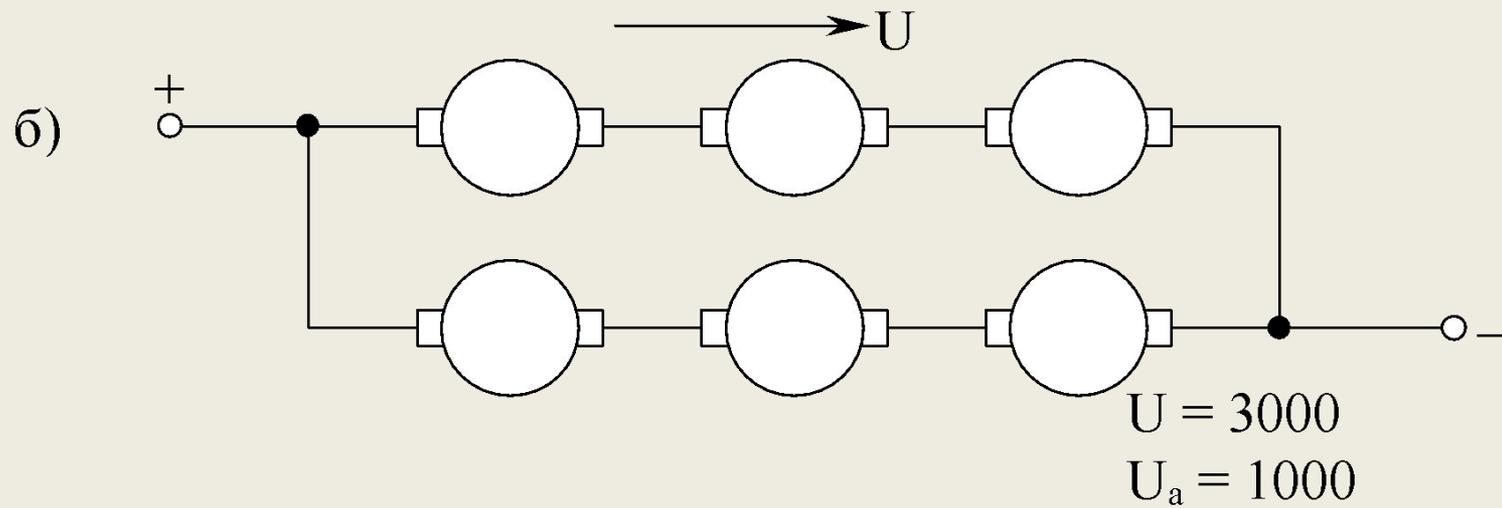


Регулирование угловой скорости ДПТ последовательного возбуждения



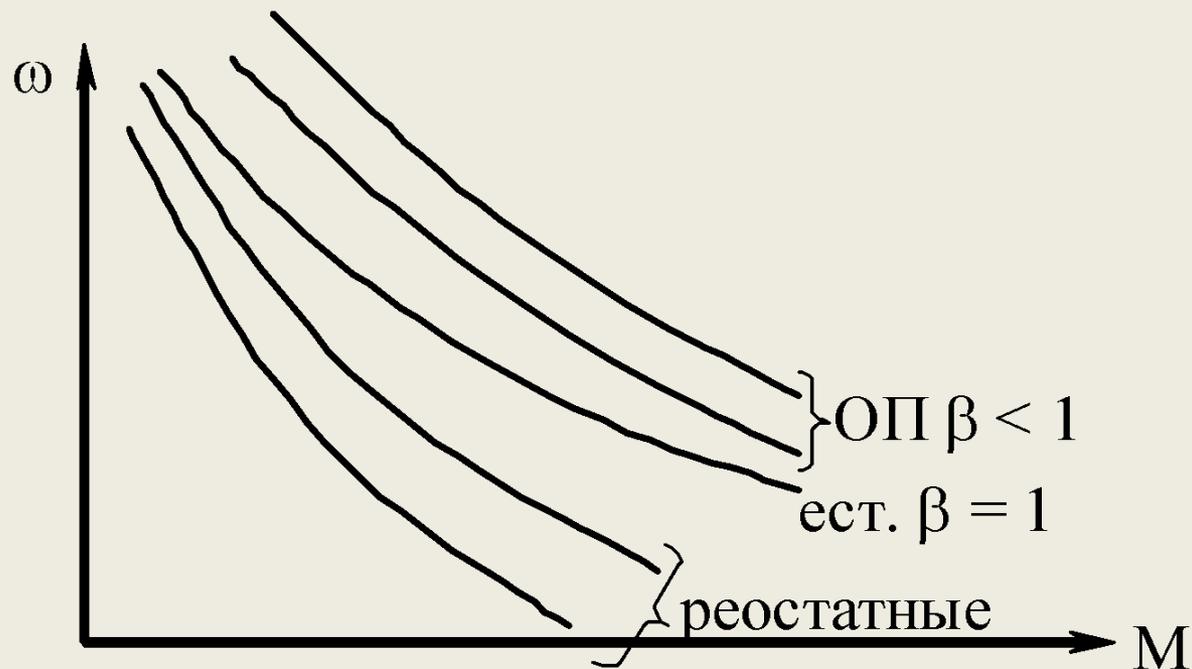
$U = \text{var.}$ Используется любой метод регулирования подводимого напряжения: регулируемый источник; система Г–Д; импульсное регулирование; метод переключения.





$$\Phi = \text{var.} \quad I_B = I_a - I_{\text{ш}}; \quad I_B = \beta \cdot I_a; \quad \beta = \frac{r_{\text{ш}}}{r_B + r_{\text{ш}}}.$$

$$R = \text{var.} \quad \omega = \frac{U}{\alpha k \sqrt{\frac{M}{\alpha k}}} - \frac{R}{\alpha k}.$$



Регулирование угловой скорости ЭП переменного тока

Все более широкое применение в электроприводах имеют асинхронные двигатели, имеющие известные Вам преимущества перед ДПТ. Однако эти двигатели имеют ряд существенных недостатков, связанных с возможностью регулирования угловой скорости.

Основные методы регулирования ω вытекают из соотношения

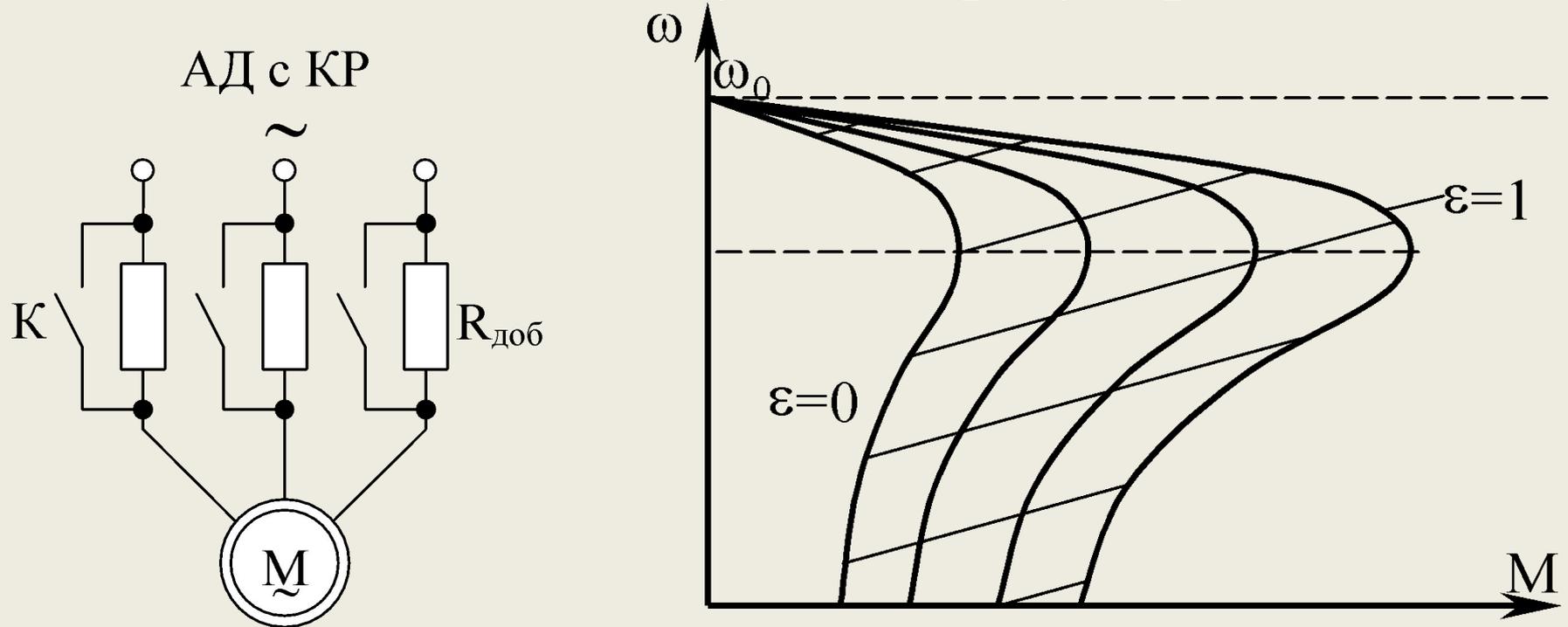
$$\omega_2 = \omega_0(1-s) = \frac{2\pi f_1}{p}(1-s).;$$

$$s = \frac{\omega_0 - \omega_2}{\omega_0};$$

$$\Delta P_{эл2} = s \cdot P_{эм}.$$

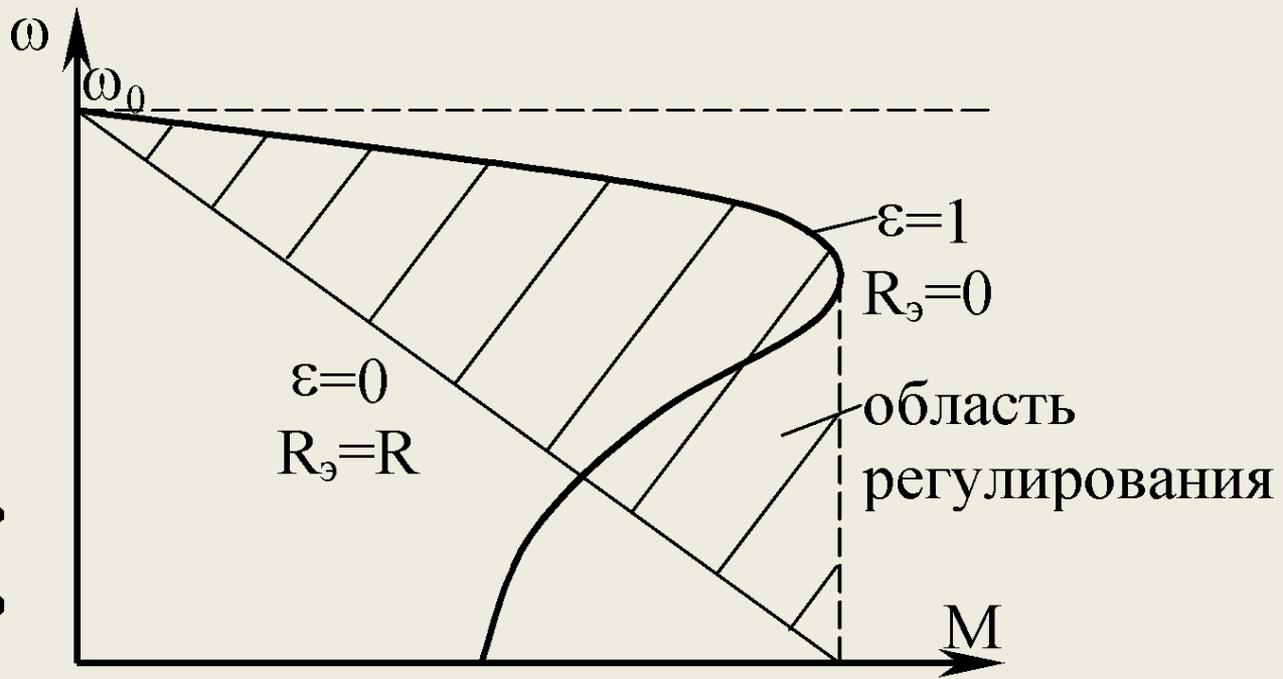
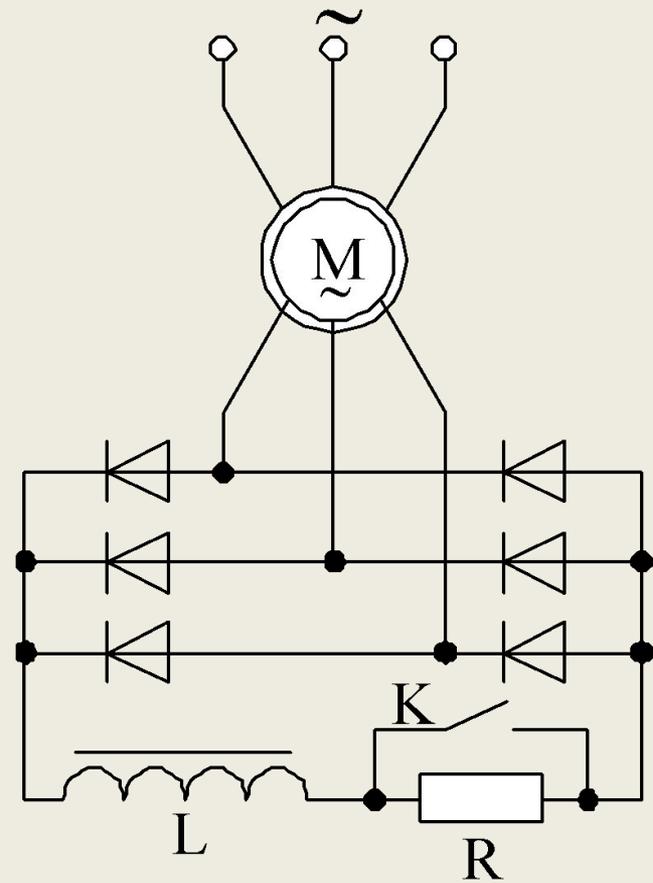
Известны и распространены следующие методы регулирования: реостатные; переключением числа полюсов; изменением частоты питающего напряжения; каскадным включением АД с другими машинами и др.

Реостатно-импульсное регулирование

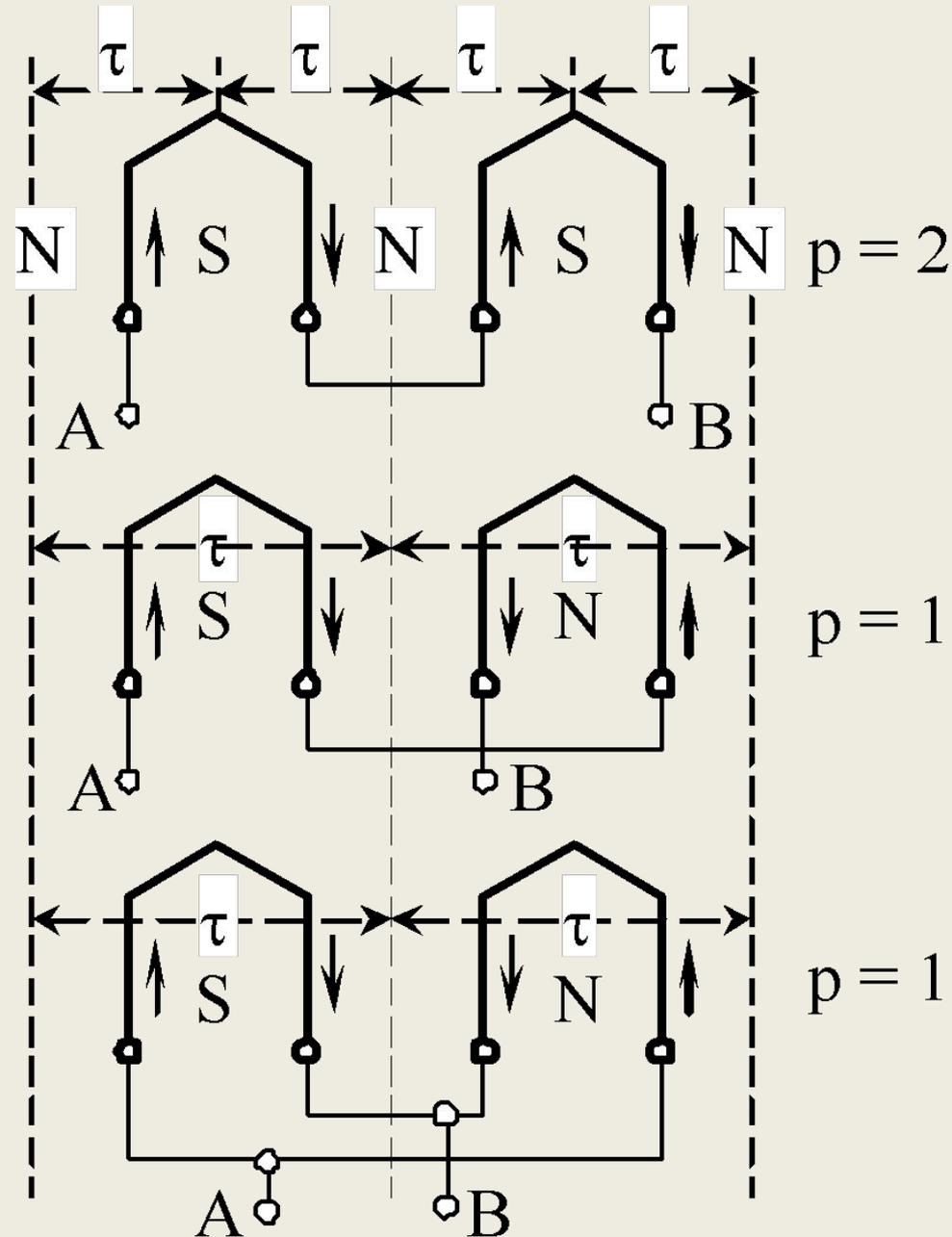


Аналогичное регулирование получается при изменении подводимого напряжения.

АД с ФР



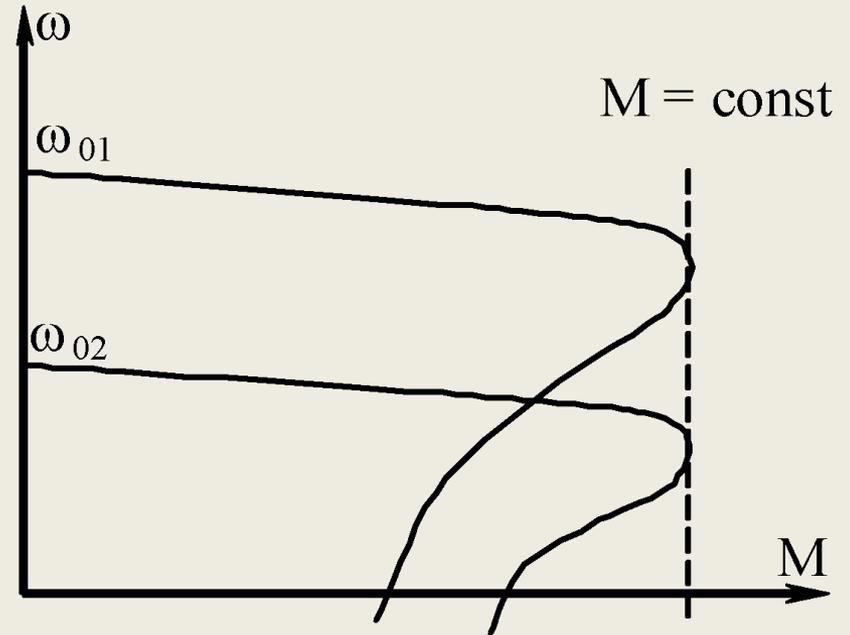
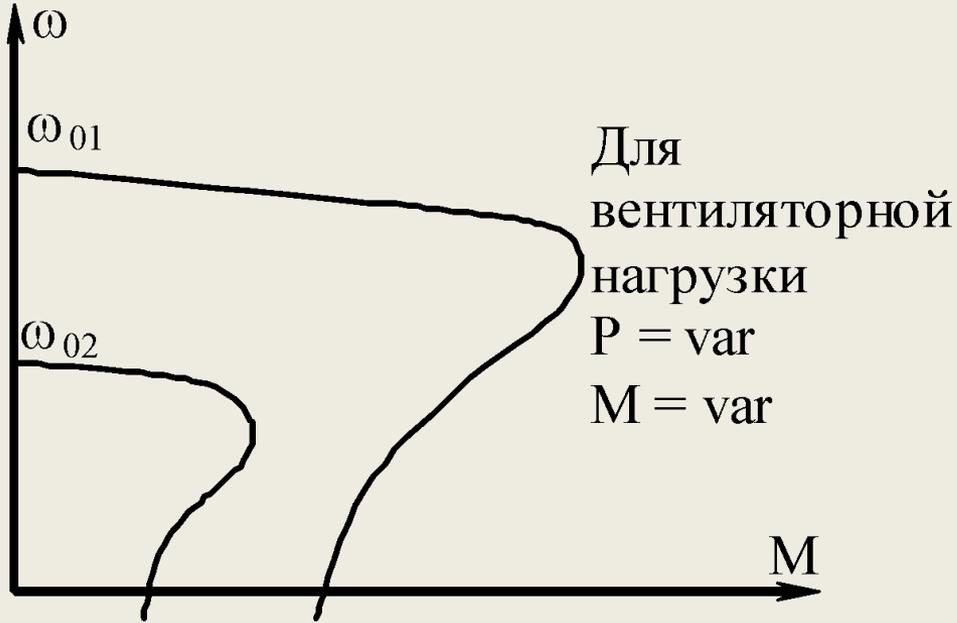
Регулирование переключением числа полюсов

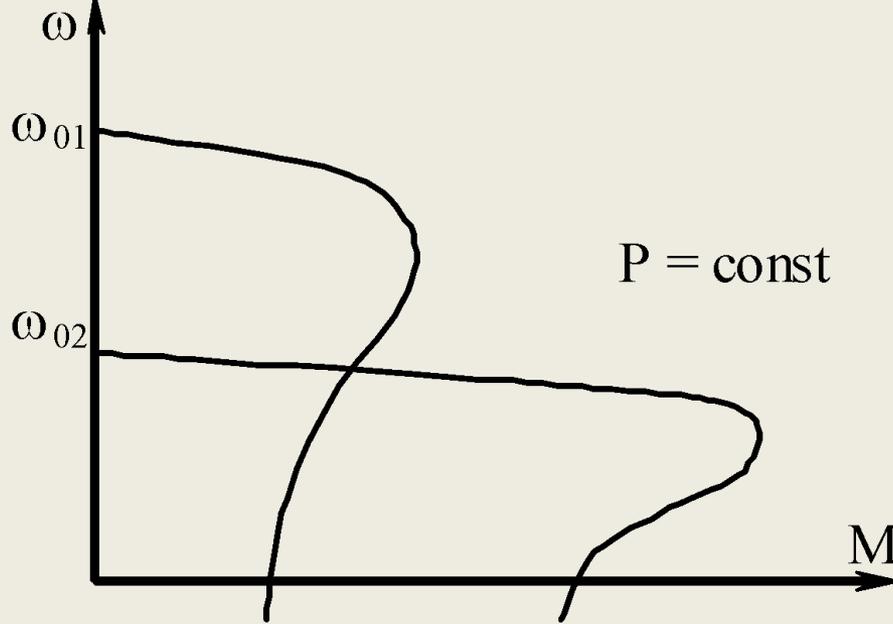


Могут быть различные варианты переключения. Однако соотношение скоростей при этом составляет 2 : 1.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя $M \equiv \Phi$, а, в свою очередь, поток обратнопропорционален числу витков обмотки $\Phi \equiv 1/W$.

Различные способы переключения дают разное число витков обмотки в фазе. В зависимости от этого получаются различные характеристики и условия регулирования.





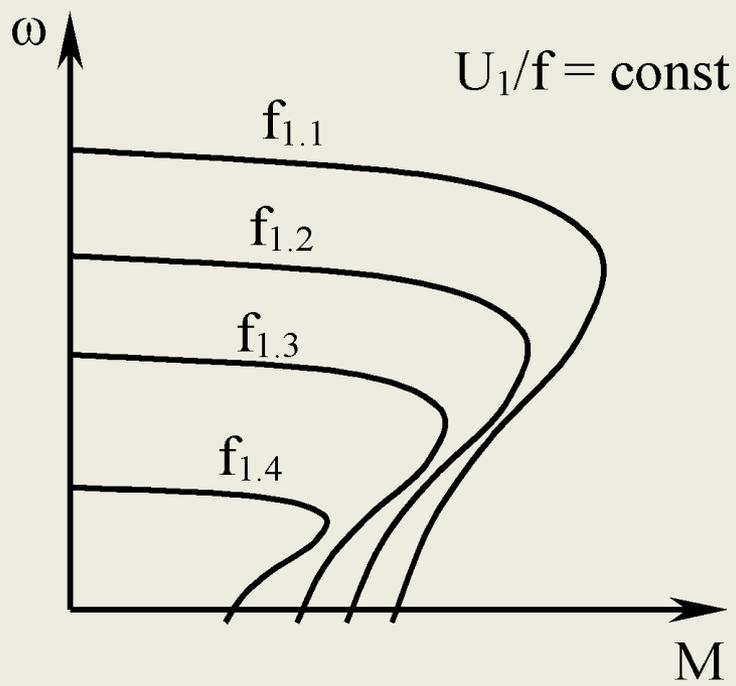
Выпускает промышленность максимум 4^х скоростные АД. В них укладывается две независимые обмотки, каждая из которых имеет две скорости максимум 6 : 1 (3000 : 500 об/мин).

Частотное регулирование

При регулировании частоты питающего напряжения надо иметь ввиду следующее:

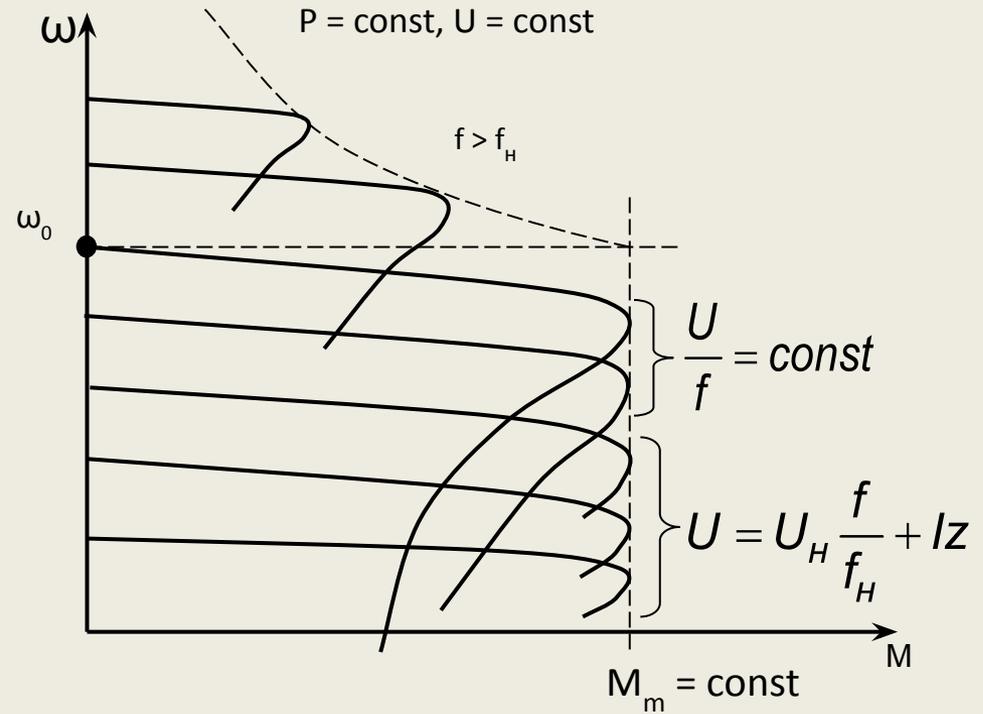
$$U_1 \approx E_1 \equiv k\Phi f_1 \quad \text{или} \quad \Phi \cong \frac{U_1}{kf_1}.$$

Если при $U_1 = \text{const}$ уменьшать f_1 , то увеличение потока приведет к насыщению стали машины и резкому увеличению тока намагничивания. Результат – нагрев машины. Если увеличить частоту, то поток уменьшится и снизится крутящий момент двигателя. Для наилучшего использования АД и получения необходимых свойств ЭП применяются различные законы регулирования.



Максимальный момент снижается за счет падения напряжения в обмотках.

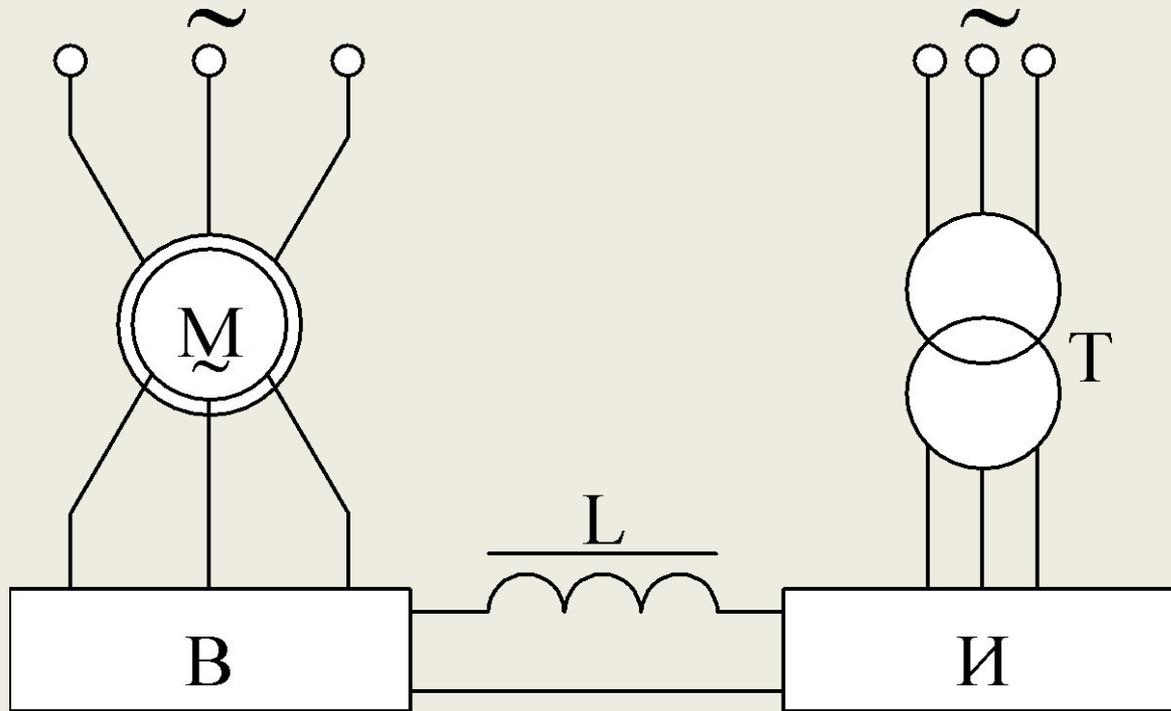
Способ регулирования считается экономичным с плавным регулированием, весьма эффективным, но требующий дорогого оборудования – преобразователя частоты (ПЧ).



Каскадные системы

Каскадные электроприводы позволяют полезно использовать энергию скольжения АД, повышая при этом эффективность электропривода.

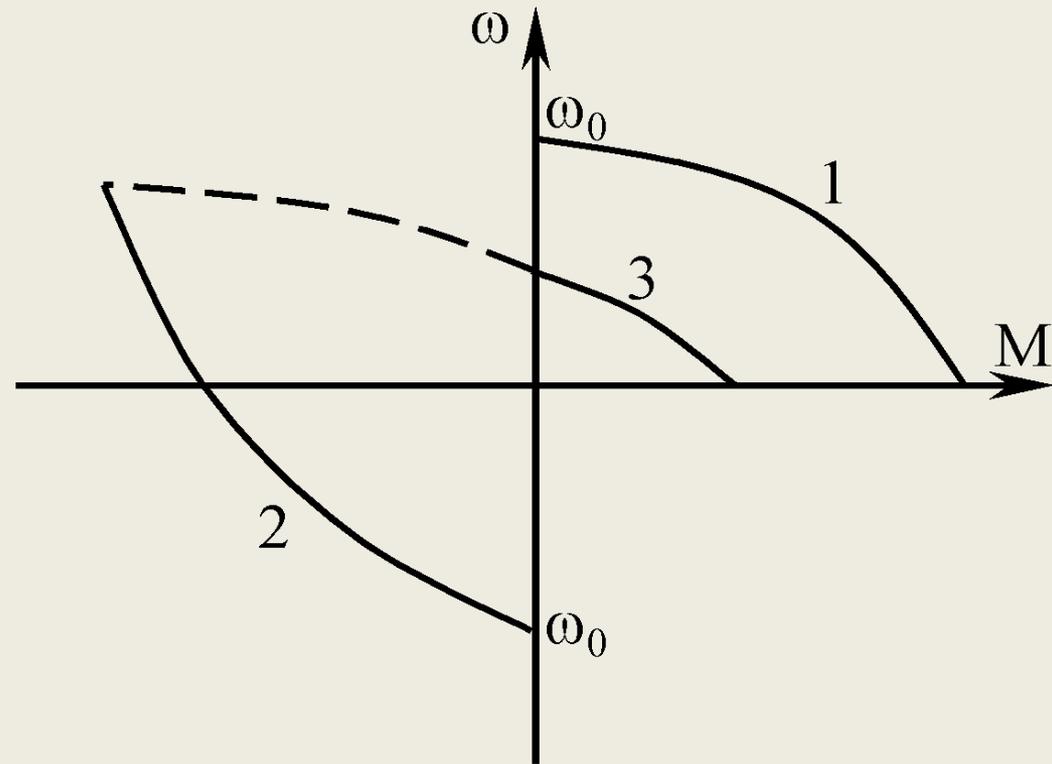
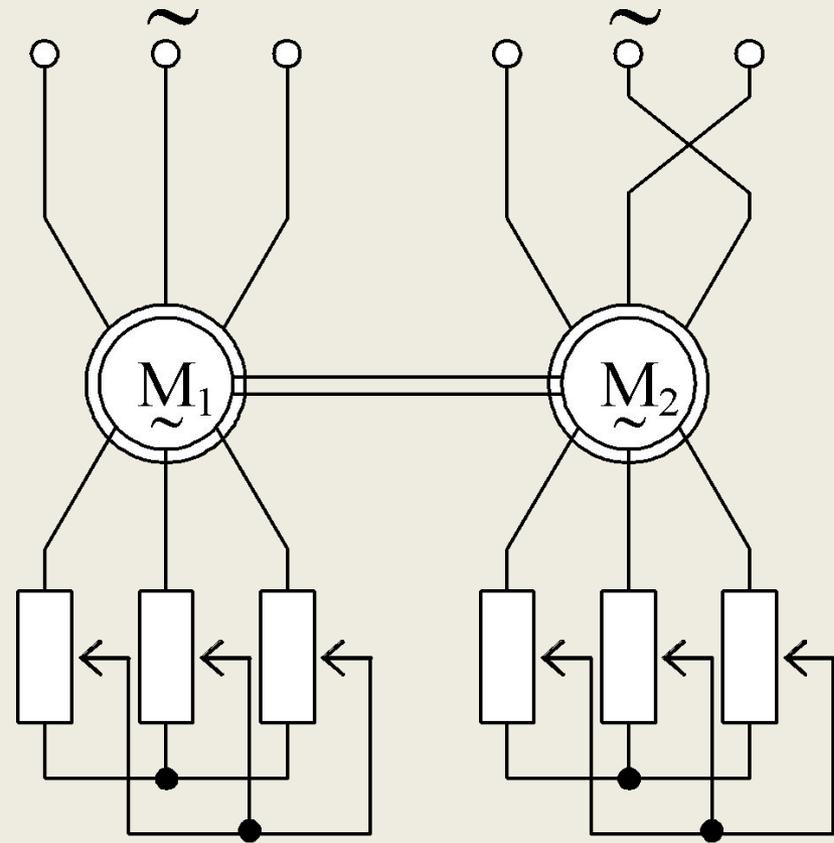
Принципиальная схема одного из примеров каскада, так называемого асинхронно-вентильным (АВК), приведен на рисунке.



М – АД с ФР;
В – выпрямитель;
И – инвертор;
Т – трансформатор
согласующий;
L – реактор для
сглаживания
выпрямленного тока.

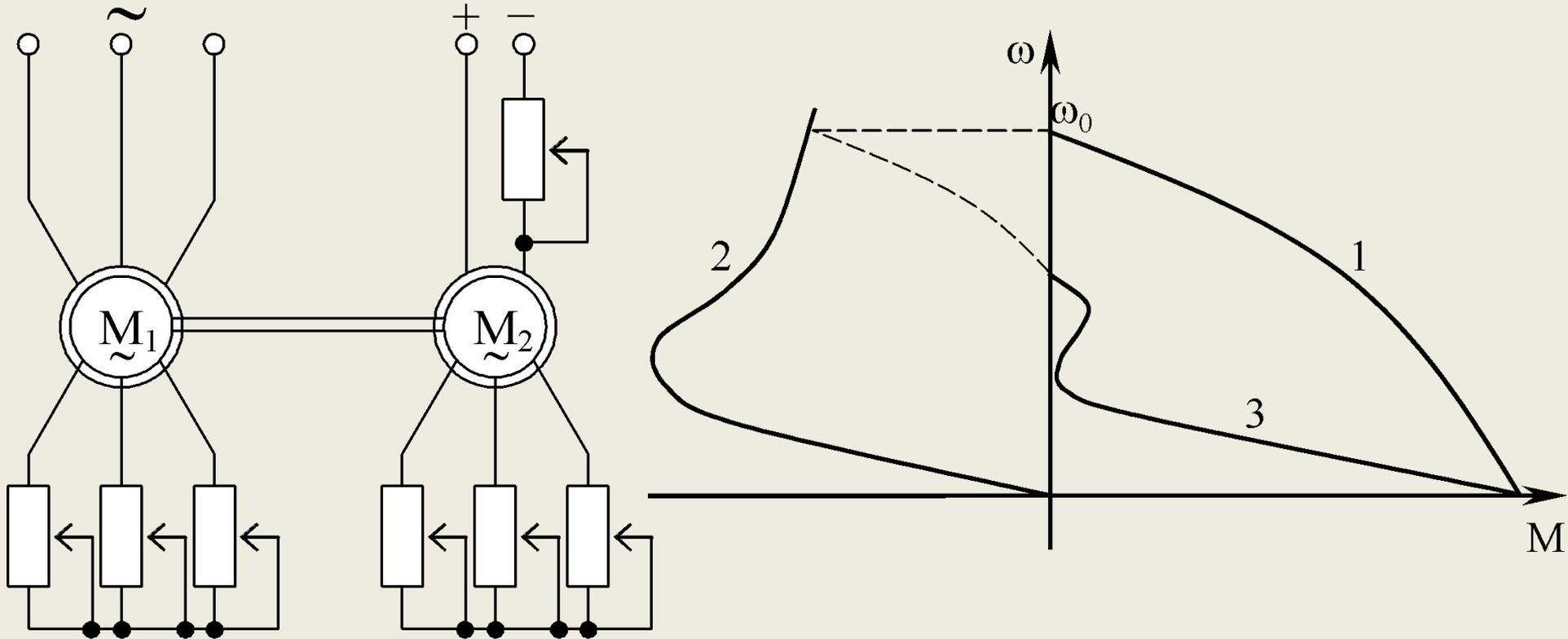
В данном случае часть мощности скольжения возвращается в ту же сеть.

Пример двухдвигательного привода, обеспечивающего устойчивую работу при низких скоростях.



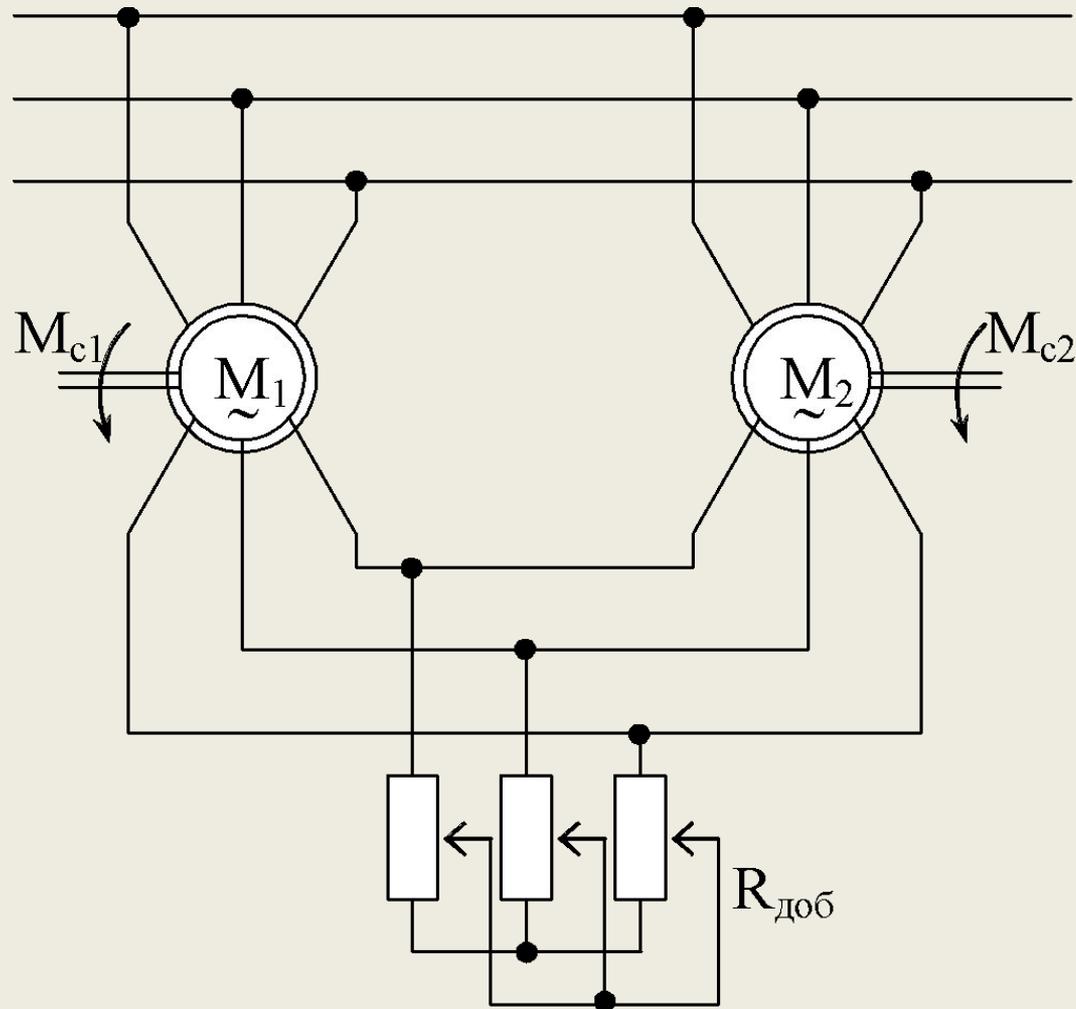
Здесь M_1 работает в режиме двигателя, M_2 – в режиме противовключения. Их валы жестко связаны. Получаем суммарную характеристику 3.

Другой пример, когда одна из машин работает в режиме динамического торможения.



Коэффициент полезного действия в таком режиме невелик, работа привода на пониженной угловой скорости должна быть ограничена по времени.

Рассмотрим пример рабочего электрического вала.



Статоры M_1 и M_2 включены на одну сеть, фазные роторы включены встречно и параллельно им включены регулируемые резисторы. При $R_{\text{доб}} = 0$ электрический вал превращается в обычные независимые АД. Если $R_{\text{доб}} = \infty$, то электрические машины работают в режиме сельсинной передачи угла. Если нагрузки на двигателях одинаковые, то двигатели вращаются одинаково. Если окажется нагрузка разной, то в роторной цепи появится уравнительный ток, который будет подгружать двигатель с меньшей нагрузкой и разгружать – с большей.

Переходные режимы в ЭП

Общие положения

Переходным или динамическим режимом ЭП называется режим работы при переходе из одного установившегося состояния привода к другому, происходящему во время пуска, торможения, реверсирования и резкого изменения нагрузки на валу.

Эти режимы характеризуются изменениями E , ω , M и I .

Изучение переходных режимов электропривода имеет большое практическое значение.

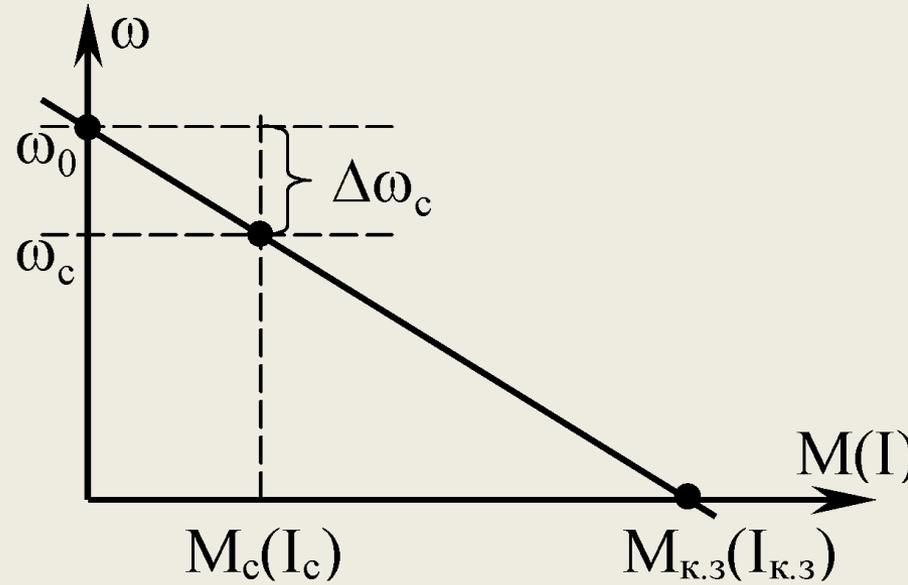
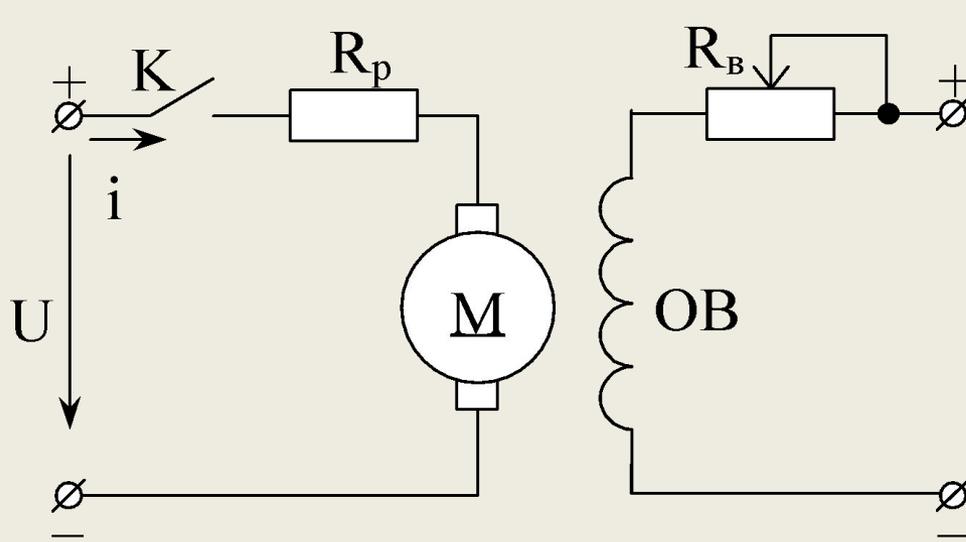
Результаты их расчетов позволяют правильно определить мощность электродвигателей и аппаратуры, рассчитать систему управления и оценить влияние работы ЭП на производительность и качество работы производственных механизмов.

Учитывая, что тепловые процессы обладают значительной инерцией, то считают их не влияющими на переходный процесс. Тогда уделяется внимание механическим и электромагнитным факторам, т. е. процесс носит название электромеханического. Иногда магнитные процессы не соизмеримы по времени с механическими, тогда в расчете учитываются только механическая инерция движущихся масс ЭП.

В результате анализа переходных процессов появляется необходимость построить зависимости:

$$i = f_1(t); \quad M = f_2(t); \quad \omega = f_3(t); \quad l = f_4(t).$$

Пуск ДПТ независимого возбуждения



Допустим: $\Phi = \text{const}$; $U = \text{const}$; $M_c = \text{const}$; $L_a = 0$;
 $R = R_p + r_a$.

$$\begin{cases} U = c\omega + iR; \\ M = ci = J \frac{d\omega}{dt} + M_c \end{cases}$$

Решая эту систему получим:

$$\frac{U}{c} = \omega + \frac{JR}{c^2} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{M_c R}{c^2}$$

или

$$\omega_0 = \omega + T_M \cdot \frac{d\omega}{dt} + \Delta\omega_c,$$

где

$$T_M = \frac{JR}{c^2} = \frac{J\omega_c}{M_{к.з}}$$

электромеханическая постоянная времени привода.

Решим дифференциальное уравнение с правой частью

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{T_M} = \frac{\omega_c}{T_M}; \quad \omega_0 - \Delta\omega_c = \omega_c.$$

В общем виде решение следующее

$$\omega = \omega_c + Ce^{-t/T_M},$$

где C – постоянная интегрирования, находится из условия:

$$\text{при } t = 0 \rightarrow \omega = \omega_{\text{нач.}}$$

Характер изменения скорости подчиняется закону экспоненты. Теоретически переходный процесс длится бесконечно. На практике он считается оконченным при достижении скорости $0,95 \div 0,98$ от установившегося значения, а это соответствует

$$t_{\pi} = (3 \div 4)T_{\text{м}}.$$

Решая аналогично систему (26) только относительно тока или момента, мы получим следующие уравнения:

$$i = I_{\text{с}} + (I_{\text{нач}} - I_{\text{с}})e^{-t/T_{\text{м}}};$$

$$M = M_{\text{с}} + (M_{\text{нач}} - M_{\text{с}})e^{-t/T_{\text{м}}};$$

$$n = n_{\text{с}} + (n_{\text{нач}} - n_{\text{с}})e^{-t/T_{\text{м}}}.$$

Тогда имеем пуск в общем виде:

$$\omega = \omega_c + (\omega_{\text{нач}} - \omega_c)e^{-t/T_M}.$$

Частные случаи:

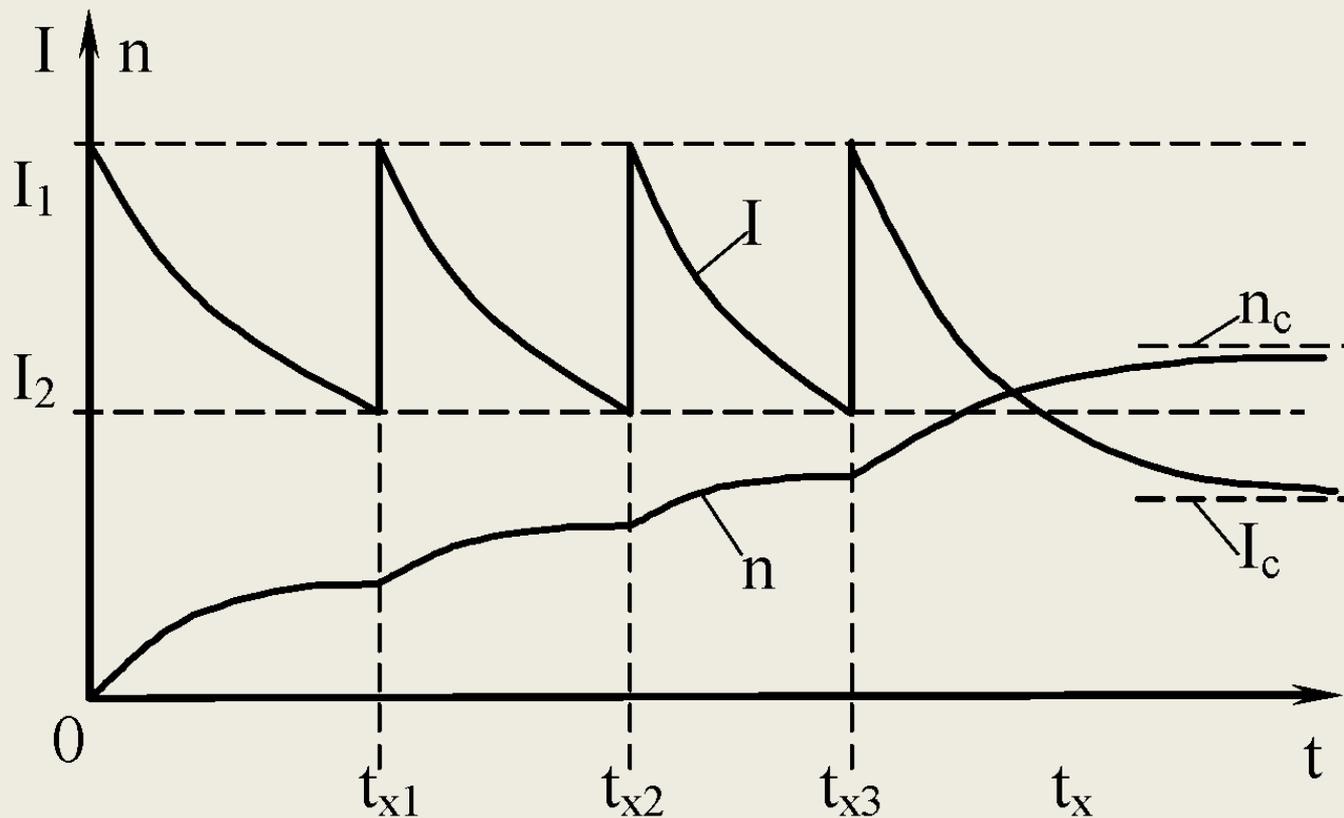
– пуск двигателя при $\omega_{\text{нач}} = 0$ и $M_c \neq 0$

$$\omega = \omega_c(1 - e^{-t/T_M});$$

– пуск двигателя при $\omega_{\text{нач}} = 0$ и $M_c = 0$

$$\omega = \omega_0(1 - e^{-t/T_M}).$$

Рассмотрим процесс пуска во времени



$I_1 = (2 \div 2,5) I_H$ — максимальный пусковой ток;

$I_2 = (1,15 \div 1,25) I_H$ — минимальный пусковой ток или ток переключения.

Тогда $I_2 = I_c + (I_1 - I_c)e^{-t_x/T_{MX}},$

отсюда $t_x = T_{MX} \ln \frac{I_1 - I_c}{I_2 - I_c},$

где $T_{MX} = J \frac{R_x}{C^2},$

x – ступень пуска;

R_x – сопротивление цепи якоря на этой ступени;

T_{MX} – электромеханическая постоянная на x -й ступени.

$$t_{x1} > t_{x2} > t_{x3}; \quad t_x = (3 \div 4) T_M.$$

Расчет мощности ЭП

Общие положения

Правильный выбор двигателя по мощности очень важен. Применение двигателя с заниженной мощностью может вызвать нарушение в работе механизма, снижение производительности, аварию и выход его из строя. Использование же двигателя завышенной мощности приводит к увеличению капитальных затрат, снижению электрических показателей, уменьшению КПД и т. д.

Кроме того необходимо еще правильно выбрать двигатель по исполнению, т. е. по степени защиты, по способу охлаждения и по климатическому исполнению. Это все учитывают конкретные условия эксплуатации ЭП.

Для выбора мощности двигателя важно иметь графическое изображение зависимости момента сопротивления от времени называемая нагрузочной диаграммой механизма. Или зависимость скорости исполнительного механизма от времени, называемая диаграммой скорости электропривода.

Очень часто приведенные графические зависимости носят случайный характер. Тогда для них определяются общепринятые статистические характеристики, которые учитываются при уточнении мощности электродвигателей.

Потери энергии в ЭП

При управлении ЭП возникают потери в электродвигателях, которые разделяют на постоянные и переменные.

В общем случае можно записать, что суммарные потери в двигателе

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_k + \Delta P_v,$$

где ΔP_k — постоянные потери; ΔP_v — переменные потери.

Для МПТ:
$$\Delta P_v = I^2 R;$$

$$\Delta P_v = M(\omega_0 - \omega) = M\omega_0 \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = P_{\text{эм}} \frac{\Delta\omega}{\omega_0}.$$

Для АД:
$$\Delta P_v = 3(I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2');$$

$$\Delta P_v = M\omega_0 s \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) = P_{\text{эм}} s \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right).$$

Особое значение имеют потери в переходных режимах. Имеет смысл находить потери энергии за время переходного процесса, в виде:

$$\Delta A_{п.п} = \int_0^{t_{п.п.}} \Delta P_{\Sigma}(t) dt = \int_0^{t_{п.п.}} (\Delta P_k + \Delta P_v)(t) dt.$$

Так как постоянные потери в переходных процессах по сравнению с переменными малы, то ими можно пренебречь.

$$\text{Тогда для МПТ: } \Delta A_{п.п} = \int_0^{t_{п.п.}} M(\omega_0 - \omega) dt.$$

Если двигатель запускается в холостую ($M_c = 0$), то из уравнения движения следует: $dt = J \frac{d\omega}{M}$ тогда

$$\Delta A_{п.0} = \int_0^{\omega_0} J(\omega_0 - \omega) d\omega \quad \text{или} \quad \Delta A_{п.0} = J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

Пуск двигателя в холостую связан с потерями в нем, равными запасенной кинетической энергии приводом. Полезная работа так же равна запасу кинетической энергии, т. е. расход электрической энергии из сети равен:

$$A_{\text{эл}} = \Delta A_{\text{п.о}} + A_{\text{п.о}} = J\omega_0^2.$$

При пуске двигателя под нагрузкой ($M_c = \text{const}$) потери энергии составят:

$$\Delta A_{\text{пп}} = \int_0^{t_{\text{п.п}}} M(\omega_0 - \omega) dt = \int_0^{t_{\text{п.п}}} \left(M_c + J \frac{d\omega}{dt} \right) (\omega_0 - \omega) dt.$$

Решая выражение (33), получим

$$\Delta A_{\text{п.п}} = J \left(\omega_0 \omega_c - \frac{\omega_c^2}{2} \right) + M_c \left(\omega_0 t_{\text{п}} - \int_0^{t_{\text{п.п}}} \omega_c dt \right),$$

где $\Delta A_{\text{подин}} = J \left(\omega_0 \omega_c - \frac{\omega_c^2}{2} \right) \approx J \frac{\omega_0^2}{2}$ — потери на разгон инерционных масс;

$$\Delta A_{\text{п.с}} = M_c \left(\omega_0 t_{\text{п.п}} - \int_0^{t_{\text{п.п}}} \omega dt \right) - \text{потери, выз-}$$

ванные наличием момента нагрузки.

Проводя аналогичный анализ различных переходных процессов можно дать ряд рекомендаций по более эффективному использованию электропривода:

1. При пуске в холостую ($M_c = 0$) меньше потерь.
2. Торможение противовключением при $M_c = 0$ сопровождается потерями $\Delta A_{\text{т.п.}} \cong 3 \Delta A_{\text{п.дин}}$
3. Торможение противовключением при $M_c \neq 0$ потери меньше.
4. Реверсирование при $M_c = 0$ дает потери $\Delta A_{\text{р.п.}} \cong 4 \Delta A_{\text{п.дин}}$.
5. В АМ потери в роторе и статоре перераспределяются в зависимости от соотношения R_1/R'_2 .

Общие рекомендации по снижению потерь:

1. Снизить величину J – двухякорные машины; два двигателя и т. д.
2. Ступенчатое регулирование подводимого напряжения

$$\Delta A'_{\Pi} = \Delta A_{\Pi} \frac{m+1}{2m},$$

где m – число ступеней регулирования.

$$\text{При } m \rightarrow \infty \quad \Delta A'_{\Pi} \rightarrow 0,5 \Delta A_{\Pi}.$$

3. Осуществлять запуск многоскоростного двигателя начиная с низкой скорости.
4. Лучше вынести потери из статора в роторную цепь согласно выражения:

$$\Delta A_{\Pi} = J \frac{\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R'_2 + R'_p} \right).$$

5.3. Классы изоляции

Потери энергии в электродвигателе вызывают нагрев его отдельных элементов. Допустимый нагрев двигателя определяется нагревостойкостью применяемых изоляционных материалов.

Чем больше нагревостойкость, тем при той же мощности меньше размеры двигателя или при тех же размерах можно увеличить его мощность.

Лучшему использованию двигателя способствует так же более совершенная система охлаждения.

Изоляционные материалы, применяемые в электрических машинах, делятся на следующие основные классы нагревостойкости:

изоляция класса	A	$v_{д} \leq 105^{\circ}\text{C};$
изоляция класса	E	$v_{д} \leq 120^{\circ}\text{C};$
изоляция класса	B	$v_{д} \leq 130^{\circ}\text{C};$
изоляция класса	F	$v_{д} \leq 155^{\circ}\text{C};$
изоляция класса	H	$v_{д} \leq 180^{\circ}\text{C};$
изоляция класса	C	$v_{д} > 180^{\circ}\text{C}.$

Соблюдение установленных ограничений по допустимой температуре нагрева обеспечивает срок службы изоляции электрических машин 15÷20 лет.

Превышение допустимых ограничений ведет к разрушению изоляции обмоток и резкому сокращению срока эксплуатации двигателя.

Так, для изоляции класса А превышение допустимой температуры на $8 - 10^\circ \text{C}$ сокращает срок службы вдвое.

Расчетная температура окружающей среды в нормальных условиях принимается $t_{oc} = 40^\circ \text{C}$.

Обычно речь идет о превышении температуры обмоток над температурой окружающей среды:

$$\tau = t - t_{oc}. \quad (35)$$

5.4. Нагревание и охлаждение двигателя

Для упрощения анализа тепловых процессов в электродвигателях принимаются следующие допущения:

- 1) двигатель рассматривается как однородное тело с одинаковой температурой во всех его точках;
- 2) теплоотдача во внешнюю среду пропорциональна первой степени разности температур двигателя и окружающей среды;
- 3) температура охлаждающей среды постоянна;
- 4) теплоемкость двигателя, мощность тепловых потерь и теплоотдача не зависят от температуры двигателя.

На основе этих допущений составим уравнение **теплового баланса** двигателя при неизменной нагрузке:

$$Qdt = A\tau dt + Cdt,$$

где Q – количество теплоты, выделяемое двигателем
в единицу времени, Дж/с;

A – теплоотдача двигателя, Дж / (с · °С);

C – теплоемкость двигателя, Дж / °С;

Qdt – все тепло, выделяемое в двигателе;

Cdt – тепло, идущее на нагрев самого двигателя;

$A\tau dt$ – тепло, отдаваемое двигателем в окружающую среду.

Разделим уравнение на $A\tau dt$ и получим:

$$\frac{Q}{A} = \tau + \frac{C}{A} \frac{d\tau}{dt} \quad \text{или} \quad \tau_y = \tau + T_H \frac{d\tau}{dt},$$

где $\frac{Q}{A} = \tau_y$ – установившееся (конечное) значение превышения температуры;

$T_H = \frac{C}{A}$ – постоянная времени нагрева двигателя –

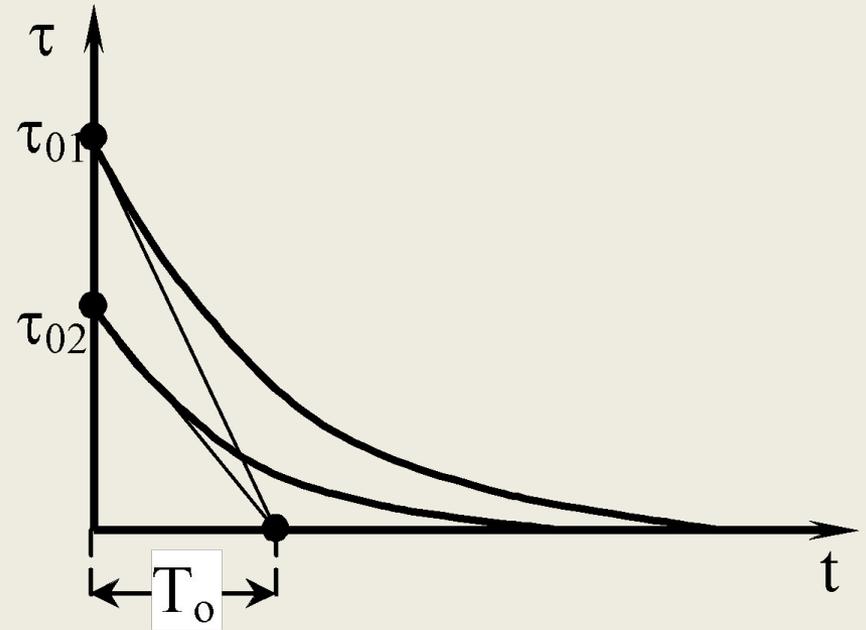
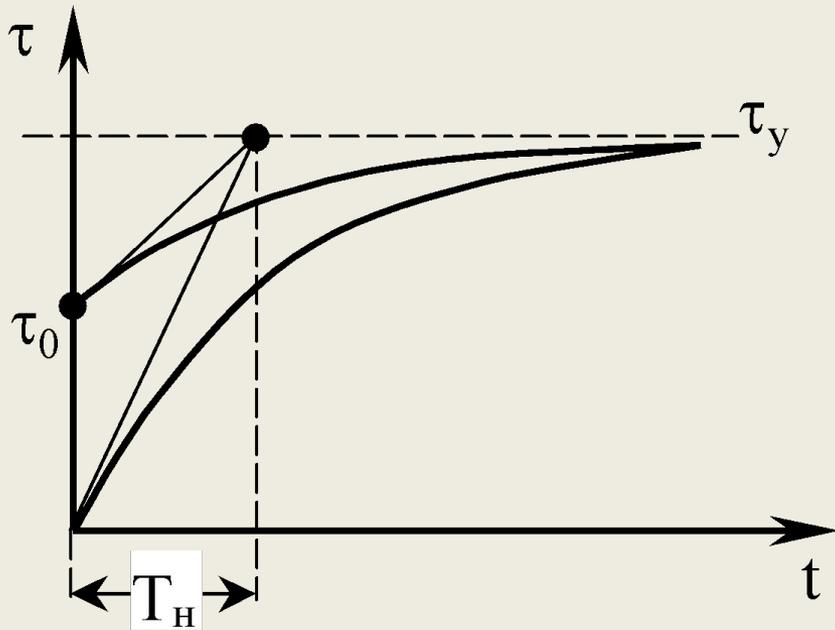
время, в течение которого превышение температуры от $\tau = 0$ достигло бы τ_y без отдачи тепла в окружающую среду.

Решением уравнения (37) является:

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-t/T_H} \right) + \tau_0 \cdot e^{-t/T_H},$$

где τ_0 – начальное превышение температуры.

Если $\tau_0 = 0$, то $\tau = \tau_y \left(1 - e^{-t/T_H} \right)$.



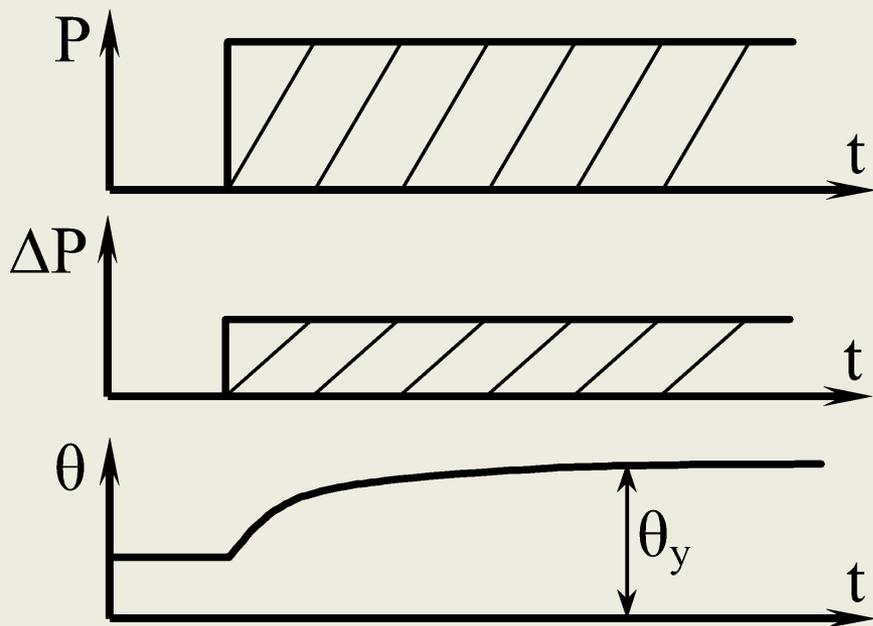
Процесс нагревания или охлаждения можно считать окончанным через $(3 \div 4) T_H$ или $(3 \div 4) T_o$.

5.5. Режимы работы ЭП

Различные условия работы производственных механизмов обуславливают различные режимы работы электроприводов, которые классифицируются на восемь режимов с условным обозначением от S1 до S8.

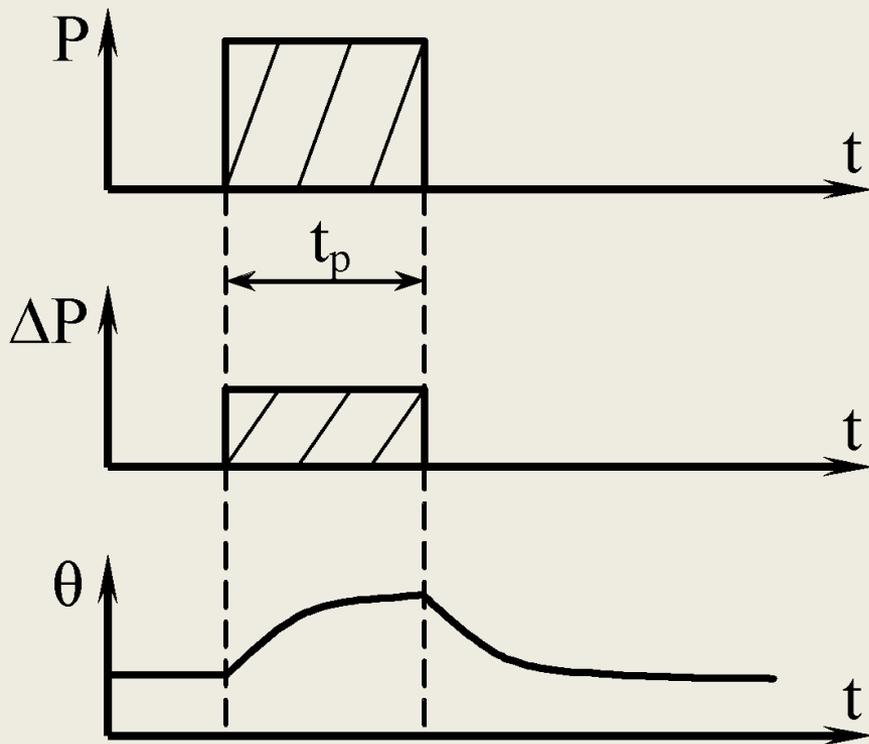
Рассмотрим с вами только три основных, остальные получаются соответствующим сочетанием основных.

S1 – продолжительный номинальный режим работы.



При длительном режиме работы P двигатель достигает установившегося значения температуры θ_y , обусловленного потерями ΔP в этом двигателе.

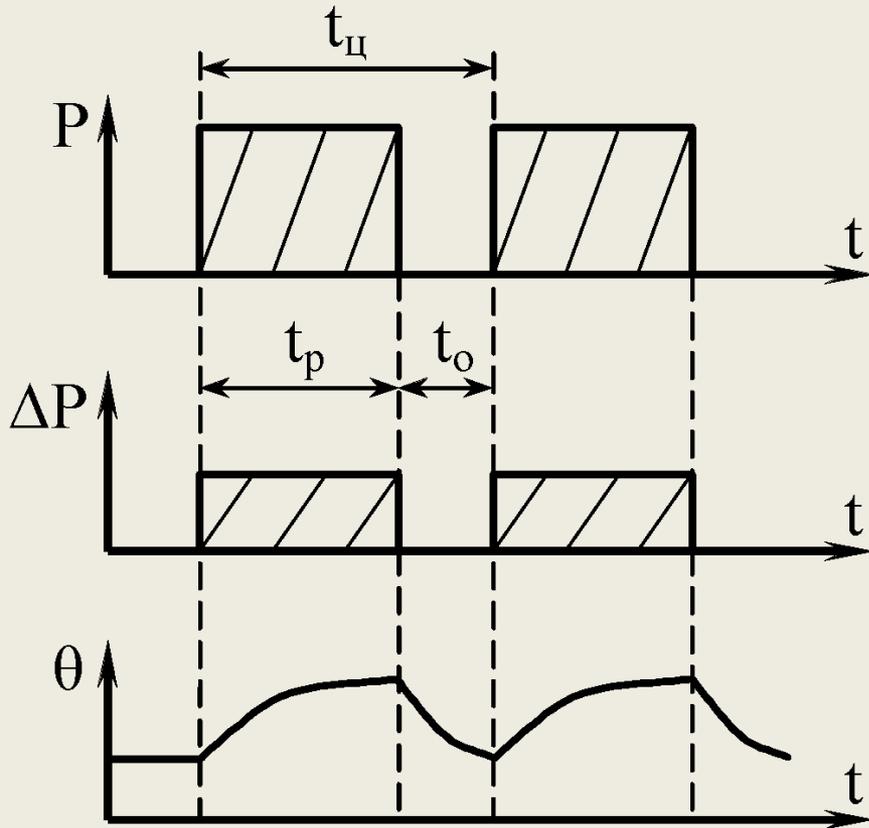
S2 – кратковременный режим работы –



это такой режим, при котором за время включенного состояния t_p двигатель не успевает нагреться до установившегося значения температуры θ_y , а за время отключенного состояния он успевает охладиться до окружающей среды.

Приняты следующие стандартные продолжительности включения 10, 30, 60 и 90 мин.

S3 – повторно-кратковременный режим работы –



это такой режим работы, когда за время включенного состояния t_p двигатель не успевает нагреться до θ_y , а за время отключенного состояния t_o он не успевает охладиться до окружающей среды. При этом цикл $t_{\text{ц}} = t_p + t_o$ не должен превышать 10 мин.

Вводится понятие коэффициента повторного включения

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_p + t_o} \cdot 100\% = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} \cdot 100\%.$$

Существуют стандартные значения ПВ = 15, 25, 40 и 60%.

5.6. Расчет мощности двигателя при продолжительном режиме работы (S1).

Для правильного расчета мощности двигателя необходимо знать нагрузочную диаграмму, представляющую зависимости: $P = f(t)$; $M = f(t)$ или $I = f(t)$. Если выбрать двигатель завышенной мощности, то это приведет к завышенным капитальным затратам, мощность двигателя будет не использована, а работать он будет с пониженным η и коэффициентом мощности. Заниженная мощность приведет к превышению допустимой температуры нагрева, т. е. к сокращению срока службы изоляции.

Продолжительный режим может быть двух видов:

а) при постоянной нагрузке.

Тогда двигатель выбирается из каталога по известной нагрузке рабочего механизма при соблюдении условия

$$P_{\text{расч}} \leq P_{\text{кат}} \text{ (запас не более 15 \%)}.$$

б) при переменной нагрузке.

В этих случаях пользуются, чаще всего, методом средних потерь

$$\Delta P_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^m (\Delta P_i t_i / t_{\text{ц}}),$$

где ΔP_i – мощность потерь на i -м интервале; t_i – продолжительность i -го интервала; m – число интервалов в цикле $t_{\text{ц}}$.

Сущность метода заключается в том, что если найденные средние потери $\Delta P_{\text{ср}}$ для выбранного двигателя не больше его номинальных потерь $\Delta P_{\text{ном}}$, т. е. $\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{ном}}$, то будет выполняться условие

$$\tau_{\text{ср}} \leq \tau_{\text{ном}} \leq \tau_{\text{доп}}.$$

Отсюда следует, что

при $\Delta P_{\text{ср}} > \Delta P_{\text{ном}}$, двигатель перегревается;

при $\Delta P_{\text{ср}} < \Delta P_{\text{ном}}$, двигатель недоиспользован.

Так как потери в двигателе $\Delta P = I^2 r$, то можно использовать метод эквивалентных величин. Например, эквивалентный ток

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n I_i^2 \Delta t_i}{t_{\text{ц}}}},$$

тогда двигатель выбирается из условия $I_{\text{э}} \leq I_{\text{ном}}$.

Если соблюдать условие $M = cI$,

то
$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 \Delta T_i}{t_{\text{ц}}}}; \quad \mathbf{M}_{\text{э}} \leq \mathbf{M}_{\text{ном}}.$$

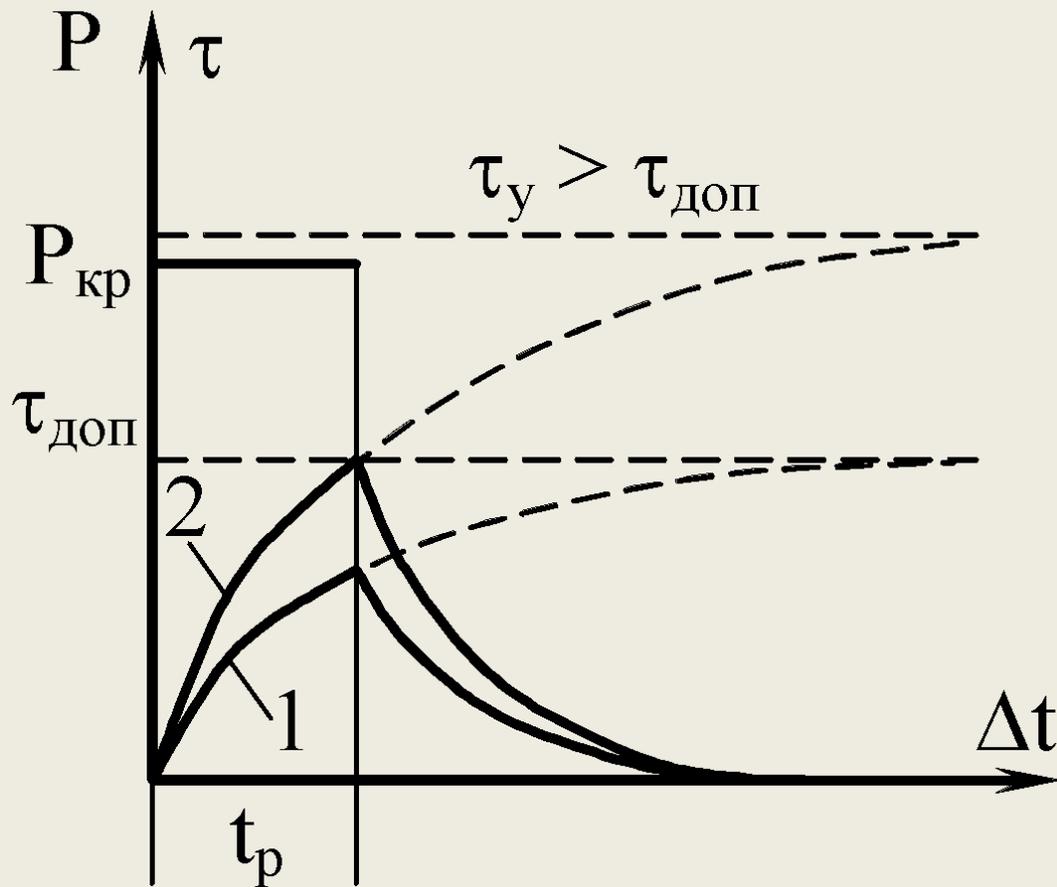
Если соблюдается условие $P = M\omega$ и $\omega = \text{const}$,

то
$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 \Delta t_i}{t_{\text{ц}}}}, \quad \mathbf{P}_{\text{э}} \leq \mathbf{P}_{\text{ном}}.$$

5.7. Расчет мощности двигателя при кратковременном режиме работы

Для кратковременного режима работы выпускаются специальные двигатели, имеющие стандартные мощности для стандартных длительностей работы. Если реальный график отличается от стандартного, то он приводится к стандартному.

Можно для кратковременного режима работы использовать и двигатель общего применения. При этом надо иметь ввиду следующее.



Если $P_{\text{ном}} = P_{\text{кр}}$, то двигатель окажется недоиспользован. Кривая 1. Правильно выбранный двигатель за время работы должен нагреться до $\tau \leq \tau_{\text{доп}}$ (кривая 2).

5.8. Расчет мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме работы

Двигатель выбирается по фактическому коэффициенту повторного включения и необходимой мощности. Если реальный график нагрузки отличается от стандартного, то он приводится к стандартному и уже по нему выбирается из каталога. Приведение производится по выражению

$$P_{\text{СТ}} = P_{\varepsilon} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{СТ}}}}, \quad \text{где} \quad \varepsilon = \frac{t_p}{t_p + t_o}.$$

6. Системы автоматического управления ЭП

6.1. Общие сведения

Управление ЭП заключается в осуществлении пуска, регулирования скорости, торможения, реверсирования, а также поддержания режима работы привода в соответствии с требованиями технологического процесса.

Ручное управление:

низкая производительность;

невозможность дистанционного управления;

в мощных приводах управление затруднено или вообще не возможно.

Автоматическое управление ЭП является одним из основных условий повышения производительности механизмов.

В системе управления ЭП используются: релейно-контактные аппараты; усилители; преобразовательные устройства и датчики; бесконтактные логические элементы; микропроцессоры и микро ЭВМ и т.п.

Различают системы управления:

разомкнутые – изменение возмущающих воздействий приводит к изменению ранее заданного режима работы привода;

замкнутые – независимо от состояния возмущающих воздействий можно поддерживать заданный режим работы привода.

Для обеспечения чтения схем и для их проектирования имеется система условных обозначений.

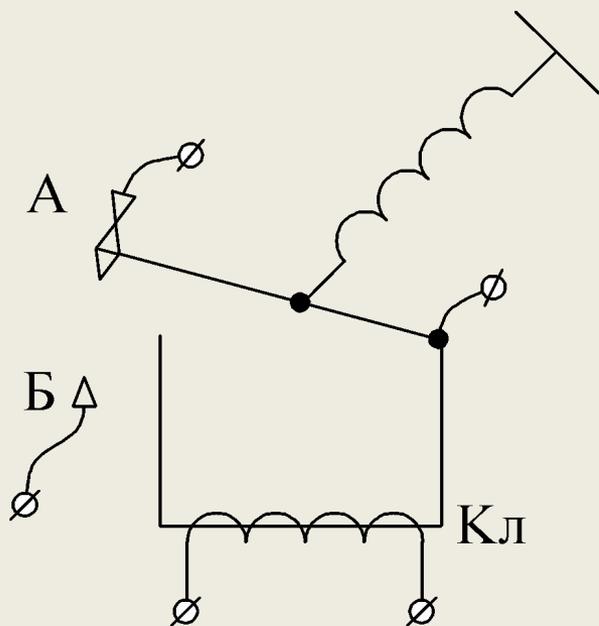
Различают цепи главного тока (силовые цепи), которые изображаются утолщенными линиями. И цепи вспомогательные – это цепи управления. Они изображаются более тонкими линиями.

Два типа схем:

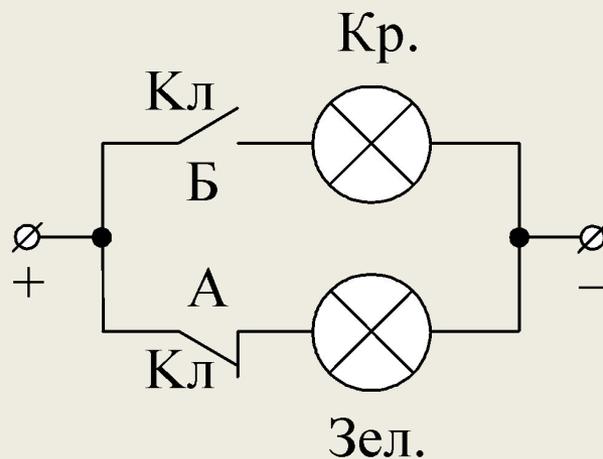
принципиальная схема – содержит изображение элементов всех аппаратов и машин без учета их фактического расположения в пространстве . Такая схема позволяет изучить принцип работы и определить возможные неисправности;

схема соединений (монтажная) – изображается разводка проводов цепей с указанием их сечения, марок и способов их прокладки. При этом учитывается место их фактического расположения.

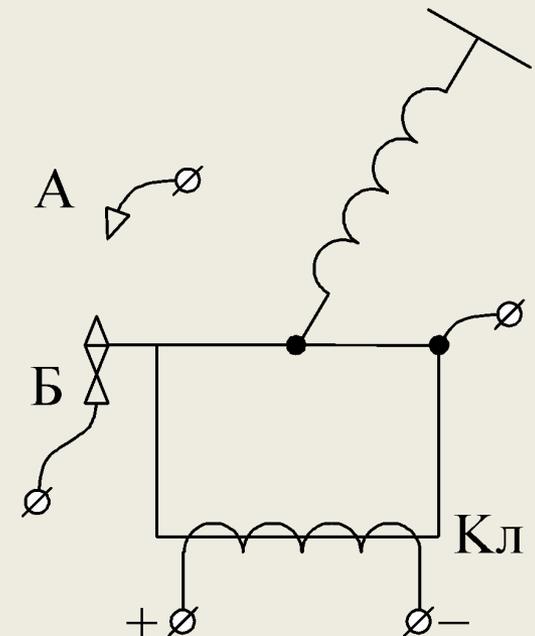
На схемах контакты различных устройств изображаются в положении, которое они занимают при отключенных катушках этих устройств.



а)



б)



в)

Контактор линейный Кл имеет два типа контактов: один замыкающий, другой размыкающий. В случае *а* катушка Кл обесточена, по схеме *б* будет гореть зеленая сигнальная лампа. Если на катушку Кл подать напряжение, то якорь контактора изменит свое положение. Замкнутый контакт разомкнется, а другой соответственно, замкнется. Загорится красная сигнальная лампа, а зеленая погаснет. Это будет обозначать, в данном случае, что контактор включен.

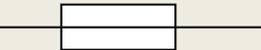
Условные обозначения элементов электрических силовых и вспомогательных цепей, принятых при проектировании и построении электрических схем.

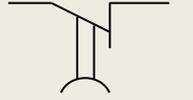
 обмотка компенсационная

 КОНТАКТ замыкающий с замедлителем, действующим при срабатывании

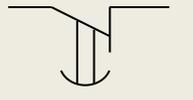
 обмотка параллельного возбуждения МПТ, обмотка независимого возбуждения

 КОНТАКТ замыкающий с замедлителем, действующим при возврате

 предохранитель плавкий

 КОНТАКТ размыкающий с замедлителем, действующим при срабатывании

 резистор постоянный

 КОНТАКТ размыкающий с замедлителем, действующим при возврате

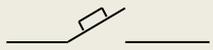
 диод

 контакт замыкающий

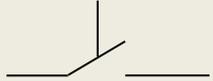
 КОНТАКТ замыкающий, разрывающийся под током, для коммутации силовой цепи

 контакт размыкающий

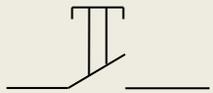
 КОНТАКТ замыкающий дугогасительный для коммутации силовой цепи



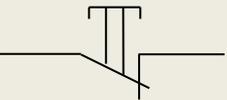
контакт с автоматическим возвратом при перегрузке



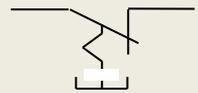
контакт замыкающий с механической связью



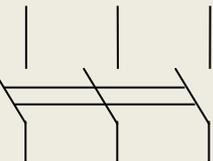
выключатель кнопочный нажимной, с замыкающим контактом



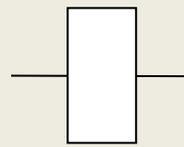
выключатель кнопочный нажимной, с размыкающим контактом



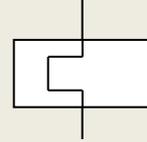
выключатель кнопочный без самовозврата, нажимной с возвратом посредством вторичного нажатия кнопки



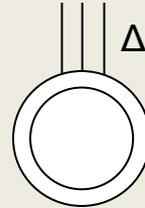
выключатель трехполюсный



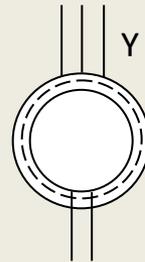
катушка электромеханического устройства



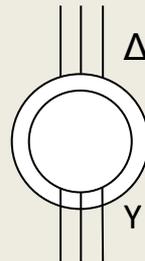
электротепловое реле



двигатель асинхронный трехфазный, соединенный в треугольник, с короткозамкнутым ротором



машина синхронная трехфазная явнополюсная с обмоткой возбуждения и с пусковой короткозамкнутой обмоткой на роторе; обмотка статора соединена в звезду



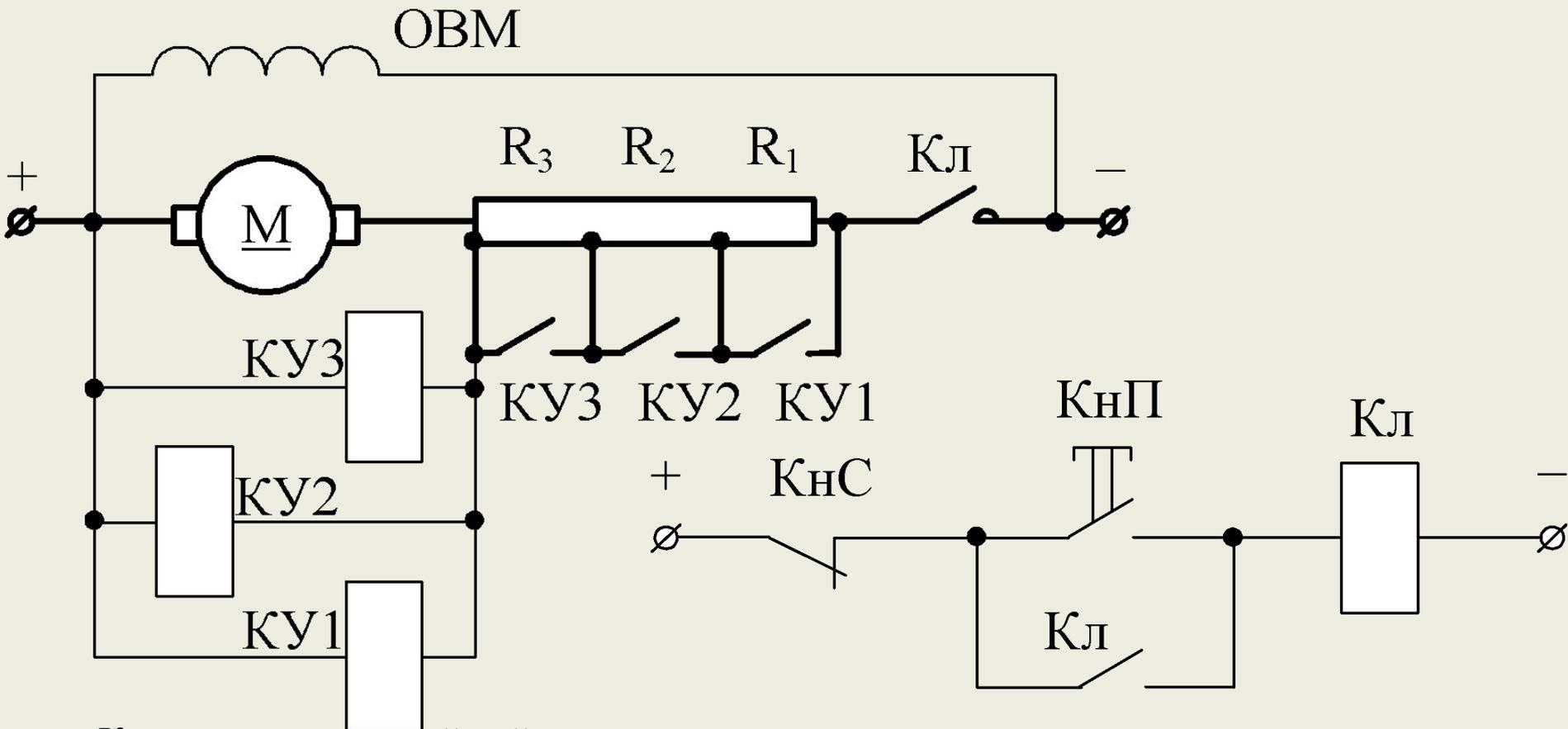
машина асинхронная трехфазная с фазным ротором, обмотка которого соединена в звезду (Y); обмотка статора соединена в треугольник (Δ)

6.2. Управление в функции угловой скорости (ЭДС)

Автоматическое управление двигателем можно осуществить в функции скорости, тока нагрузки и времени. Иногда управление двигателем совершается в функции пути, если рабочий механизм совершает поступательное движение. Рассмотрим типовые узлы релейно-контактного управления пуском двигателей постоянного тока.

Управление в функции угловой скорости требует прибора контроля угловой скорости с последующим воздействием на соответствующий аппарат. Таким прибором может быть тахогенератор, установленный на валу двигателя. Однако это дополнительное оборудование усложняет схему.

Поэтому используют косвенные методы. Например, в МПТ $E = C_e \Phi \omega$. При $\Phi = \text{Const}$ $E \equiv \omega$, измеряя ее мы можем судить о скорости.



Кл – контактор линейный;
 КУ1; КУ2; КУ3 – контакторы ускорения;
 КнС; КнП – кнопки «Стоп» и «Пуск».

К недостатку этого метода пуска двигателя можно отнести то, что двигатель может остаться на реостатной позиции, если по каким-либо причинам возросла во время разгона нагрузка на валу, не предусмотренная расчетами.

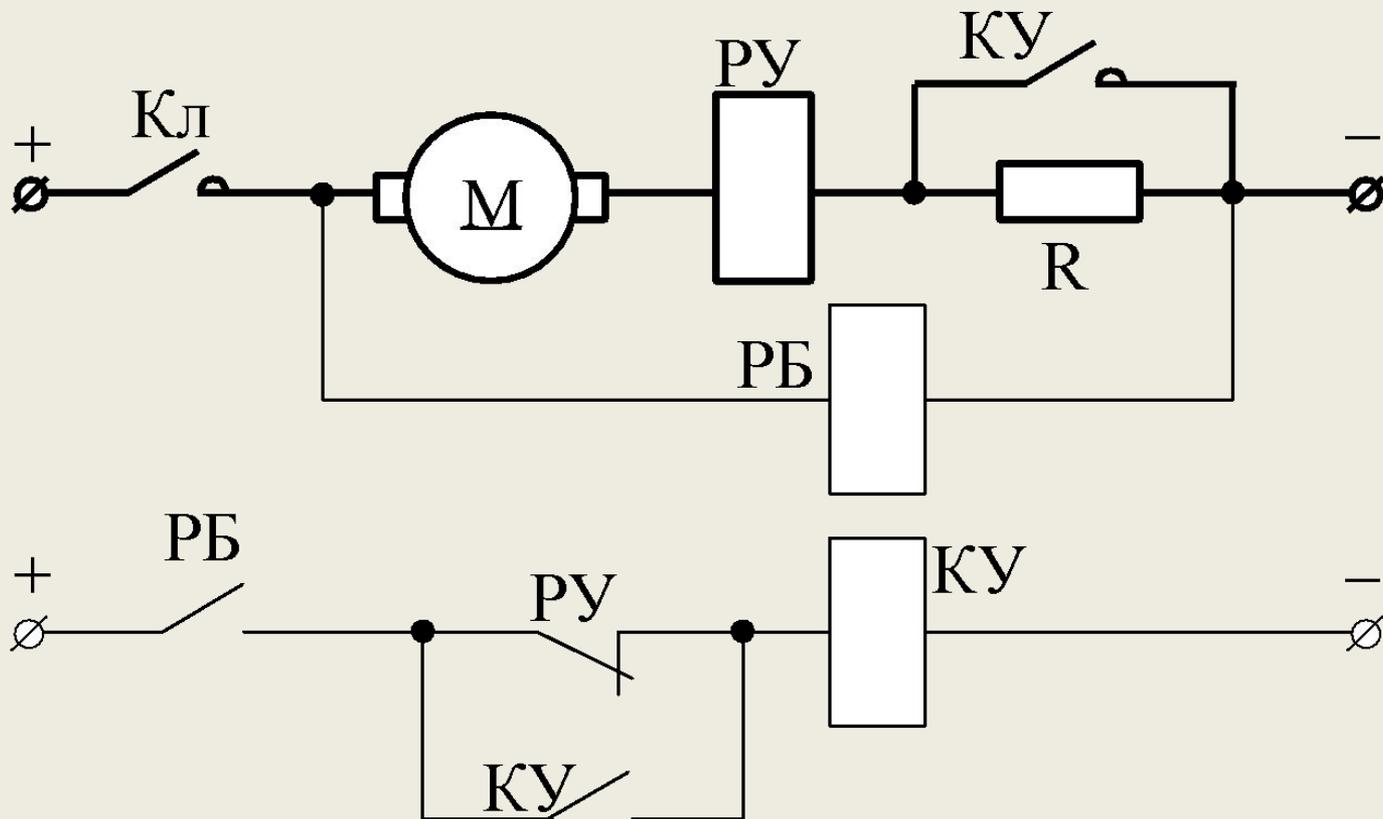
Рассмотрим типовую схему кнопочной станции. Особо следует обратить внимание на контакт Кл, шунтирующий КнП. Кнопка КнП остается включенной в течение времени пока она нажата. Если кнопку отпустить, то под воздействием пружины контакт разомкнется и двигатель будет отключен от сети. При срабатывании линейного контактора его контакт Кл шунтирует КнП и катушка контактора останется под напряжением. Такой прием называется «стать на самоподпитку», этот прием применяется очень широко.

Каждый контактор КУ настроен на срабатывание при различных напряжениях $U_{ку1} < U_{ку2} < U_{ку3}$; т.е. при достижении двигателем определенной скорости ω_1 срабатывает КУ1. Своими контакторами он закорачивает часть пускового сопротивления R1. Дальнейший рост скорости приводит к срабатыванию последовательно КУ2, а затем КУ3. Последний шунтирует оставшуюся часть резистора и двигатель выходит на естественную характеристику. Процесс разгона завершается.

Недостатком этой схемы является то, что требуются контакторы с различным напряжением срабатывания. Этот недостаток устраняется другим способом схемного включения контакторов.
Посмотреть самостоятельно.

6.3. Управление в функции тока

Схема автоматического пуска в функции тока должна предусматривать токовые реле, включенные непосредственно в силовую цепь двигателя. Количество реле зависит от числа ступеней пуска. Рассмотрим схему пуска ДПТ в одну ступень.



РУ – реле токовое, реле ускорения;

КУ – контактор ускорения;

РБ – реле блокировочное, $t_{РБ} > t_{РУ}, t_{КУ}$.

При включении от тока якоря срабатывает РУ и разрывает свои контакты РУ в цепи питания катушки КУ. Двигатель разгоняется при введенном в цепь якоря резисторе R. Контакт РБ не позволяет контактору КУ включиться вместе с подачей напряжения на двигатель, т. к. $t_{РБ} > t_{РУ}, t_{КУ}$. Когда ток опускания реле РУ достигает значения тока переключения I_2 , то контакты РУ замыкают цепь катушки КУ, который срабатывает и шунтирует пусковой резистор R. Контакт в цепи управления КУ шунтирует контакт РУ, что исключает воздействие РУ на повторный бросок тока в цепи якоря.

Достоинство данного принципа управления заключается в том, что все переключения производятся при заданных токах в цепи якоря.

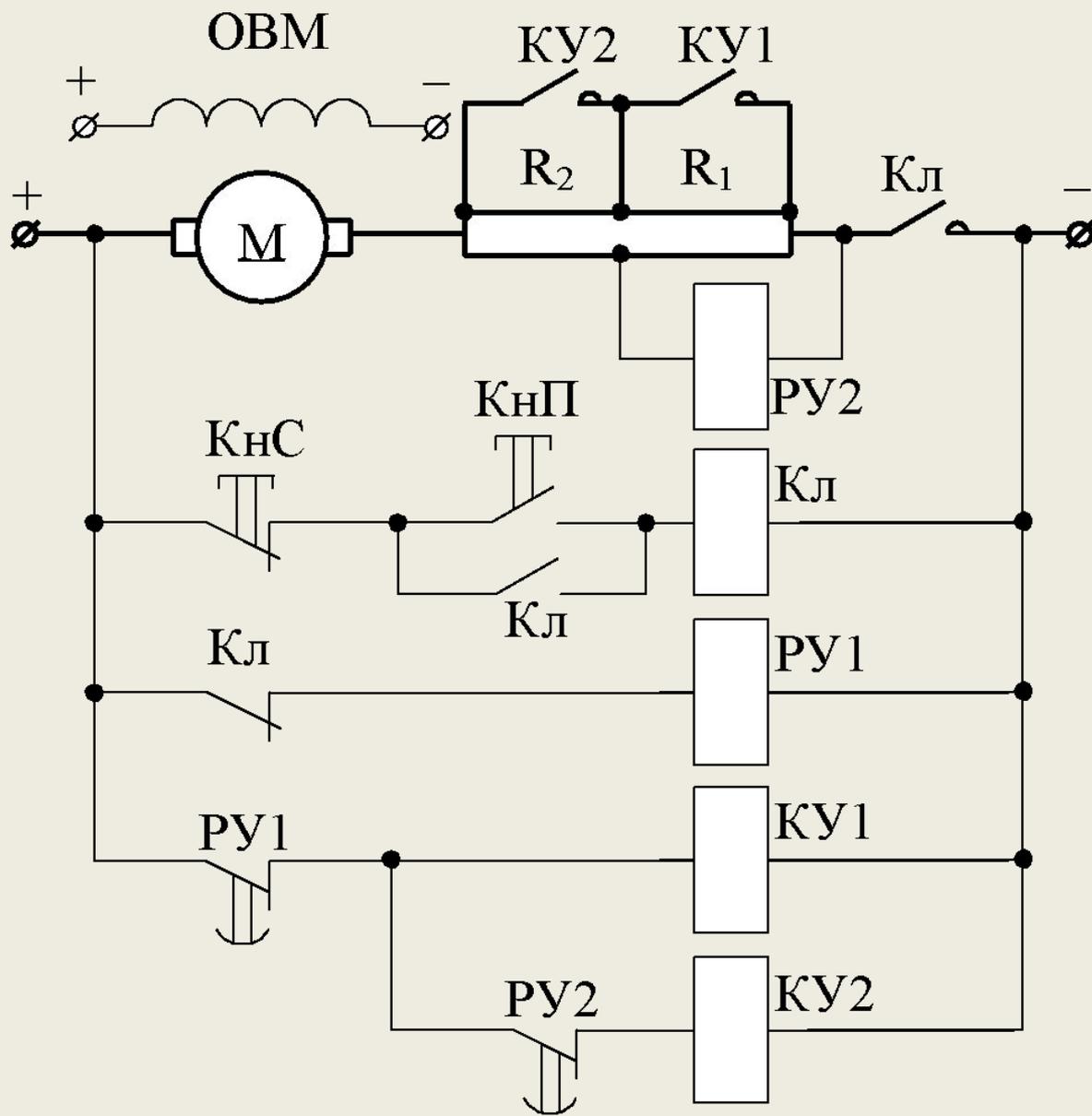
Недостатком такого принципа является то, что в случае повышения нагрузки во время пуска схема может остаться с включенным резистором. Это может привести к выходу его из строя.

6.4. Управление в функции времени

Для автоматизации пуска используются различные реле времени: механические, электромагнитные, электронные, пневматические и т. д. Необходимая выдержка времени каждого реле определяется на основании пусковой диаграммы.

При настройке реле необходимо учитывать время срабатывания контакторов, которое составляет для контакторов постоянного тока $0,1 \div 0,4$ с, а для контакторов переменного тока $0,05 \div 0,07$ с. Принцип работы реле времени необходимо посмотреть.

Рассмотрим следующую схему



Исходная ПОЗИЦИЯ	КНП	t_1	t_2	КНС
-	+	-	-	-
-	+	+	+	-
+	-	-	-	+
-	-	+	+	-
-	-	-	+	-

РУ– реле ускорения, реле времени;
КУ– контактор ускорения.

Пуск двигателя происходит в соответствии с таблицей.

Исходная позиция: получает питание только катушка РУ1 через контакт Кл. Катушки КУ1 и КУ2 питание не получают, т. к. контакт РУ1 разомкнут.

Нажимаем КнП: получает питание катушка Кл, замыкается силовой контакт Кл и Кл, шунтирующий КнП, теряет питание катушка РУ1, получает питание катушка РУ2 за счет прохождения пускового тока по резистору R1, разрывается контакт РУ2.

По истечении времени t_1 , времени срабатывания РУ1: замыкается контакт РУ1, получает питание катушка КУ1, шунтируется резистор R1, катушка РУ2 теряет питание, пошел отсчет времени t_2 .

По истечении времени t_2 , времени срабатывания РУ2: замыкается контакт РУ2, катушка КУ2 получает питание, шунтируется резистор R2, двигатель выходит на естественную характеристику.

Нажатие КнС приводит схему в исходное состояние, двигатель останавливается.

Принцип имеет достоинство в том, что в любом случае двигатель выйдет на естественный режим. Однако, превышение нагрузки может привести к превышению пускового тока, от этого существует соответствующая защита.

6.5. Типовые узлы схем управления торможением ДПТ

Чаще всего в автоматизированных установках используются режимы динамического торможения и противовключения. Ниже приведены схемы с использованием изложенных ранее принципов управления.