

РОЛЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА В СОВРЕМЕННЫХ

Электродвигатель — главный потребитель электрической энергии.

МАШИННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Создание современных электроприводов базируется на использовании новейших достижений силовой электротехники, механики, автоматики, микроэлектроники и компьютерной техники. Это быстро развивающиеся области науки, что определяет высокую динамичность развития электромеханических систем.

Структура электропривода

Электродвигательное устройство — это электрический двигатель, преобразующий электрическую энергию в механическую — электромеханический преобразователь энергии. Двигатели могут быть различными по виду создаваемого ими движения: вращательного, линейного, шагового, вибрационные и др. Большинство используемых электродвигателей — это машины вращательного движения.

Для передачи движения от электродвигателя к рабочему органу машины служит механическое передаточное устройство: редуктор, трансмиссия, ременная передача, канатная передача, кривошипно—шатунный механизм, передача винт-гайка и др. (см. рис. 1.1).

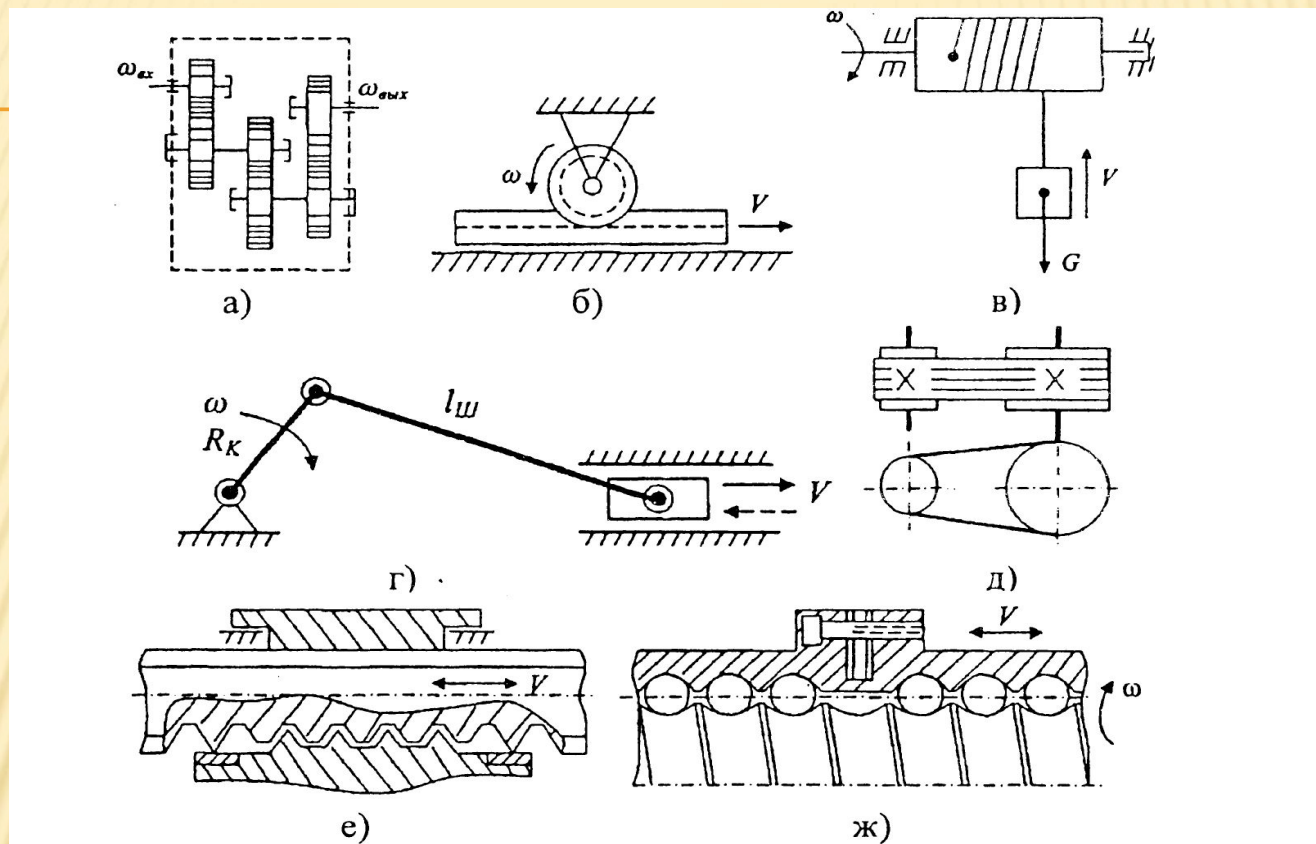


Рис. 1 .1. Механические передаточные устройства: а — редуктор; б — зубчато-реечная передача; в - барабанно-канатная передача; г — кривошипно-шатунный механизм; д — ременная передача; е — винтовая передача; ж — шарико-винтовая передача

Преобразовательное устройство — это преобразователь электрической энергии. Эти устройства применяются в ~~регулируемом электроприводе для целенаправленного и~~ экономичного изменения параметров движения электропривода: скорости, развиваемого момента и др.

Электрическое преобразовательное устройство обычно представляет собой преобразователь, выполненный на силовых полупроводниковых приборах: неуправляемых (диоды) и управляемых (тиристоры, запираемые тиристоры, биполярные транзисторы с изолированным входом — IGB и другие).

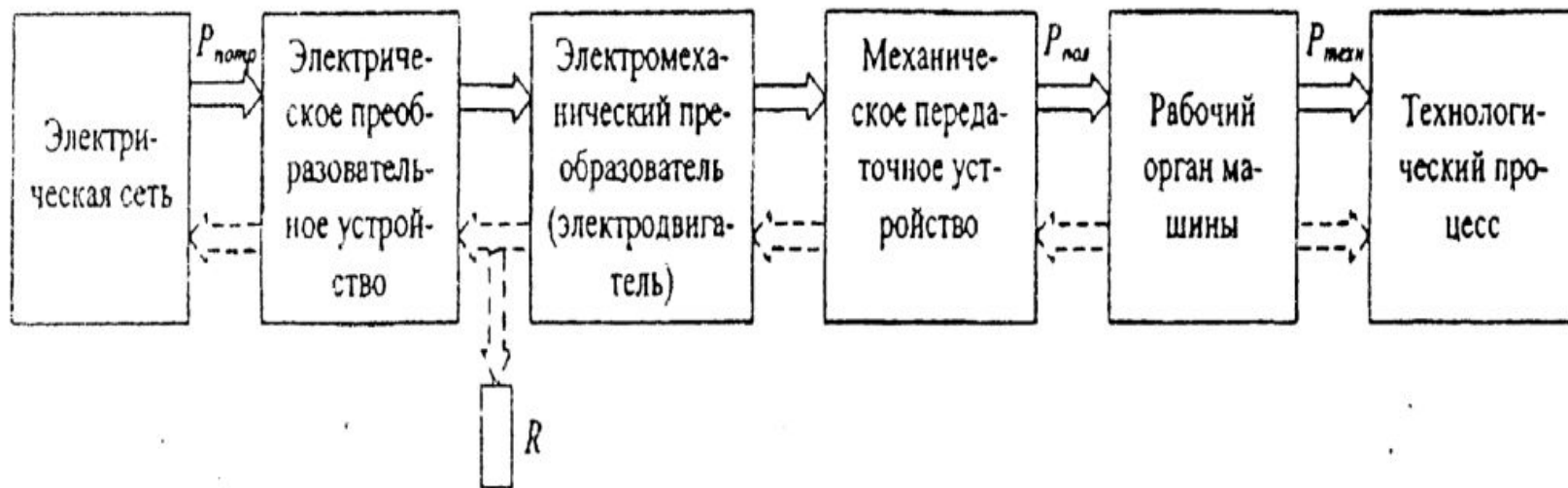


Рис.1.2. Структура силового канала электропривода

Важнейшей функцией электропривода является управление преобразованной механической энергией, т.е. управление технологическим процессом. Его реализует входящее в состав электропривода информационно-управляющее устройство. Общая структура электропривода показана на рис. 1.3. Здесь пунктирной линией обведены элементы системы, входящие в состав электропривода и образующие силовой и информационный каналы электропривода.

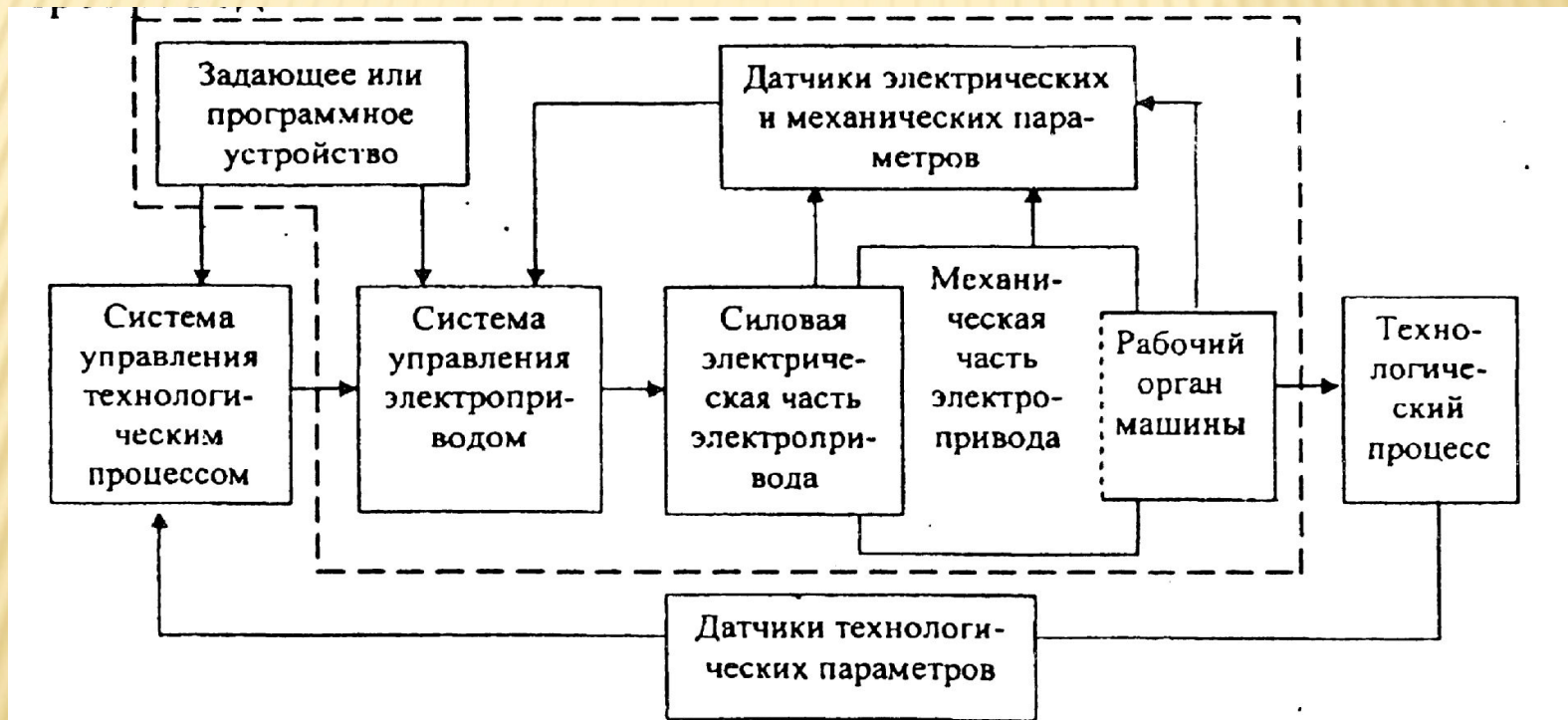


Рис. 1.3. Структура автоматизированной электромеханической системы

Информационно-управляющее устройство состоит из аппаратов управления и защиты, осуществляющих включение, пуск, останов электропривода и защиту от аварийных и аномальных режимов работы, а также из электронных и микропроцессорных устройств управления и датчиков технологических, механических и электрических параметров, характеризующих работу электропривода. Совокупность информационных и управляющих устройств образует информационный канал электропривода, предназначенный для управления параметрами (координатами) электропривода в соответствии с требованиями технологического процесса. Важной функцией системы управления является также осуществление технологического процесса с минимальными затратами электрической энергии.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Классификационный признак	Классификационные градации
По числу рабочих органов, приводимым электроприводом	1. Индивидуальный 2. Многодвигательный 3. Групповой
По виду движения электродвигателя	1. Вращательного движения 2. Линейный 3. Многокоординатного движения
По способу соединения двигателя с рабочим органом	1. Редукторный 2. Безредукторный 3. Конструктивно-интегрированный
По регулируемости	1. Нерегулируемый 2. Регулируемый
По основному контролируемому параметру	1. Регулируемый по моменту 2. Регулируемый по скорости 3. Регулируемый по положению
По виду управления	1. С ручным управлением 2. С полуавтоматическим управлением 3. С замкнутой САР скорости с ручным заданием или с заданием от системы управления технологическим процессом 4. С замкнутой САР положения, обеспечивающей точное позиционирование 5. С программным управлением 6. Следящий

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ И РАБОЧЕГО МЕХАНИЗМА

Поступательное движение			Вращательное движение		
Величина	Обозначение	Размерность	Величина	Обозначение	Размерность
Путь	S	м	Угол поворота	φ	Рад
Скорость	$V=dS/dt$	м/с	Угловая скорость (Частота вращения)	$\omega=d\varphi/dt$	Рад/с; 1/с
Ускорение	$a=dV/dt=d^2S/dt^2$	м/с ²	Угловое ускорение	$\varepsilon=d\omega/dt=d^2\varphi/dt^2$	Рад/с ² ; 1/с ²
Сила	F	Н	Момент	M	Н·м
Масса	m	кг	Момент инерции	J	кг·м ²

Изменение величин, характеризующих движение рабочих органов машины, происходит при воздействии на их кинематическую цепь (механическую часть) сил F . Для вращательного движения физическим аналогом силы является момент M . Момент создается силой, приложенной к плечу (плечо — кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы), например, к радиусу барабана грузоподъемной лебедки (рис.2.1,а); или парой сил, возникающих в электродвигателях вращательного движения (рис.2.1,б) $M = FR$.

Электрический двигатель вращательного движения является источником момента.

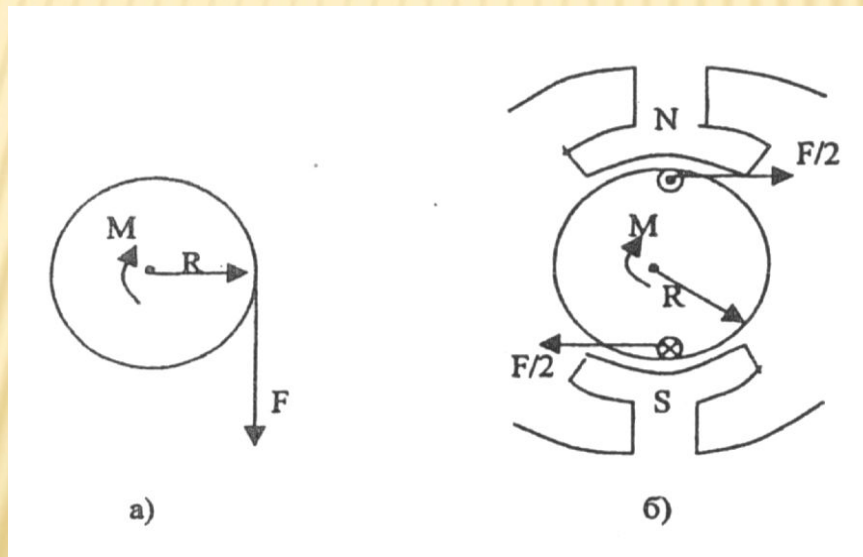


Рис.2.1. Формирование крутящего момента

Взаимосвязь момента, развиваемого двигателем, и скорости вращения $M = f(\omega)$ определяет механические характеристики электропривода (электродвигателя). Механические характеристики изображаются в поле координат $M - \omega$.

Оси координат разделяют поле на четыре квадранта (рис.2.2). В первом квадранте изображаются механические характеристики при работе двигателя в двигательном режиме и положительном направлении скорости его вращения, во втором — при работе в тормозных режимах. В третьем квадранте будут размещаться механические характеристики двигателя при работе в двигательном режиме, но с отрицательным направлением скорости вращения. В четвертом квадранте — механические характеристики двигателя при работе в тормозном режиме и отрицательном направлении скорости вращения. Обычно пользуются представлением механических характеристик в первых двух квадрантах.



Рис.2.2. Поле координат М-
о

На рис.2.4 показаны естественные механические характеристики основных видов электродвигателей вращательного движения:

- 1 — двигателя постоянного тока независимого возбуждения; его механическая характеристика имеет высокую жесткость, постоянную во всех точках;
- 2 двигателя постоянного тока последовательного возбуждения; жесткость его механической характеристики не постоянна, она мала при малых нагрузках и повышается по мере возрастания момента;
- 3 — асинхронного двигателя; его механическая характеристика имеет две явно выраженные части: рабочую - с высокой постоянной отрицательной жесткостью и криволинейную часть с переменной положительной жесткостью; вторая часть характеристики используется только во время пуска двигателя;
- 4 — синхронного двигателя; он имеет абсолютно жесткую механическую характеристику, параллельную оси абсцисс.

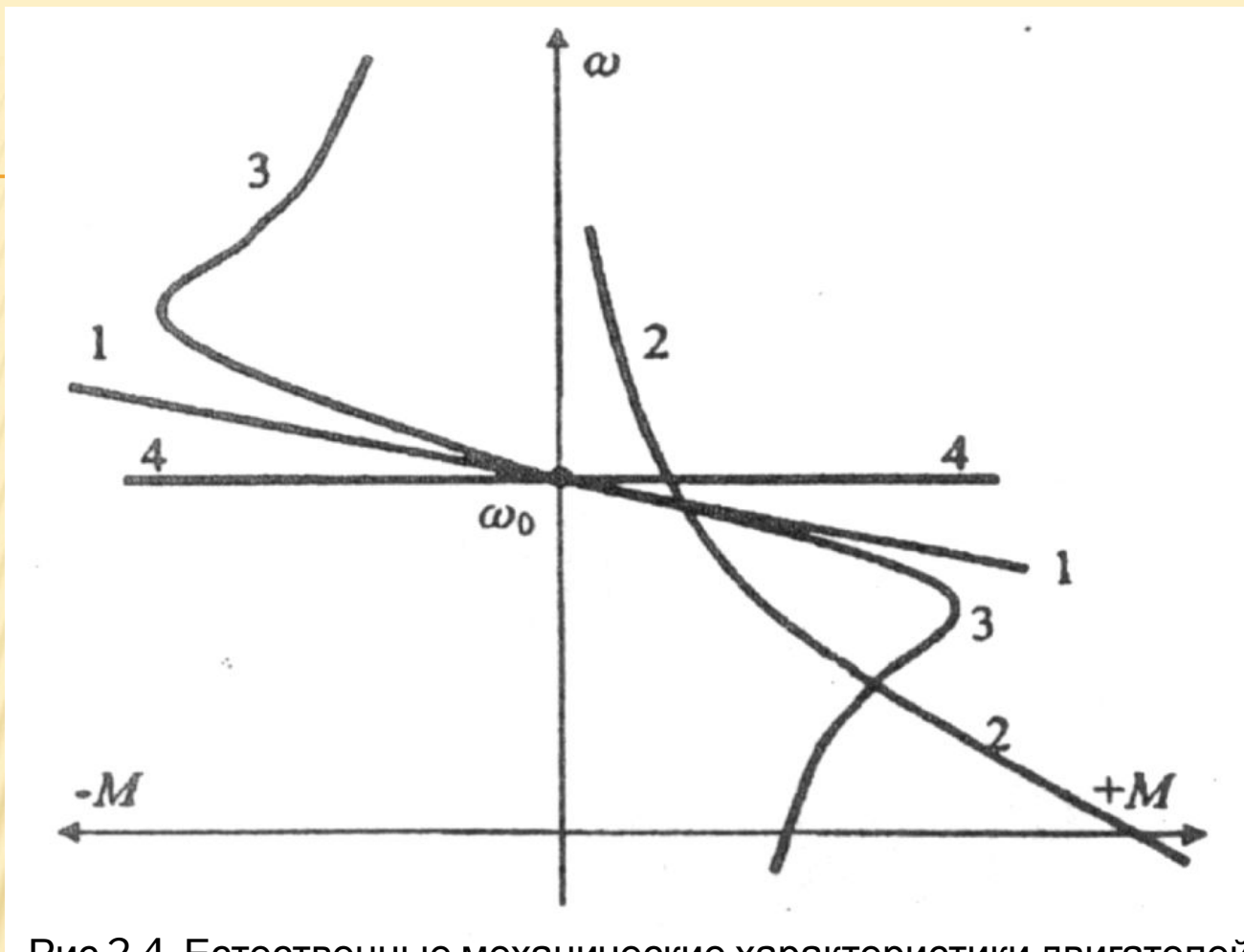


Рис.2.4. Естественные механические характеристики двигателей:

1 - постоянного тока независимого возбуждения; 2 - постоянного тока последовательного возбуждения; 3 - асинхронного; 4 – синхронного дополнительных элементов.

Приведенные на рисунке 2.4. характеристики называют естественными механическими характеристиками. Такие характеристики соответствуют типовой схеме включения, номинальному напряжению и частоте питания и отсутствию в цепях обмоток двигателя дополнительных элементов.

Момент сопротивления движению M , создаваемый на рабочем органе машины, также может являться функцией скорости.

Зависимость момента сопротивления на валу рабочей машины от скорости $M = f(\omega)$ (M_c и ω приведены к валу двигателя) называют механической характеристикой рабочей машины. Ее обычно в I квадранте координатного поля $M - \omega$

На рис.2.5 показаны механические характеристики некоторых рабочих машин. Характеристика 1 соответствует машинам с рабочим органом резания; если толщина снимаемого резцом слоя постоянна, то момент сопротивления такой машины не зависит от скорости. Характеристика 2 отвечает условиям работы машин, где момент сопротивления определяется, главным образом, силами трения (транспортёры, конвейеры и др. машины). В этом случае момент сопротивления также не зависит от скорости механизма, однако, при пуске механизма момент, создаваемый силами трения покоя, может существенно превышать момент сил трения при движении.

На рис.2.5 показаны механические характеристики некоторых рабочих машин. Характеристика 1 соответствует машинам с рабочим органом резания; если толщина снимаемого резцом слоя постоянна, то момент сопротивления такой машины не зависит от скорости. Характеристика 2 отвечает условиям работы машин, где момент сопротивления определяется, главным образом, силами трения (транспортёры, конвейеры и др. машины). В этом случае момент сопротивления также не зависит от скорости механизма, однако, при пуске механизма момент, создаваемый силами трения покоя, может существенно превышать момент сил трения при движении.

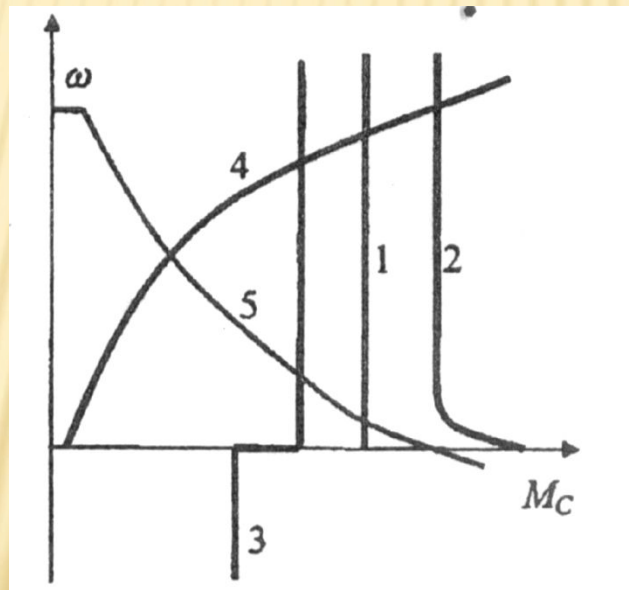


Рис.2.5. Зависимость моментов сопротивления движению от скорости
для некоторых рабочих машин

Характеристика 3 относится к грузоподъемным механизмам, где момент сопротивления движению создается, главным образом, силой тяжести. Особенностью данной характеристики является то, что момент при подъеме груза несколько превышает момент сопротивления при спуске груза (характеристика 3), что связано с учетом механических потерь в передачах.

Для турбомеханизмов (центробежных и осевых насосов, вентиляторов и компрессоров) момент на валу механизма существенно зависит от скорости характеристика 4. Для вентиляторов эта зависимость носит квадратичный характер

$$M_c = K\omega^2.$$

Характеристикой 5, близкой к гиперболе, обладают намоточные устройства и другие машины, для которых технологически необходима работа с постоянством мощности.

УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

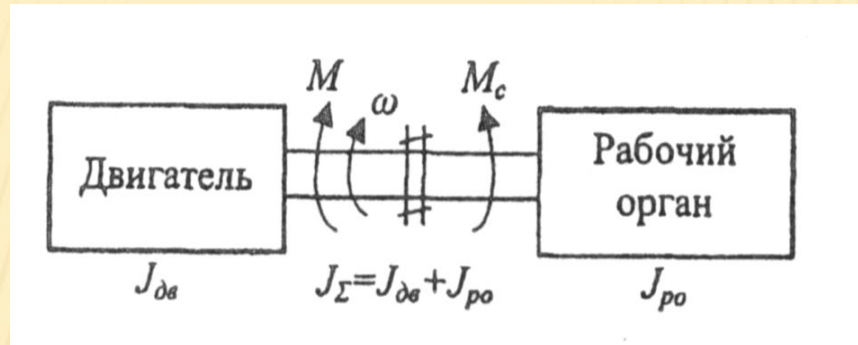


Рис.2.7. Моменты, прикладываемые к механической системе с одной фиксированной осью вращения

Если момент, развиваемый электродвигателем, равен моменту сопротивления движению.

$$M = M_c \quad \text{или} \quad M - M_c = 0 \quad (2.1.)$$

то механическая система будет совершать движение с постоянной (установившейся) угловой скоростью или находиться в состоянии покоя ($\omega=0$).

Для поступательного движения условие установившегося режима формулируется как $dV / dt = 0$, если $\sum F = 0$, т.е. если сумма векторов сил, приложенных к механической системе, равна нулю, то система будет двигаться с постоянной установившейся скоростью $V_{уст}$ или находиться в состоянии покоя.

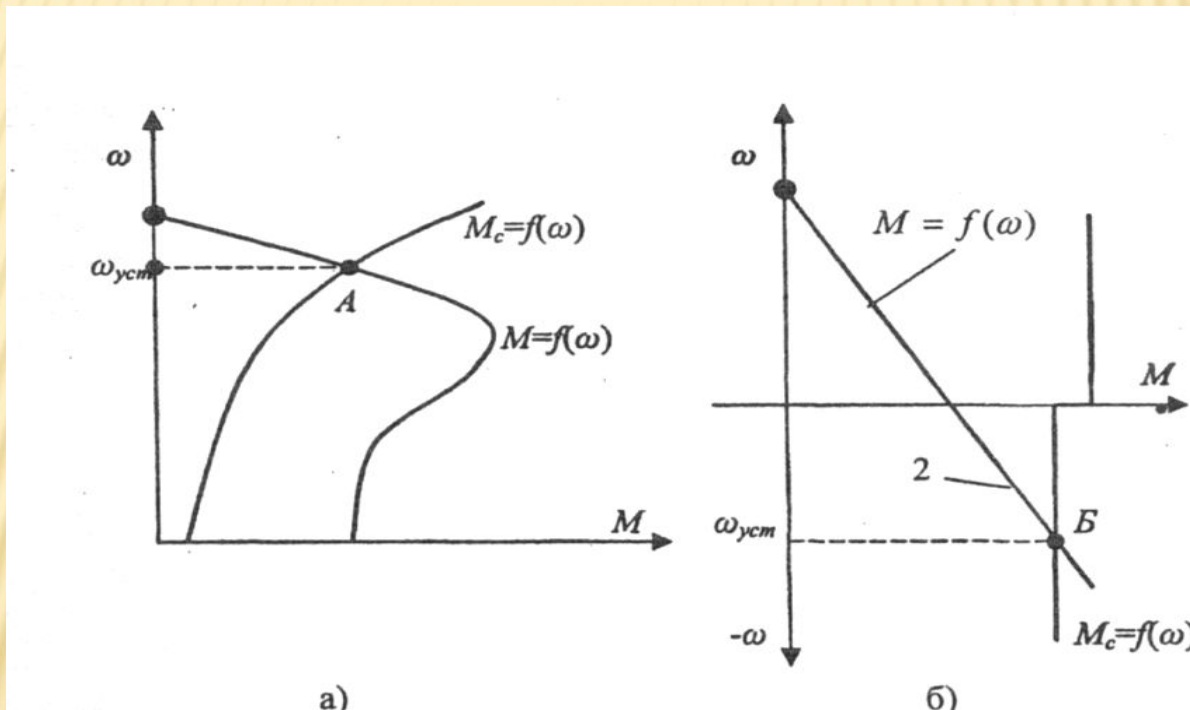


Рис.2.8. Графическое определение скорости установившегося режима движения электропривода

На рис.2.8,6 показаны механические характеристики грузоподъемной лебедки, работающей в режиме спуска груза (скорость отрицательна). Для обеспечения постоянной скорости спуска приводный электродвигатель переводится в режим торможения противовключением, которому соответствует механическая характеристика 2. Точка *Б* пересечения этой характеристики с механической характеристикой лебедки соответствует равенству моментов $M=M_c$, т.е. установившемуся режиму движения.

Исходя из того, что M определяет динамику механической системы, то результирующий момент M часто называют динамическим.

(2.10.)

Учитывая (2.5), получим $M_{дин} = M_{\Sigma} = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$

$$M - M_c = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (2.11.)$$

Это уравнение, отражающее второй закон Ньютона, называют уравнением движения электропривода.

Для поступательного движения уравнение движения электропривода соответственно будет

$$F - F_c = m \cdot \frac{dV}{dt} \quad (2.12.)$$

где F – усилие, развиваемое двигателем;

F_c – усилие сопротивления движению на штоке этого двигателя;

m – массы подвижных элементов, связанные со штоком двигателя;

V – линейная скорость штока двигателя.

ПРИВЕДЕННОЕ МЕХАНИЧЕСКОЕ ЗВЕНО

Для возможности использования уравнения движения возникает задача приведения всех моментов сопротивления и моментов инерции отдельных кинематических звеньев к одному валу, обычно к валу электродвигателя. Такое приведение является только расчетной операцией.

Принцип приведения моментов заключается в сохранении равенства мощностей. Приведение моментов инерции производится на основе принципа сохранения кинетической энергии.

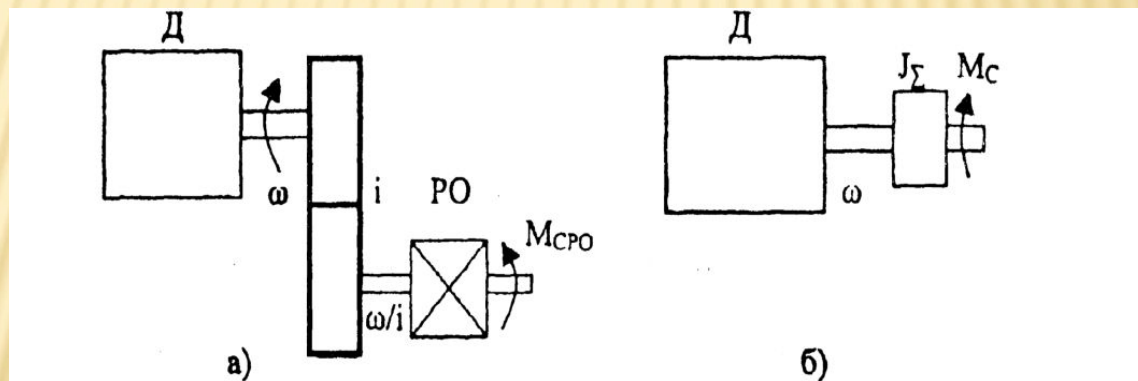


Рис.2.9. Приведение моментов сопротивления и инерции к валу двигателя

Следовательно, если известен статический момент на валу рабочего органа, статический момент, приведенный к валу двигателя, находится по формуле:

$$M_c = \frac{M_{c.po}}{\omega / \omega_{po} \cdot \eta_{ред}} = \frac{M_{c.po}}{i \cdot \eta_{ред}} \quad (2.14.)$$

Для приведения момента инерции рабочего органа J к валу двигателя нужно соблюсти равенство кинетических энергий

$$\frac{J_{po} \cdot \omega_{po}^2}{2} = \frac{J_{po.np} \cdot \omega^2}{2}$$

Следовательно, приведенный к валу двигателя момент инерции рабочего органа находится по формуле:

(2.15.)

$$J_{или}^{po.np} = \frac{J_{po}}{i^2}$$

$$M - M_c = (J_{pom} + J_{po.np}) \cdot \frac{d\omega}{dt} \qquad M - M_c = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

В некоторых кинематических схемах рабочих машин присутствуют звенья с поступательным движением. Рассмотрим такой случай на примере кинематической схемы грузоподъемной лебедки (рис.2.10).

Статический момент (активный) создается силой тяжести груза на крюке лебедки

$$G = m_{гр} \cdot g$$

Этот момент прикладывается к валу барабана лебедки и равен

$$M_{с(бар)} = m_{гр} g R_{бар}$$

Для того чтобы привести статический момент к валу двигателя, для случая подъема груза нужно воспользоваться формулой (2.14):

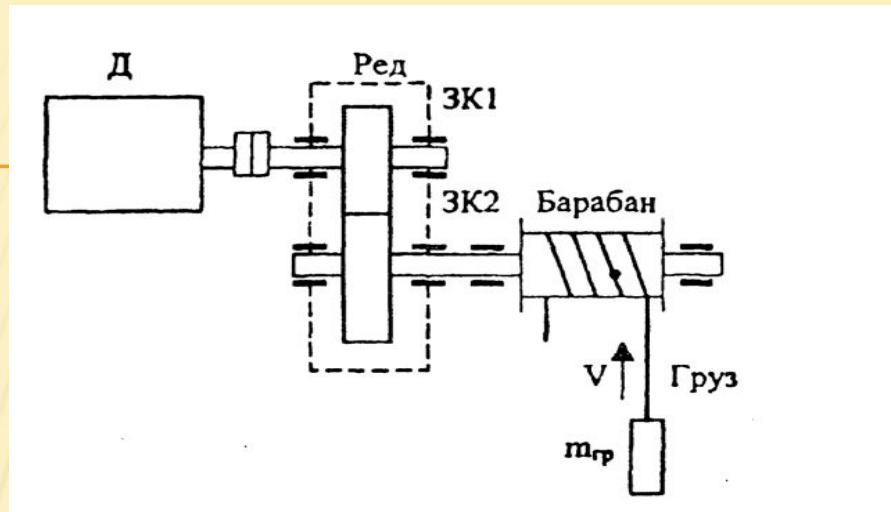


Рис.2.10. Кинематическая схема грузоподъемной лебедки

$$M_c = \frac{M_{c(бар)}}{i \cdot \eta_{ред}} = \frac{m_{гр} g R_{бар}}{i \cdot \eta_{ред}}$$

Особенность данного случая при наличии активного статического момента состоит в том, что приведенный статический момент для режимов подъема и спуска груза будет различным. При подъеме груза двигатель должен преодолевать сопротивление трения (потери мощности) в редукторе и других элементах, поэтому приведенный к валу двигателя статический момент будет несколько больше, что учитывается делением на КПД передачи.

Для нахождения суммарного момента инерции механической системы воспользуемся формулой (2.15) для приведения вращающихся масс и принципом равенства кинетических энергий для приведения поступательно движущейся массы т.

$$\frac{m_{\text{зп}} \cdot V^2}{2} = \frac{J_{\text{зп}} \cdot \omega^2}{2}$$

Здесь J – момент инерции массы т, линейно движущейся со скоростью V , приведенный к вращательному движению со скоростью вала двигателя ω .

Суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции рассматриваемой системы (рис.2.9) будет:

$$J_{\Sigma} = J_{\text{ром}} + J_{\text{зк1}} + \frac{J_{\text{пр2}} + J_{\text{бар}} + m_{\text{зп}} \cdot R_{\text{бар}}^2}{i^2}$$

Где $J_{\text{ром}}, J_{\text{бар}}, J_{\text{зк1}}, J_{\text{зк2}}$ – моменты инерции соответствующих механических звеньев.

Уравнение движения электропривода для режима подъема груза будет:

$$M - \frac{m_{\text{зп}} g \cdot R_{\text{бар}}}{i \cdot \eta_{\text{ред}}} = \left(J_{\text{ром}} + J_{\text{зк1}} + \frac{J_{\text{зк2}} + J_{\text{бар}} + m_{\text{зп}} R_{\text{бар}}^2}{i^2} \right) \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

Электромеханические свойства асинхронных двигателей

Принцип работы асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель является трехфазной индукционной электрической машиной переменного тока. На статоре двигателя располагаются три распределенные обмотки, сдвинутые друг относительно друга на 120° , если число пар полюсов машины $2p_n = 2$, как это показано на рис.3.1, а. Если число пар полюсов (p_n), образуемых обмотками, более одного, то соответственно увеличивается число секций обмотки, и они будут сдвинуты геометрически друг относительно друга уже не на 120° , а на $120^\circ / p_n$.

Фазные статорные обмотки асинхронного двигателя соединяют в звезду (рис.3.1, б) или в треугольник (рис.3.1, в). Обычно асинхронные двигатели малой и средней мощности сконструированы на номинальное напряжение 380/220В. При этом если напряжение питания 380В, то обмотки соединяют в звезду (Λ), если напряжение питания 220В, то обмотки соединяют в треугольник (Δ). В обоих случаях напряжение, прикладываемое к фазной обмотке статора двигателя, равно 220В.

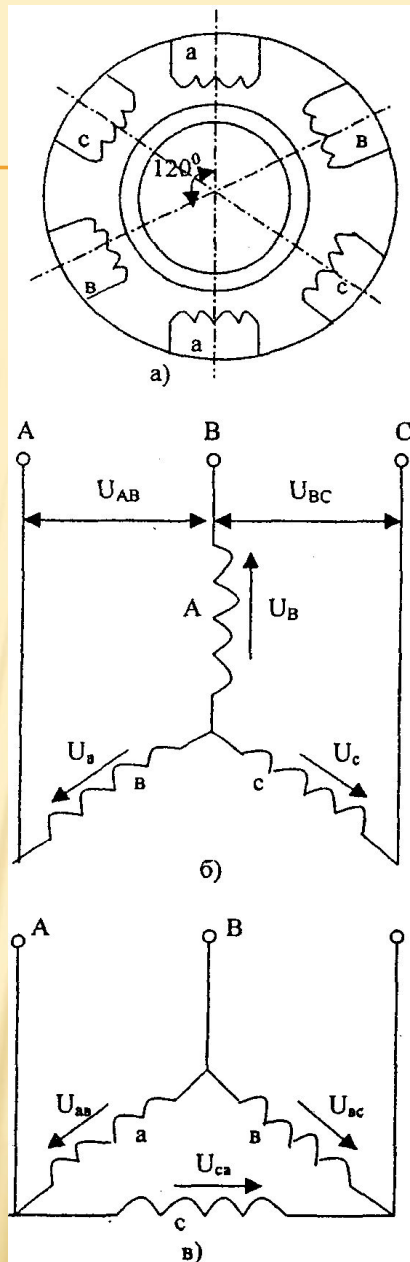


Рис.3.1. Схемы включения обмоток асинхронного двигателя

$$\omega_o = \frac{2\pi f_1}{p_n} \quad (3.1)$$

где f_1 - частота синусоидального тока в обмотках статора;

p_n - число пар полюсов машины.

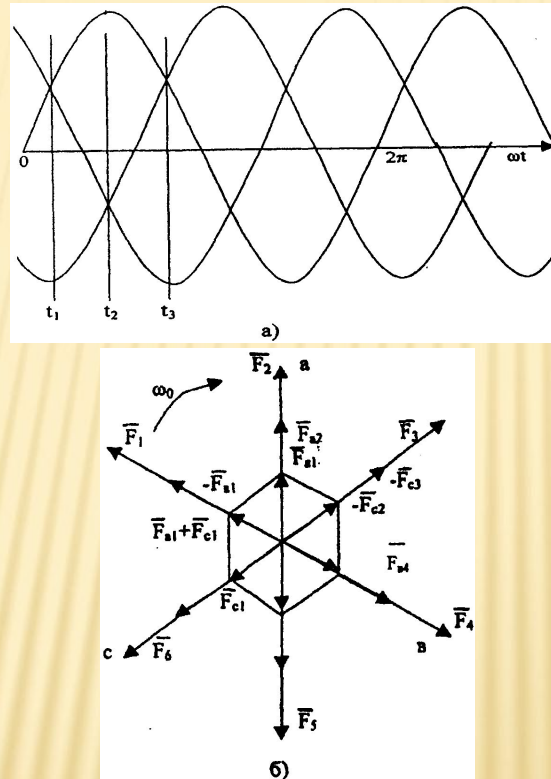


Рис.3.2. Принцип образования вращающегося электромагнитного поля

Электромагнитный момент и механическая характеристика

Электромагнитный момент M в асинхронном двигателе создается благодаря взаимодействию вращающегося магнитного поля статора Φ с активной составляющей тока ротора.

$$M = 3k\Phi I_{2a} \quad (3.3)$$

Ток ротора возникает благодаря э.д.с. E_2 , которая индуцируется в обмотках ротора вращающимся магнитным полем. Когда ротор неподвижен, асинхронный двигатель представляет собой трехфазный трансформатор с обмотками замкнутыми накоротко или нагруженными на пусковое сопротивление. Возникающая при неподвижном роторе в его обмотках э.д.с. называется номинальной фазной э.д.с. ротора E_{2H} . Эта э.д.с. приблизительно равна фазному напряжению статора, деленному на коэффициент трансформации K_T

$$E_{2H} = \frac{U_1}{K_T} \quad (3.4)$$

Величина э.д.с. ротора E_2 при вращающемся двигателе и частота этой э.д.с. (а значит, и частота тока в обмотках ротора) f_2 зависят от частоты пересечения вращающимся полем проводников обмотки ротора (в короткозамкнутом двигателе – стержней). Эта частота определяется разностью скоростей поля статора ω_0 и ротора ω . Эта разность называется абсолютным скольжением

$$S_{абс} = \omega_0 - \omega \quad (3.5)$$

При анализе режимов работы асинхронного двигателя с постоянной частотой питающего напряжения (50Гц) обычно пользуются относительной величиной скольжения

$$S = \frac{S_{абс}}{\omega_0} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad (3.6)$$

Когда ротор двигателя неподвижен, $s = 1$.

Наибольшая величина э.д.с. ротора при работе в двигательном режиме будет при неподвижном роторе (E_{2n}); по мере увеличения скорости (уменьшении скольжения) э.д.с. E_2 будет уменьшаться

$$E_2 = E_{2n} \cdot s \quad (3.7)$$

Аналогично частота э.д.с. и тока ротора f_2 при неподвижном роторе будет равна частоте тока статора f_1 , и по мере увеличения скорости будет уменьшаться пропорционально скольжению

$$f_2 = f_1 \cdot s \quad (3.8)$$

В номинальном режиме скорость ротора незначительно отличается от скорости поля, и номинальное скольжение составляет для двигателей общего применения мощностью 1,5-200кВт всего 2-3%, а для двигателей большей мощности порядка 1%. Соответственно в номинальном режиме э.д.с. ротора составляет 1-3% от номинального значения этой э.д.с. при $s = 1$. Частота тока ротора в номинальном режиме будет составлять всего 0,5-1,5Гц. При $s=0$, когда скорость ротора равна скорости поля, э.д.с. ротора E_2 и ток ротора I_2 будут равны нулю, момент двигателя также будет равен нулю. Этот режим является режимом идеального холостого хода.

МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Поток, создаваемый обмотками, зависит от величины и частоты питающего напряжения.

$$\Phi = \frac{U_1}{\kappa \cdot \omega_0} \quad (3.9)$$

Ток ротора I_2 равен

$$I_2 = \frac{E_{2н} \cdot s}{Z_2} \quad (3.10)$$

$$x_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 \cdot s L_2$$

при $s=1$ индуктивное сопротивление обмотки ротора наибольшее.

$$X_2 = X_{2ном}^s \quad (3.11)$$

$$I_2 = \frac{E_{2н} \cdot s}{\sqrt{(x_{2н} \cdot s)^2 + r_2^2}} \quad (3.12)$$

$$I_{2a} = I_2 \cdot \cos \varphi_2 = \frac{E_{2н} \cdot r_2 \cdot s}{(x_{2н} \cdot s)^2 + r_2^2} \quad (3.13)$$

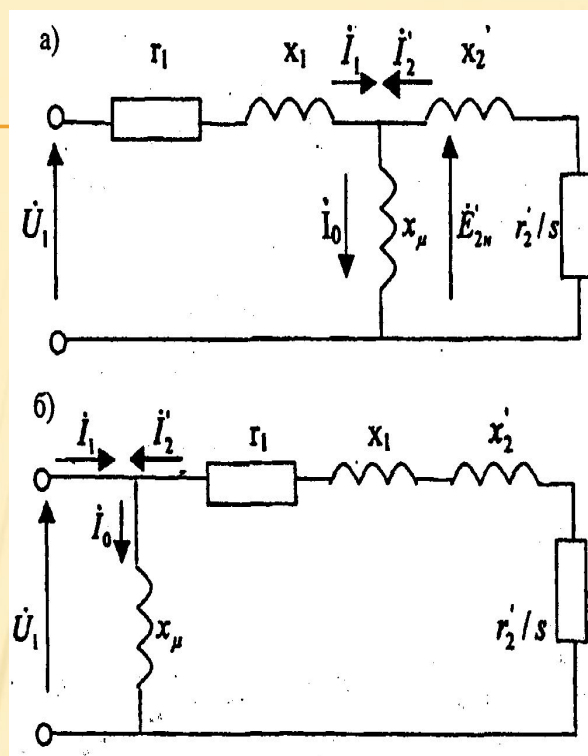


Рис.3.3. Схемы замещения асинхронного двигателя

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{x_\kappa^2 + \left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)}} \quad (3.14)$$

$$M = \frac{3U_2^1 \cdot \frac{r_2'}{s}}{\omega_0 \cdot \left[x_{\kappa}^2 + \left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 \right]} \quad (3.15)$$

Это выражение отображает механическую характеристику асинхронного двигателя $s = f(M)$.

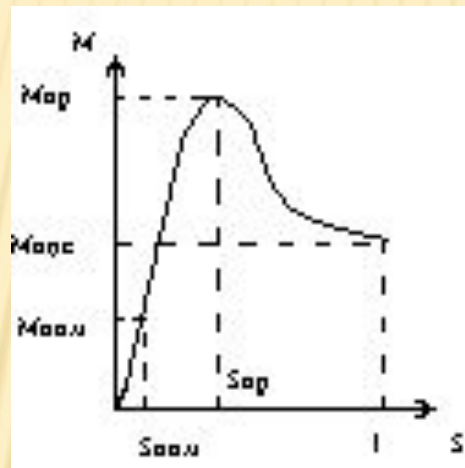


Рис.3.4. Примерные механическая (1) и электромеханическая характеристики (2) асинхронного двигателя с фазным ротором, замкнутым накоротко

Отношение максимального момента к номинальному называется

перегрузочной способностью асинхронного двигателя

$$\lambda = \frac{M_{\kappa}}{M_n} \quad (3.16)$$

$$s_{\text{крит}} = \pm \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_{\kappa}^2}} \quad (3.17)$$

где $s_{\text{крит}}$ – критическое скольжение;

знак (+) – означает, что эта величина относится к двигательному режиму;

знак (–) – к генераторному режиму рекуперативного торможения.

Формулу механической характеристики (3.15) можно преобразовать к более удобному для пользования выражению – формуле Клосса.

$$M = \frac{2M_{\kappa} \cdot (1 + as_{\kappa})}{s_{\kappa} / s + s / s_{\kappa} + 2as_{\kappa}}$$

Тогда

$$M_{\kappa} = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 \cdot x_{\kappa}} \quad (3.18)$$

$$S_{\kappa} = \frac{r_2'}{x_{\kappa}} \quad \text{или} \quad S_k = \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 (3.19)} \right)$$

Формула Клосса, если пренебречь r_1 будет иметь вид:

$$M = \frac{2M_{\kappa}}{s_{\kappa} / s + s / s_{\kappa}} \quad (3.20)$$

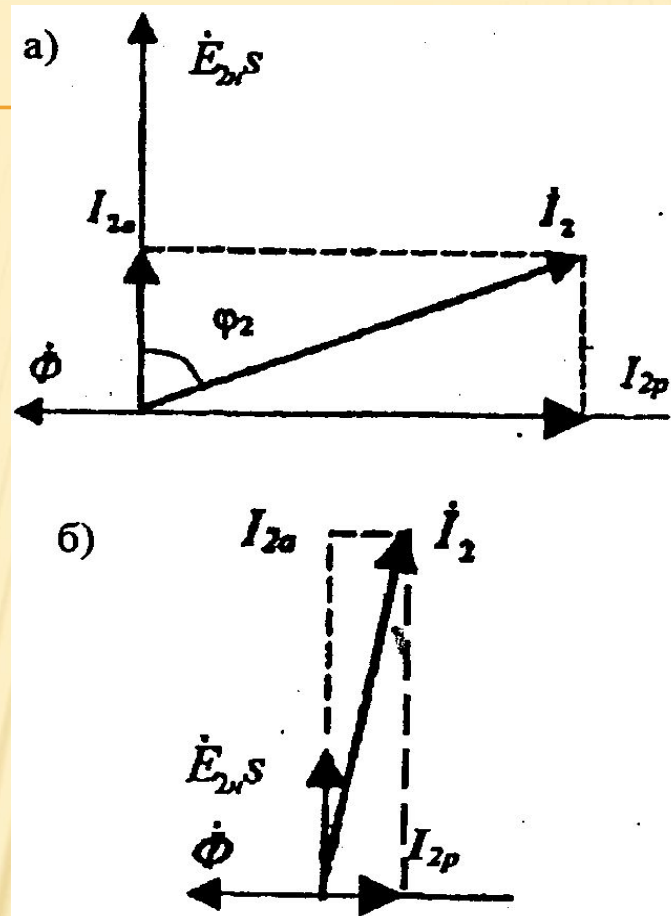


Рис.3.6. Векторная диаграмма цепи ротора асинхронного двигателя:

а - при большом скольжении; б - при малом скольжении.

3.3. СПОСОБЫ ПУСКА АД

1. ПУСК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Введение добавочного активного сопротивления увеличивает полное сопротивление роторной цепи, в результате чего уменьшается пусковой ток и увеличивается $\cos\varphi_2$ роторной цепи, вследствие чего увеличивается активная составляющая тока ротора и, следовательно, пусковой момент двигателя.

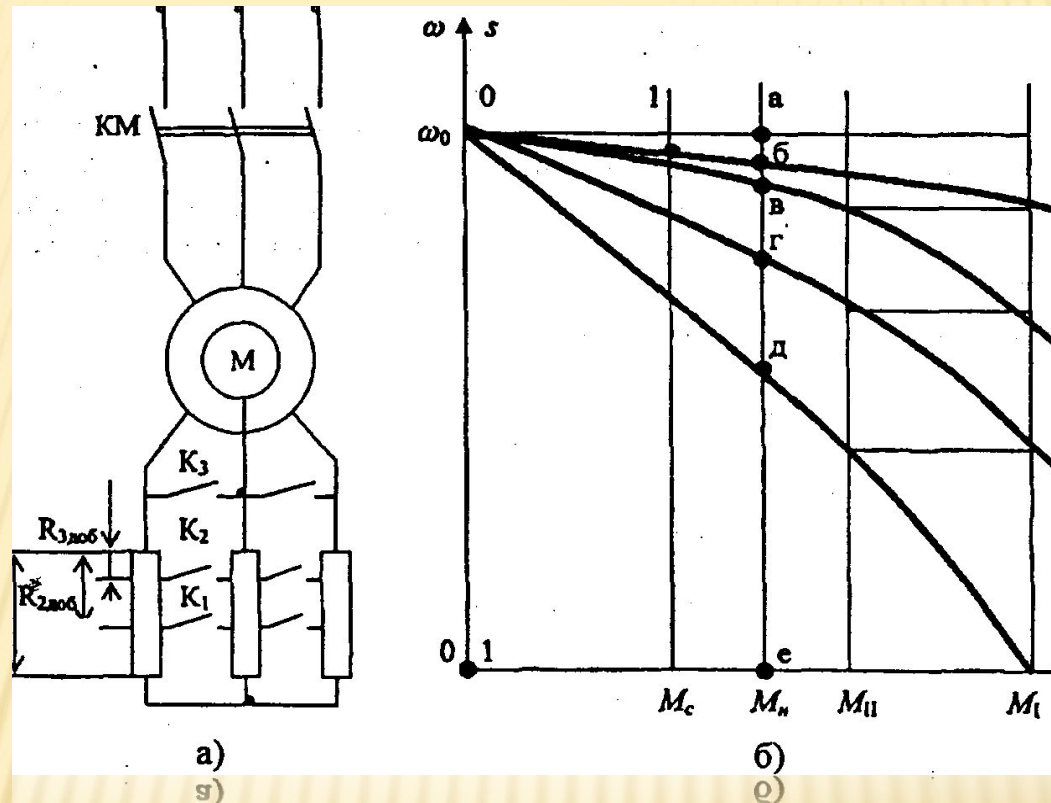


Рис.4.1. Схема включения пусковых сопротивлений (а) и реостатные механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором (б)

ПУСК АД С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ МОЖЕТ БЫТЬ:

Прямым включением в сеть. При этом пуске кратность пускового тока достигает $(5 \div 7) I_{ном}$. По этому этот пуск может применяться для двигателей малой и средней мощности при мощной сети питания. Если сеть не большой мощности, то при данном пуске происходит понижение напряжения сети, что отрицательно сказывается на работе других двигателей.

Пуск при пониженном напряжении реализуется:

- а) путем переключения обмоток статора со схем Δ на Y в момент пуска. При этом напряжение уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, а момент и ток в 3 раза.
- б) введением в цепь статора реактора или автотрансформатора.
- в) введением в цепь статора реактора тиристорного регулятора напряжения

При разомкнутом рубильнике 2 включают рубильник 1. При этом ток из сети поступает в обмотку статора через реакторы P , на которых происходит падение напряжения $jI_n x_p$ (где x_p — индуктивное сопротивление реактора, Ом). В результате на обмотку статора подается пониженное напряжение

$U'_1 = U_{\text{ном}} - jI_n x_p$. После разгона ротора двигателя включают рубильник 2 и подводимое к обмотке статора напряжение оказывается номинальным.

Недостаток этого способа пуска состоит в том, что уменьшение напряжения в $U'_1/U_{\text{ном}}$ раз сопровождается уменьшением пускового момента M_n в $(U'_1/U_{\text{ном}})^2$ раз.

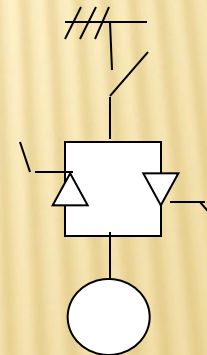
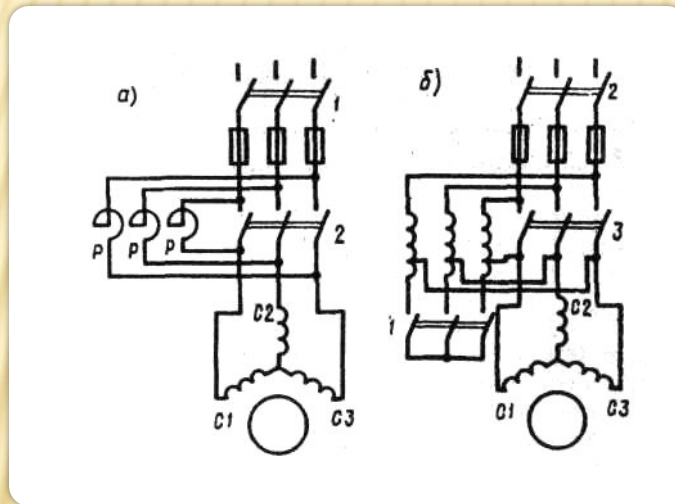


Рис. 15.5. Схемы реакторного (а) и автотрансформаторного (б) и с тиристорным регулятором напряжения (в) в цепи статора.

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С УЛУЧШЕННЫМИ ПУСКОВЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Стремление улучшить пусковые свойства асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором привело к созданию асинхронных двигателей с особой конструкцией ротора: двигателей с глубокими пазами на роторе и двигателей с двумя короткозамкнутыми клетками на роторе.

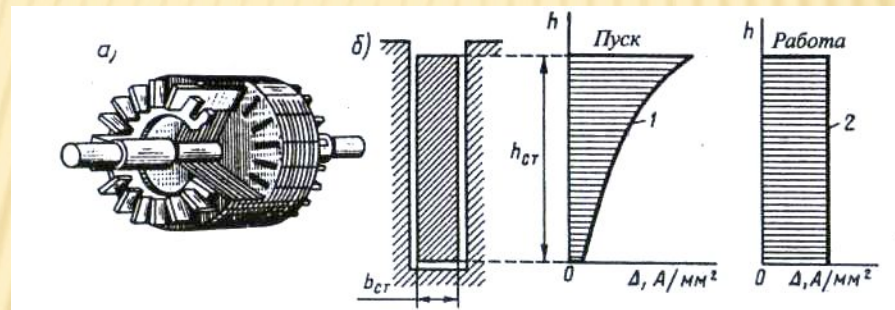


Рис 15.6 Ротор с глубокими пазами:

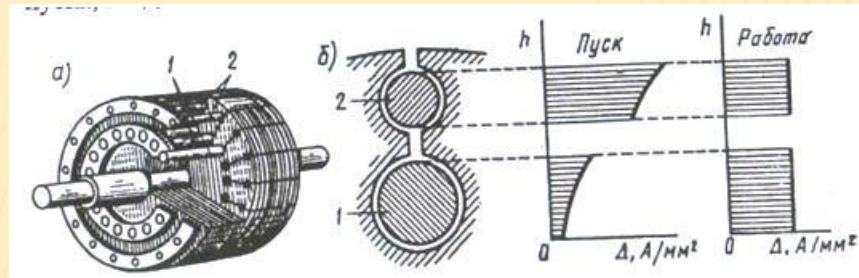


Рис 15.8. Двухклеточный ротор.

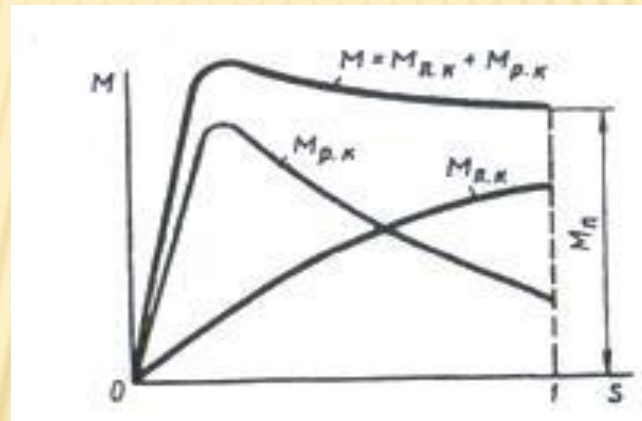


Рис 15.9. Механическая характеристика двухклеточного асинхронного двигателя

СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Скорость двигателя определяется двумя параметрами: скоростью вращения электромагнитного поля статора ω_0 и скольжением s :

$$\omega = \omega_0 - S_{abc}$$
$$\omega = \omega_0 - \omega_0 s$$

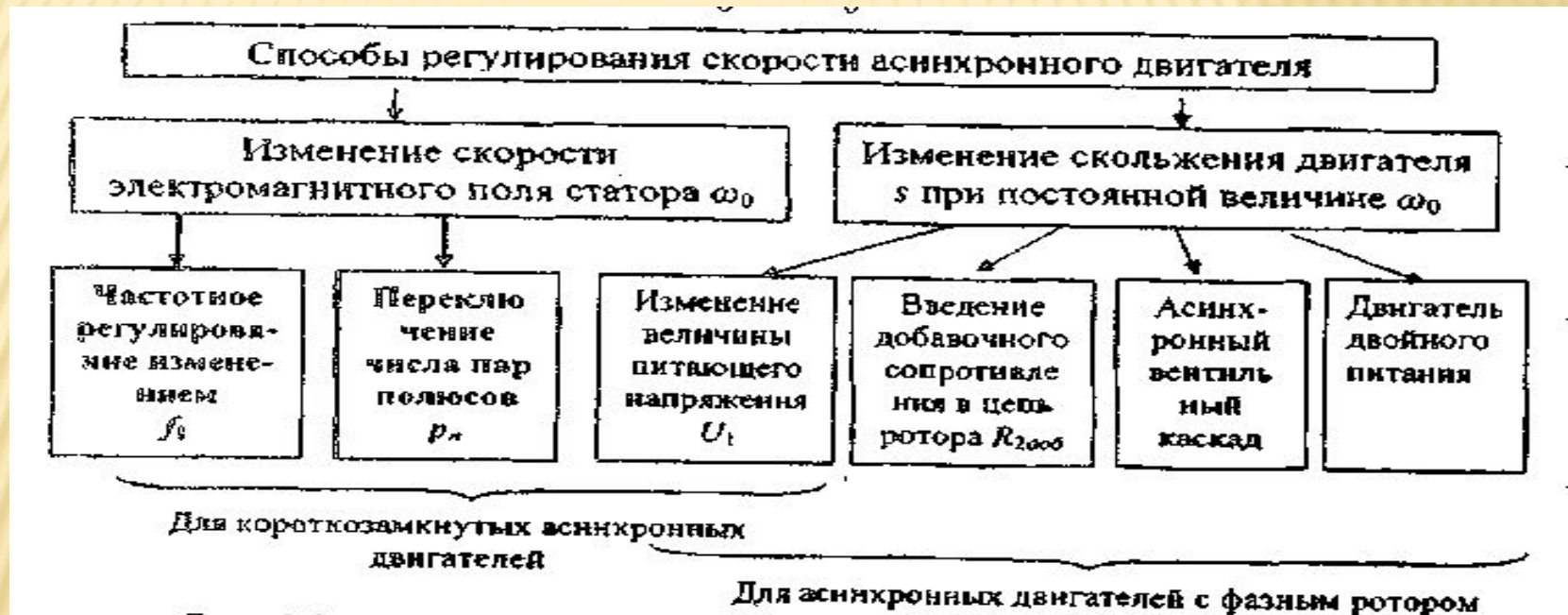


Рис.6.1. Классификация способов регулирования асинхронных двигателей

Скорость вращения поля статора определяется двумя параметрами (см.3.3): частотой напряжения, подводимого к обмоткам статора f_1 , и числом пар полюсов двигателя p_n . В соответствии с этим возможны два способа регулирования скорости: изменение частоты питающего напряжения посредством преобразователей частоты, включаемых в цепь статора двигателя (частотное регулирование), и путем изменения числа пар полюсов двигателя.

Регулирование скольжения двигателя при постоянной скорости вращения поля статора для короткозамкнутых асинхронных двигателей возможно путем изменения величины напряжения статора при постоянной частоте этого напряжения. Для асинхронных двигателей с фазным ротором, кроме того, возможны еще два способа: введение в цепь ротора добавочных сопротивлений (реостатное регулирование) и введение в цепь ротора добавочной регулируемой э.д.с. посредством преобразователей частоты, включаемых в цепь ротора (асинхронный вентильный каскад и двигатель двойного питания).

РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧИСЛА ПАР ПОЛЮСОВ

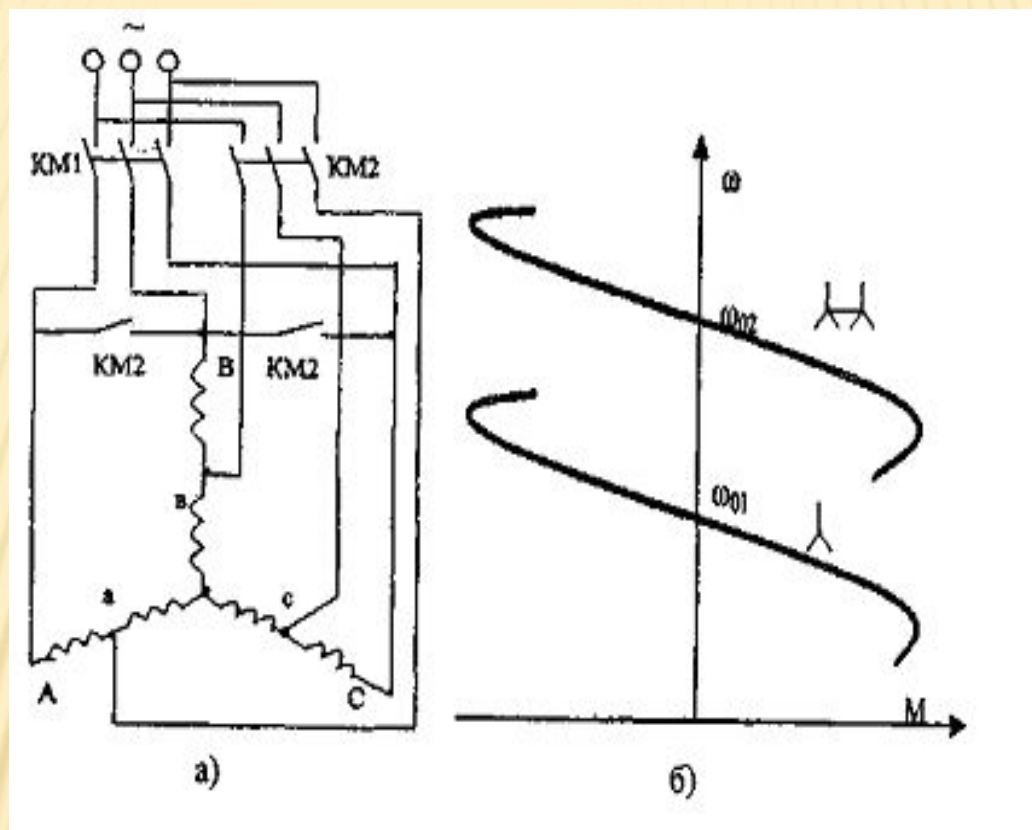


Рис.3.21. Схема (а) и механические характеристики (б) двухскоростного асинхронного двигателя со схемой соединения

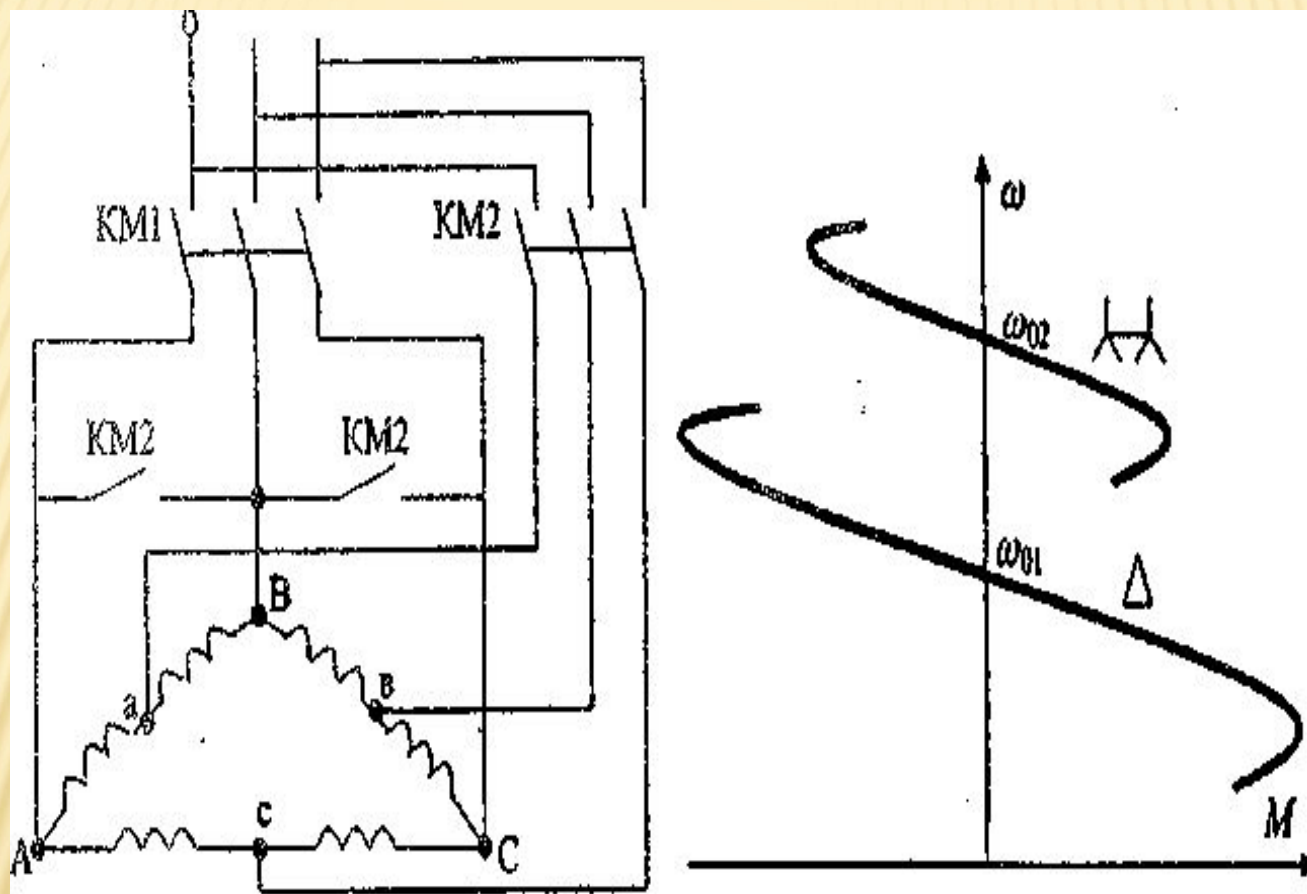
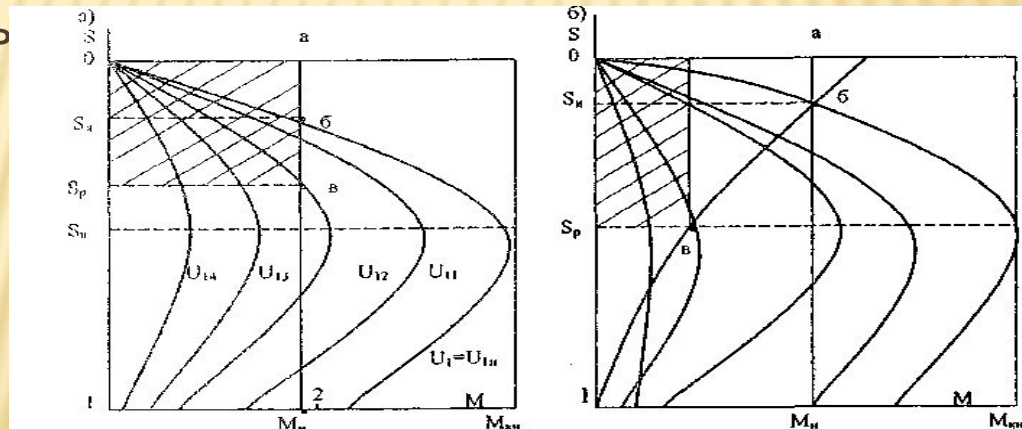


Рис.3.22. Схема и механические характеристики двухскоростного двигателя

РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ АД ИЗМЕНЕНИЕМ СКОЛЬЖЕНИЯ

Регулирование скорости асинхронного двигателя путем изменения питающего напряжения сопряжено с возможностью перегрева его ротора и может производиться лишь при определенных условиях:

- при малом диапазоне снижения скорости относительно номинальной;
- при сниженном относительно номинального моменте сопротивления на валу двигателя;
- при исполь



ием.

Рис.3.13. Механические характеристики асинхронного двигателя при регулировании напряжения питания а) при постоянном моменте; б) при вентиляторном моменте нагрузки

Такой способ регулирования применяется иногда для привода насосов и вентиляторов, у которых момент сопротивления на валу резко снижается при уменьшении скорости. Этот случай рассмотрен на рис.3.13,6. Поскольку со снижением скорости M_c уменьшается примерно в квадрате от величины снижения скорости, то мощность скольжения P_s со снижением скорости растет не столь существенно. Если нагрузка на валу двигателя носит вентиляторный характер, то максимальная величина мощности скольжения составляет 15% от мощности на валу при номинальной скорости.

Поэтому для привода вентиляторов и насосов достаточно увеличение установленной мощности двигателя с повышенным скольжением в 1,5-2 раза.

Снижение напряжения на статоре асинхронного двигателя иногда используется для уменьшения пусковых токов двигателя. Это возможно, если момент сопротивления на валу двигателя при пуске не превышает 0,3-0,4 Н, (насосы, вентиляторы или другие рабочие машины, пуск которых производится вхолостую). В этом случае посредством тиристорного регулятора напряжение, подводимое к обмотке статора, снижается, а затем по мере разгона двигателя увеличивается до номинального значения. Этим обеспечивается «плавный пуск» двигателя с уменьшенными пусковыми токами и сниженными динамическими нагрузками на рабочую машину.

РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В КАСКАДНЫХ СХЕМАХ ЕГО ВКЛЮЧЕНИЯ

Каскадными называют такие схемы включения АД, которые, обеспечивая регулирование его скорости, позволяют одновременно полезно использовать энергию потерь в роторе.

По способу использования этой энергии различают схемы электромеханического машинно-вентильного каскада и электрического каскада.

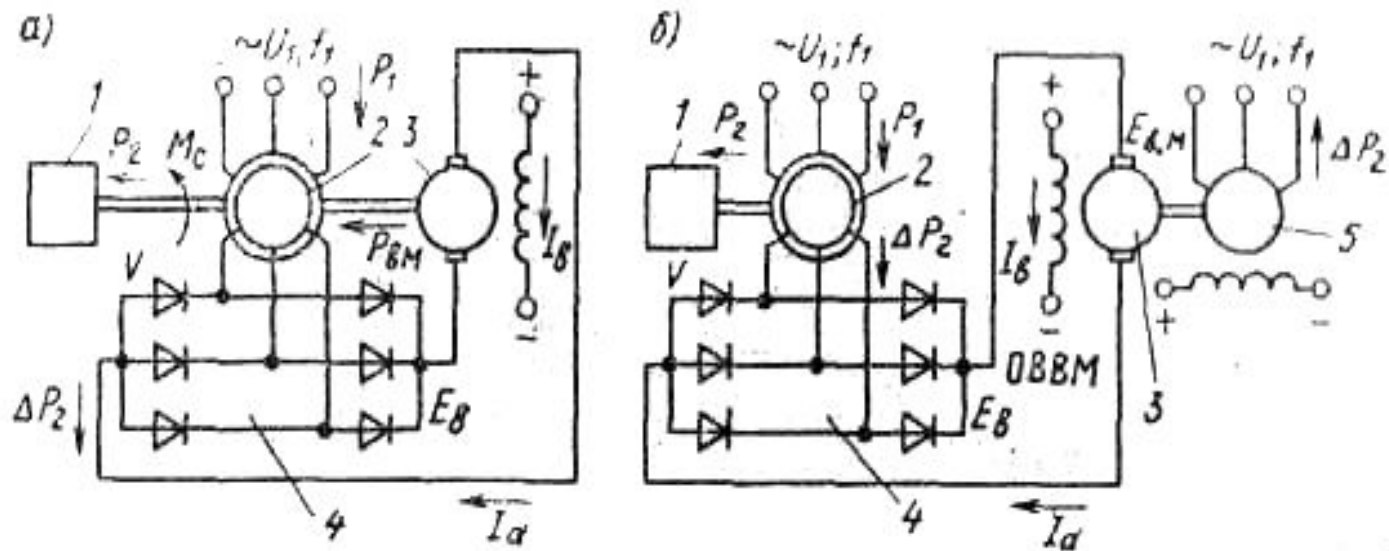


Рис. 5.31. Схемы электромеханического (а) и электрического (б) вентильномашинных каскадов

В настоящее время машинный агрегат может быть заменен на статический преобразователь "частоты, состоящий из трансформатора 2 и инвертора 3 (рис. 5:33). К обмотке ротора АД 1 подключен неуправляемый выпрямитель 5 и инвертор 3, а также реактор 4, который служит для сглаживания пульсаций выпрямленного тока. Асинхронный ЭП по схеме рис. 5.33 получил название асинхронного вентильного каскада.

Основные показатели регулирования скорости АД в каскадных схемах включения. диапазон регулирования скорости в каскадных схемах обычно не превышает двух. Плавность регулирования скорости АД в каскадных схемах высокая и определяется плавностью изменения ЭДС вспомогательной машины или ПЧ. Регулирование скорости производится вниз от естественной характеристики.е

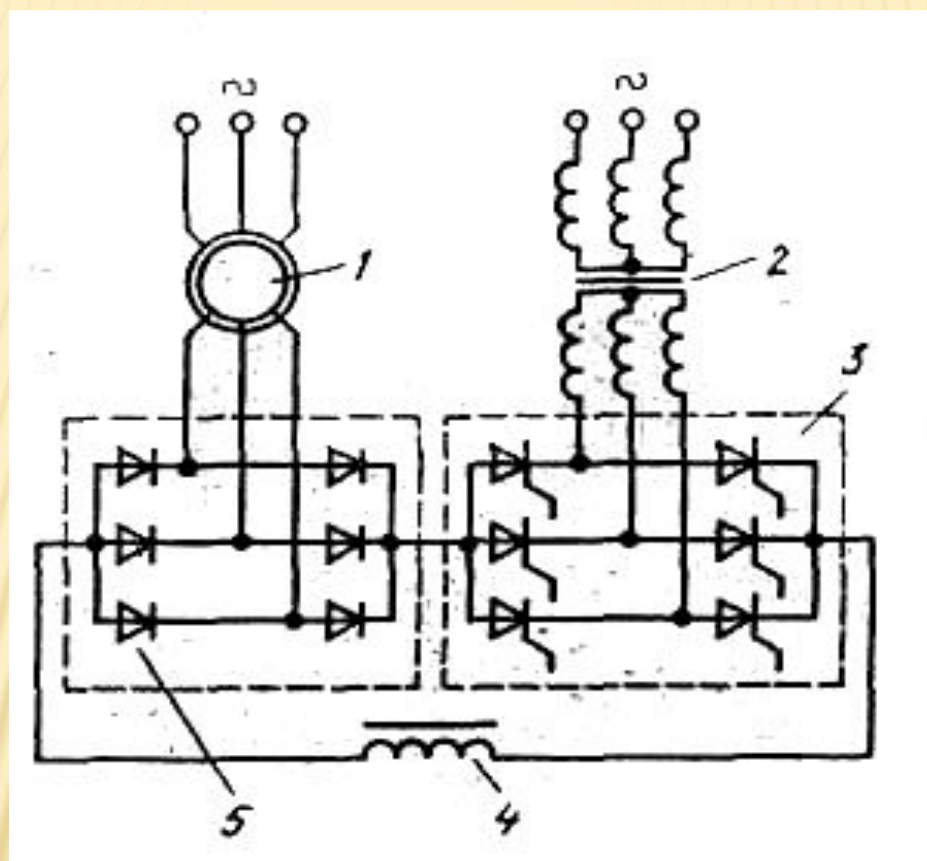


Рис 5.33. Схема асинхронного винительного каскада

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С ЧАСТОТНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ

Существующие вентильные регулирование скорости изменением частоты реализуется с помощью полупроводниковых преобразователей частоты которые можно разделить на две группы:

- 1 – преобразователи с непосредственной связью питающей сети и нагрузки, сокращенно НПЧ;
- 2 – преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока.

Преобразователь частоты с непосредственной связью включается в статорную цепь асинхронного двигателя и служит для преобразования напряжения стандартной частоты в регулируемое в определенных пределах напряжение по величине и частоте.

Преобразователи частоты с непосредственной связью обычно представляют собой три согласованно работающих реверсивных тиристорных преобразователя постоянного тока. Блок схема непосредственного преобразователя частоты представлена на рис.6.7.

Преобразователи частоты с непосредственной связью по схеме рис.6.7 дают возможность при частоте питания 50Гц получать выходную частоту в пределах 0-20Гц. Поэтому асинхронные электроприводы данного типа чаще всего применяются для тихоходных безредукторных электроприводов средней и большой мощности.

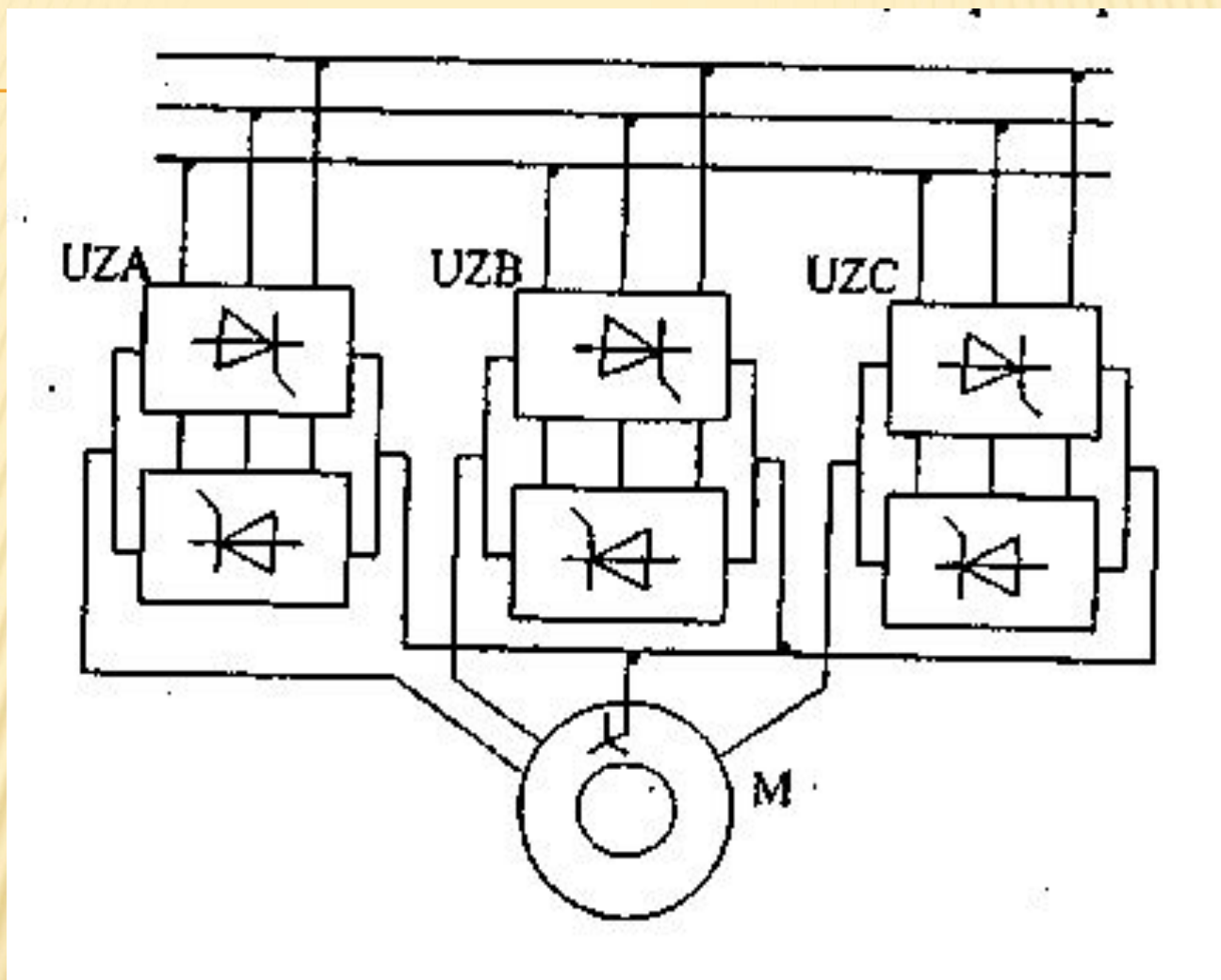


Рис.6.7. Блоксхема преобразователя частоты с непосредственной связью

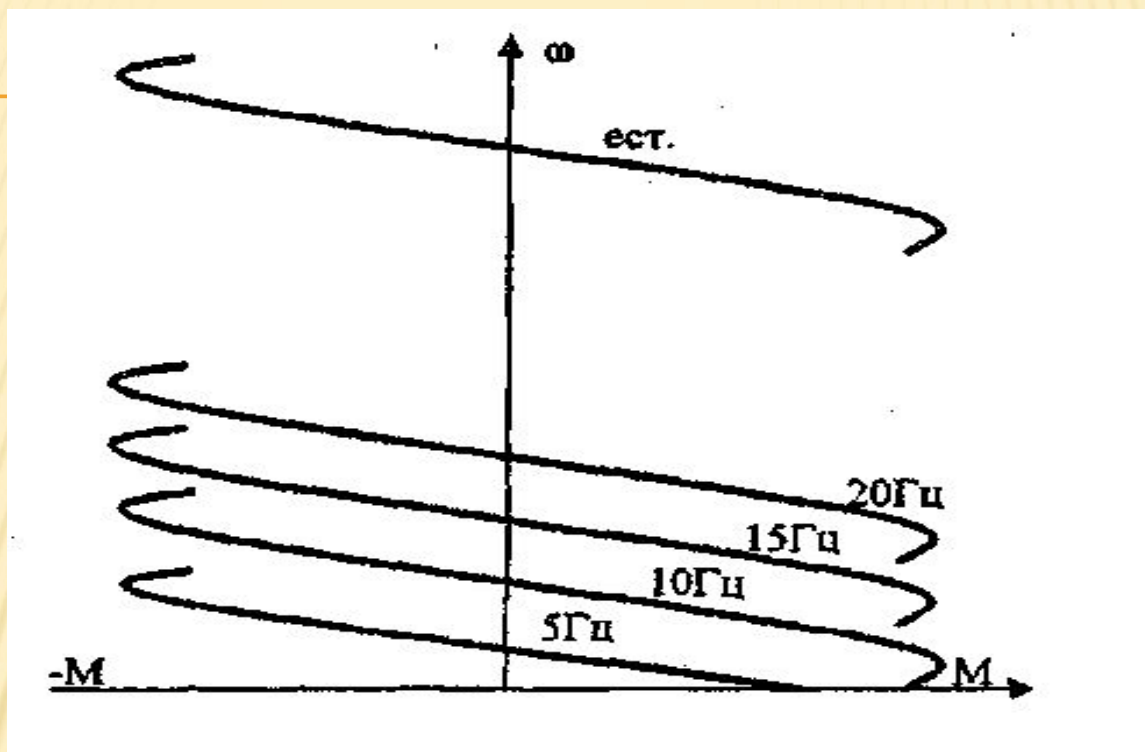


Рис.6.9. Механические характеристики электропривода НПЧ-АД

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ СО ЗВЕНОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

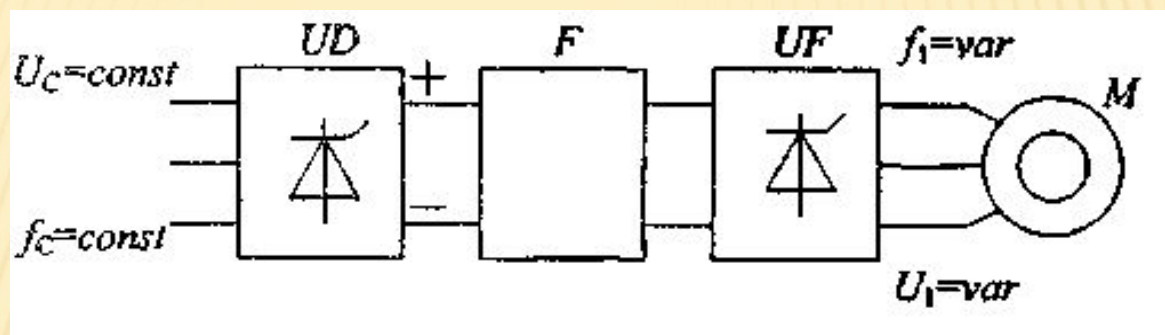


Рис.6.10. Блок-схема электропривода с преобразователем частоты с промежуточным звеном постоянного тока

Переменное напряжение промышленной сети сначала выпрямляется посредством регулируемого или нерегулируемого выпрямителя UD, а затем подается на автономный инвертор, преобразующий постоянное напряжение (или ток) в напряжение (или ток) регулируемой частоты и величины. Важным узлом преобразователей с промежуточным звеном постоянного тока является фильтр F. Этот фильтр выполняет две функции: сглаживает пульсации выпрямленного напряжения (или тока) и служит устройством для накопления и отдачи энергии, что необходимо для обеспечения циркуляции реактивной мощности между обмотками асинхронного двигателя и фильтром. Поскольку на входе преобразователя установлен полупроводниковый выпрямитель, то циркуляция реактивной мощности между асинхронным двигателем и сетью невозможна.

Преобразователи частоты по типу автономного инвертора, используемые в электроприводах, позволяют получать выходную частоту от долей герца до нескольких сотен Гц. Верхний предел ограничивается возможной частотой коммутации вентиля инвертора, нижний - качеством выходного напряжения или тока; при несинусоидальной форме тока в обмотках двигателя при малых частотах нарушается равномерность вращения ротора.

Механические характеристики, соответствующие частотному регулированию при выполнении соотношения (6.13) и $r_1 = 0$, показаны на рис.6.4 (сплошными линиями). В первом приближении пропорциональное регулирование напряжения в соответствии с соотношением (6.13) обеспечивает работу двигателя с постоянным потоком.

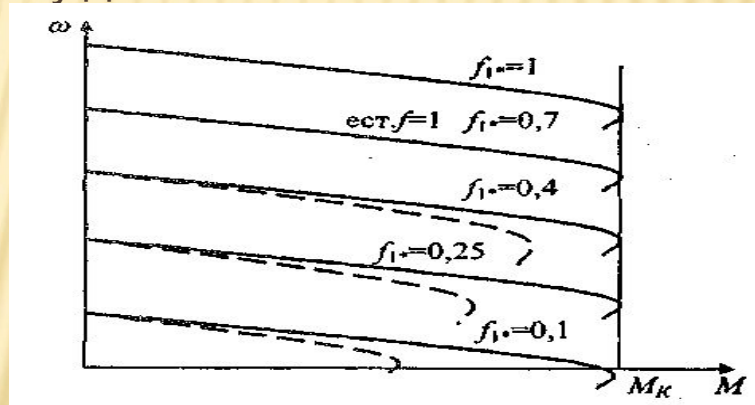


Рис.6.4. Механические характеристики асинхронного двигателя при ЭЭ частотном регулировании при $U_1^*/f_1^* = \text{const}$

ТОРМОЗНЫЕ РЕЖИМЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Асинхронный двигатель может работать в трех тормозных режимах: рекуперативного торможения, динамического торможения и торможения противовключением; специфическим тормозным режимом является также конденсаторное торможение.

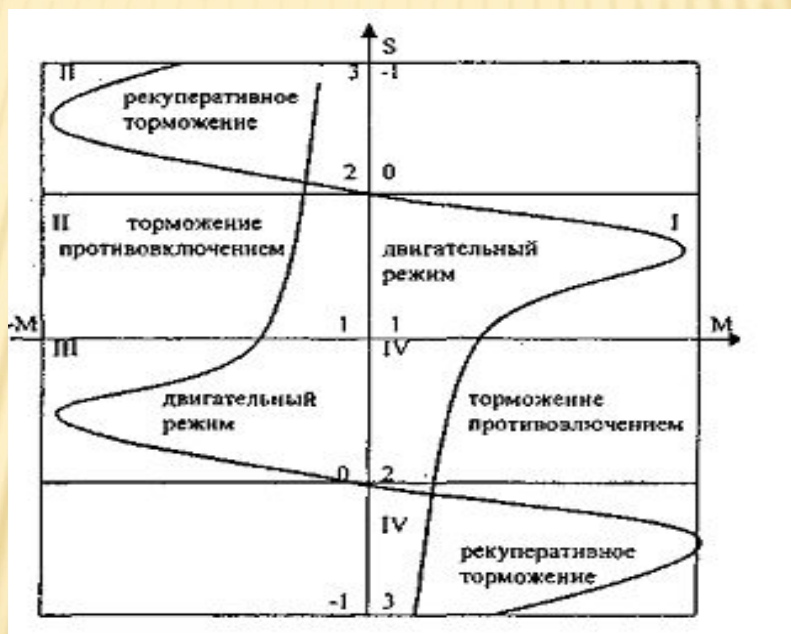


Рис.3.14. Полная механическая характеристика асинхронного двигателя

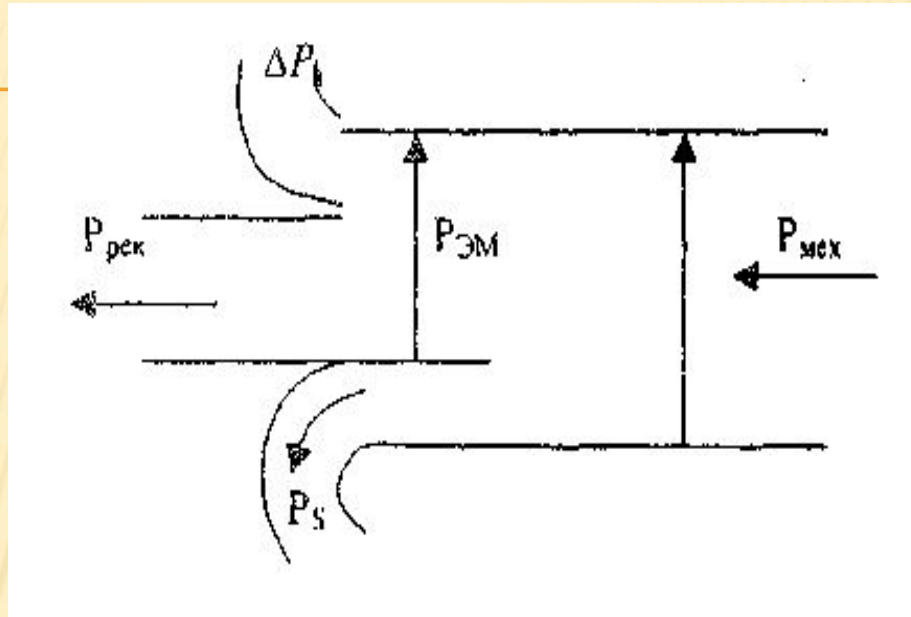


Рис.3.15. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя в режиме рекуперативного торможения

Энергетический баланс в режиме рекуперативного генераторного торможения определяется следующим (рис.3.15). Механическая мощность, поступающая на вал двигателя, преобразуется в электромагнитную мощность вращающегося поля $P_{ЭМ}$ и электрическую мощность, трансформируемую в роторную цепь двигателя.

В режиме рекуперативного торможения асинхронный двигатель генерирует и отдает в сеть активную мощность, а для создания электромагнитного поля асинхронный двигатель и в режиме генератора должен обмениваться с сетью реактивной мощностью. Поэтому асинхронная машина не может работать автономным генератором при отключении от сети. Возможно, однако, подключение асинхронной машины к конденсаторным батареям, как к источнику реактивной мощности .

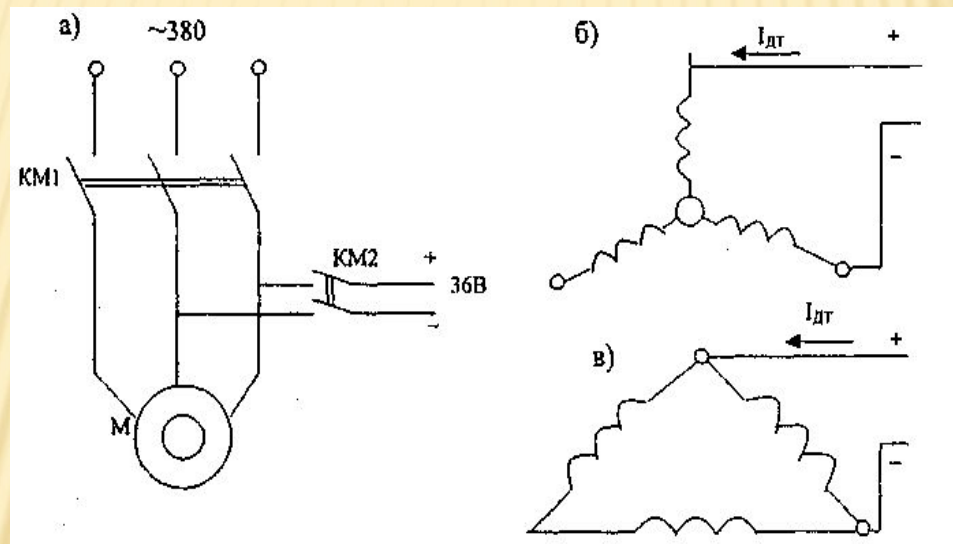


Рис.3.16. Схемы подключения асинхронного двигателя в режиме динамического торможения

Способ динамического торможения характеризуется тем, что статорные обмотки отключаются от сети переменного тока и подключаются к источнику постоянного напряжения .

Вид механических характеристик (см. рис.3.17) подобен характеристикам в режиме рекуперативного торможения. Исходной точкой характеристик является начало координат. Регулировать интенсивность динамического торможения можно изменяя величину тока возбуждения I_{dm} в обмотках статора. Чем выше ток, тем больший тормозной момент развивает двигатель. При этом, однако, нужно учитывать, что при токах $I_{dm} > I_{1н}$ начинает сказываться насыщение магнитной цепи двигателя.

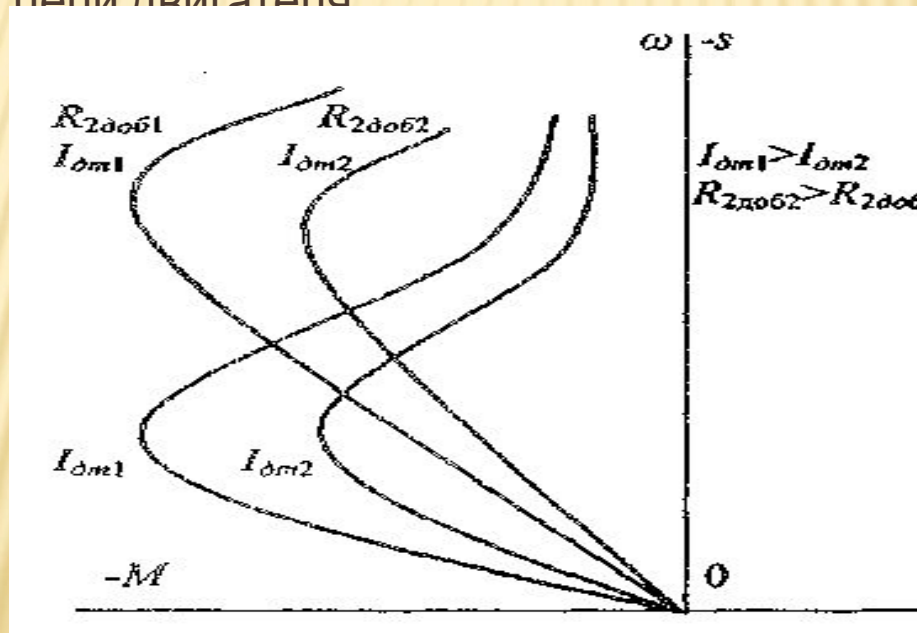


Рис.3.17. Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения

Для асинхронных двигателей с фазным ротором регулирование тормозного момента может производиться также введением дополнительного сопротивления в цепь ротора. Эффект от введения добавочного сопротивления аналогичен тому, которое имеет место при пуске асинхронного двигателя: благодаря улучшению $\cos \varphi_2$ повышается критическое скольжение двигателя и увеличивается тормозной момент при больших скоростях вращения

Возбуждение асинхронной машины в режиме динамического торможения может осуществляться не только подачей постоянного тока в обмотки статора машины, но также в режиме самовозбуждения путем подключения конденсаторов к цепям статора асинхронной машины, как это показано на рис. 3.19. Такой способ торможения называют конденсаторным торможением асинхронных двигателей.

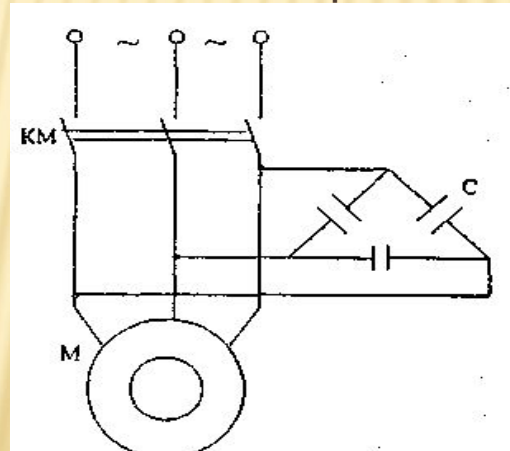


Рис.3.19. Схема включения асинхронного двигателя в режиме динамического торможения с самовозбуждением от конденсаторов

Торможение противовключением может быть в двух случаях:

в первом, когда при работе двигателя необходимо его экстренно остановить, и с этой целью меняют порядок чередования фаз питания обмоток статора двигателя;

во втором, когда электромеханическая система движется в отрицательном направлении под действием спускаемого груза, а двигатель включается в направлении подъема, чтобы ограничить скорость спуска (режим протягивающего груза).

В обоих случаях электромагнитное поле статора и ротор двигателя вращаются в разные стороны. Скольжение двигателя в режиме противовключения всегда больше 1

$$s_{nv} = \frac{\omega_0 + \omega}{\omega_0} > 1$$

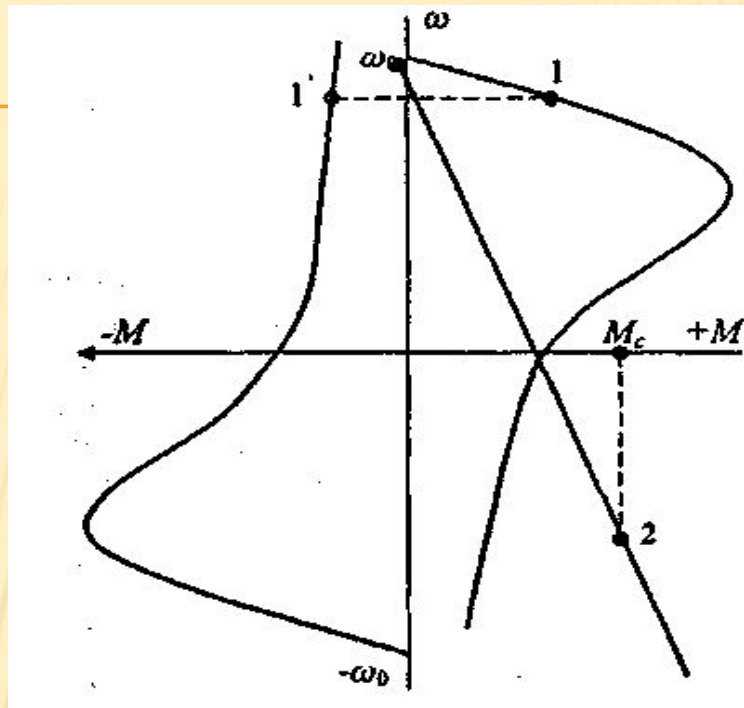


Рис.3.20. Режим противовключения асинхронного двигателя 1, Г - естественные механические характеристики при включении «вперед» и «назад» 2 - механическая характеристика двигателя с фазным ротором со включенным добавочным сопротивлением в цепь ротора.

Энергетически режим противовключения крайне неблагоприятен. Ток в этом режиме для асинхронных короткозамкнутых двигателей превосходит пусковой, достигая 10-кратного значения. Потери в роторной цепи двигателя складываются из потерь короткого замыкания двигателя и мощности, которая передается на вал двигателя при торможении

$$\Delta P_{\text{снб}} = M_m \omega_0 + M_m \omega_0$$

Для короткозамкнутых двигателей режим противовключения возможен только в течение нескольких секунд. При использовании двигателей с фазным ротором в режиме противовключения обязательно включение в цепь ротора добавочного сопротивления. В этом случае потери энергии остаются такими же значительными, но они выносятся из объема двигателя в роторные сопротивления.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЛЕЙ СТАТОРА И РОТОРА СОЗДАЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ НА ВАЛУ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ. ПРИ ОТСУТСТВИИ НАГРУЗКИ ВЕКТОРЫ ПОЛЯ СТАТОРА Φ_1 И ПОЛЯ РОТОРА Φ_0 СОВПАДАЮТ В ПРОСТРАНСТВЕ (СМ. РИС.3.24,А) И СОВМЕСТНО ВРАЩАЮТСЯ СО СКОРОСТЬЮ Ω_0 . ПРИ ПОЯВЛЕНИИ НА ВАЛУ ДВИГАТЕЛЯ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ВЕКТОРЫ Φ_1 И Φ_0 РАСХОДЯТСЯ (КАК БЫ РАСТЯГИВАЮТСЯ ПОДОБНО ПРУЖИНЕ) НА УГОЛ Θ , НАЗЫВАЕМЫЙ УГЛОМ НАГРУЗКИ, ПРИЧЕМ, ЕСЛИ ВЕКТОР Φ_0 ОТСТАЕТ ОТ ВЕКТОРА Φ_1 (СМ. РИС. 3.24,Б), ТО СИНХРОННАЯ МАШИНА РАБОТАЕТ В ДВИГАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ НА ЕЕ ВАЛУ ПОЛОЖИТЕЛЕН. ЕСЛИ СИНХРОННАЯ МАШИНА РАБОТАЕТ ГЕНЕРАТОРОМ, ПРИВОДИМЫМ ВО ВРАЩЕНИЕ ПЕРВИЧНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ, ТО ВЕКТОР ПОЛЯ РОТОРА ОПЕРЕЖАЕТ ВЕКТОР ПОЛЯ СТАТОРА НА УГОЛ $(-\Theta)$ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ НА ВАЛУ МАШИНЫ ОТРИЦАТЕЛЕН.

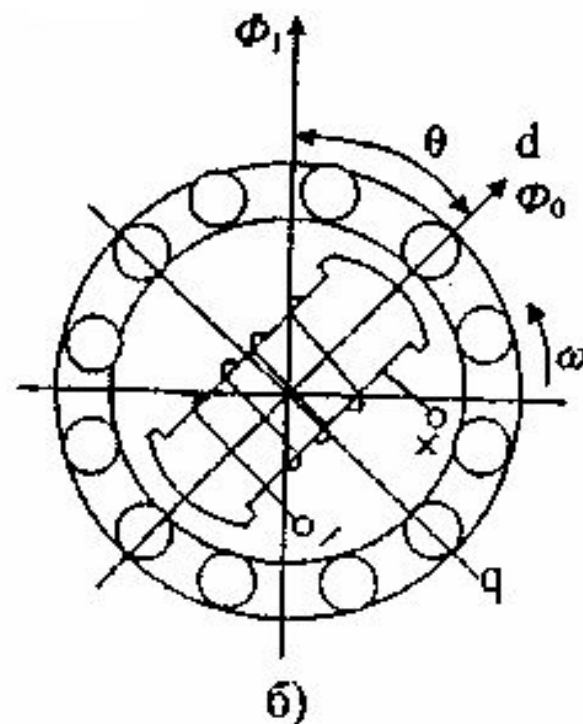
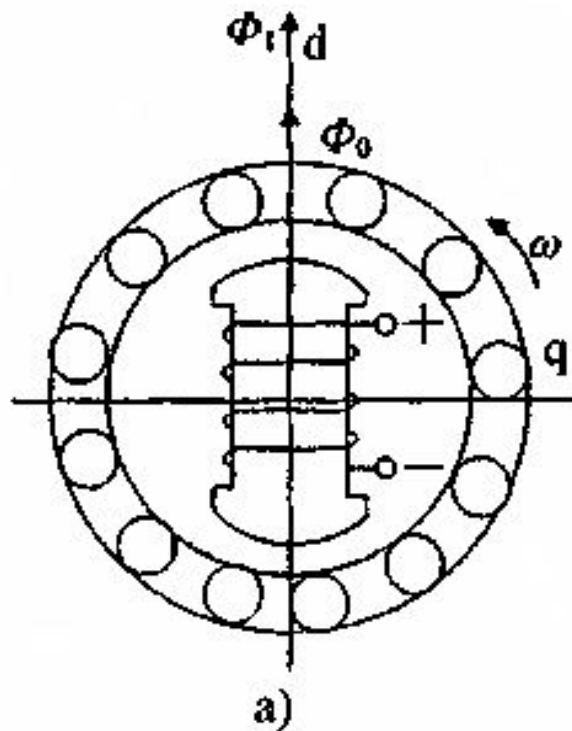
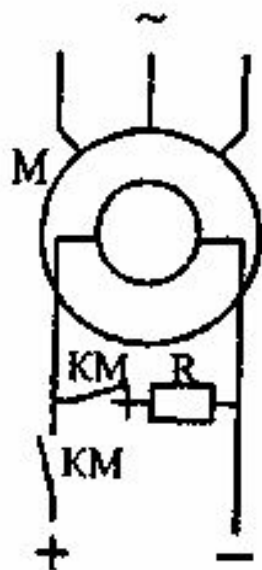


Рис.3.23. Схема электро-включения синхронного двигателя

Рис.3.24. Пространственные векторы магнитных полей синхронного двигателя
а) идеальный холостой ход;
б) при нагрузке на валу

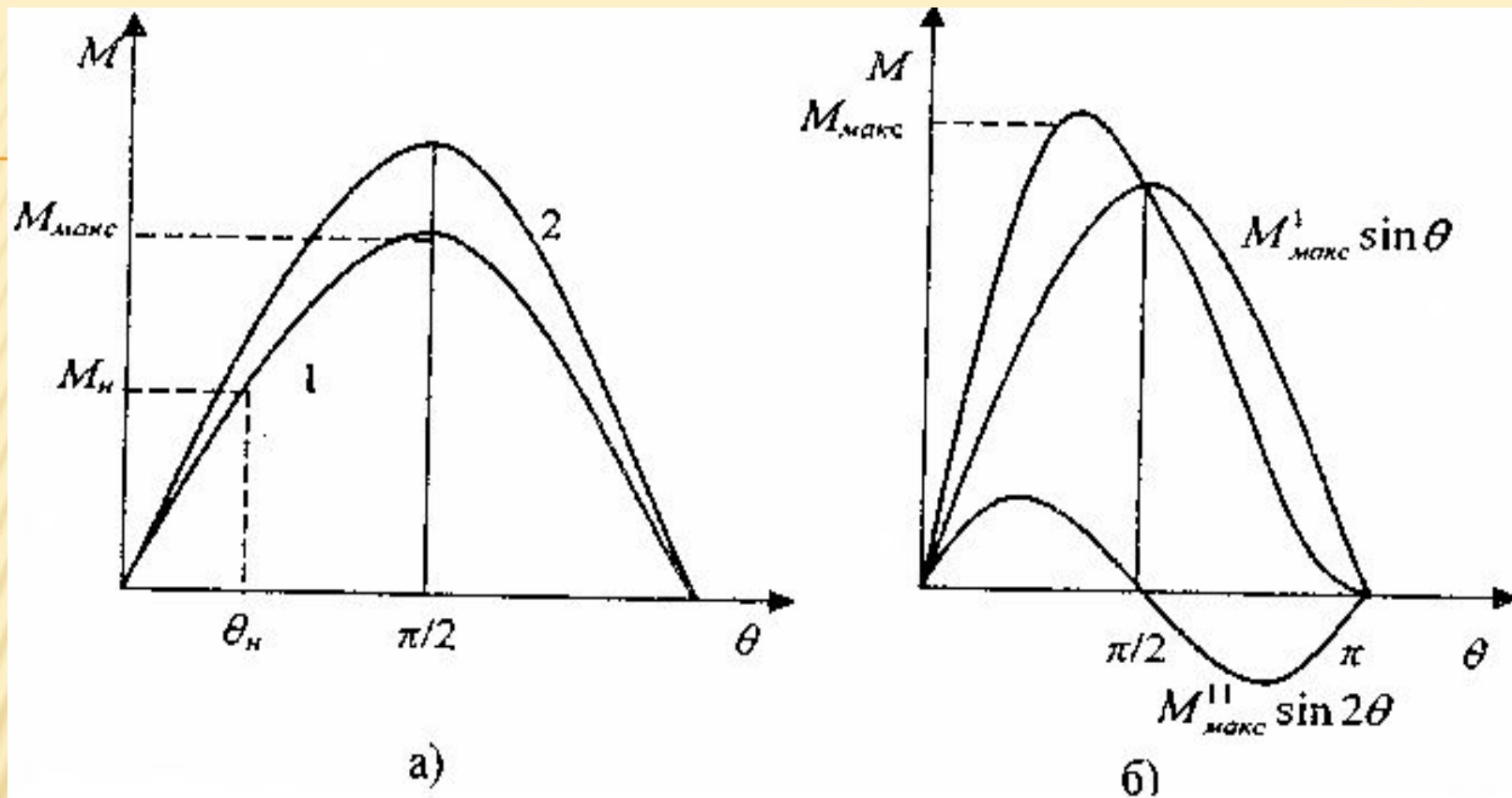


Рис.3.27. Угловая характеристика синхронного двигателя:
 а) неявнополюсной машины; б) явнополюсной машины
 1 - при номинальном потоке возбуждения;
 2 - при форсировке возбуждения

Угловая характеристика (см. рис.3.27,б) для такого двигателя описывается уравнением:

$$M = \frac{3U_1 E_1}{\omega_0 x_1} \sin \theta + \frac{3U_1^2}{2\omega_0} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

где x_d и x_q – индуктивное сопротивление по продольной и поперечной осям.

Режимы работы синхронного двигателя

Поскольку синхронный двигатель имеет в синхронном режиме одну рабочую скорость, то пуск этих двигателей осуществляется в асинхронном режиме. Для этого в конструкции ротора предусмотрена короткозамкнутая обмотка, конструкция которой аналогична клетке ротора асинхронного короткозамкнутого двигателя. В синхронных двигателях со скоростью вращения 3000 об/мин ротор имеет массивную конструкцию, и роль пусковой клетки играет само тело ротора. При разгоне до подсинхронной скорости двигатель работает как асинхронный короткозамкнутый с механической характеристикой 2 (см. рис.3.25). По достижении подсинхронной скорости (точка а), которая должна быть не менее чем $0,95 \omega_0$, в обмотку возбуждения подается постоянный ток, и двигатель втягивается в синхронизм, переходя на работу в точке б, соответствующей синхронному режиму.

При работе в установившемся режиме с синхронной скоростью ток в пусковой клетке не протекает. Пусковая клетка ротора рассчитывается на кратковременный режим работы, и длительная (свыше 20–30с) работа в асинхронном режиме недопустима.

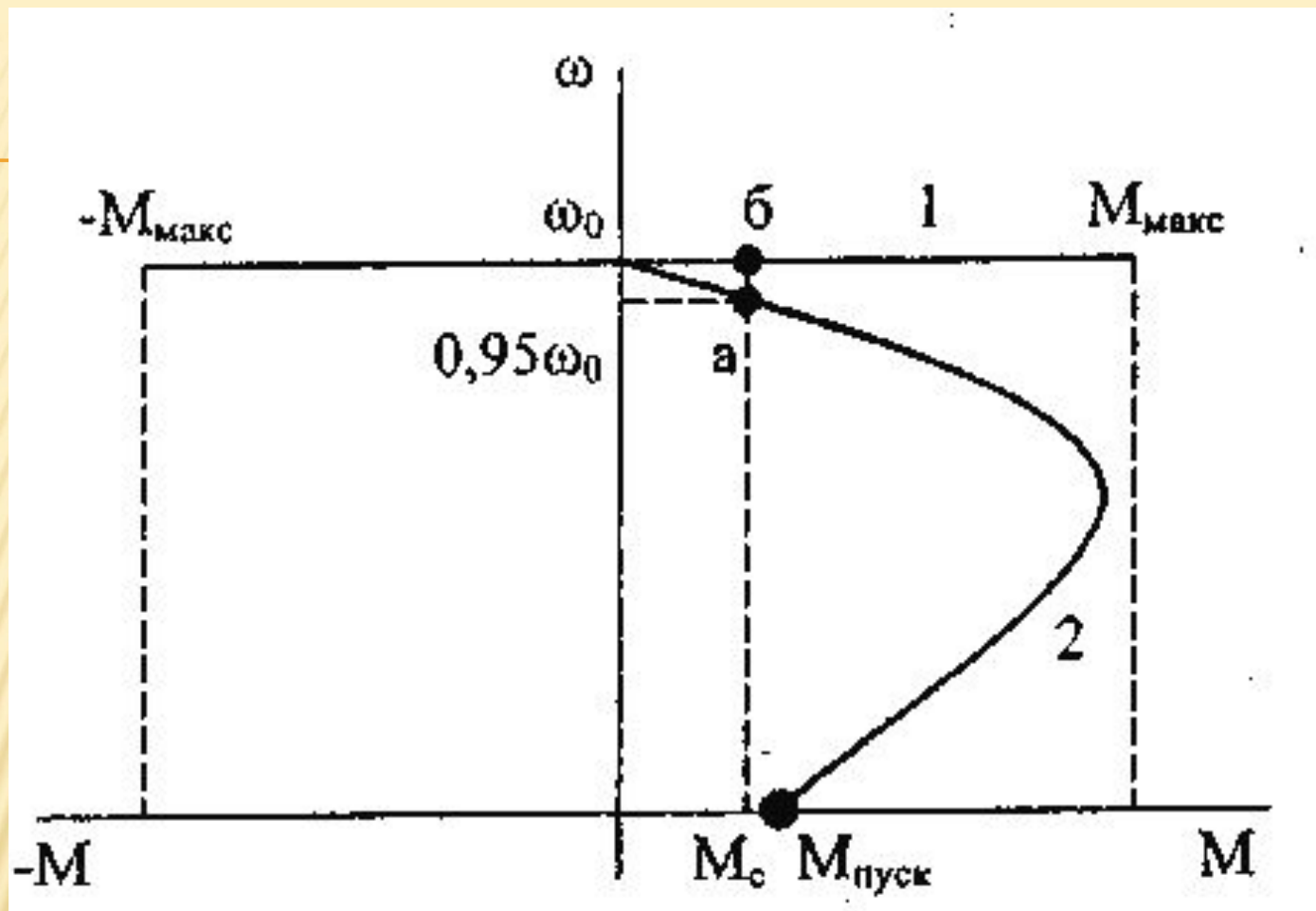
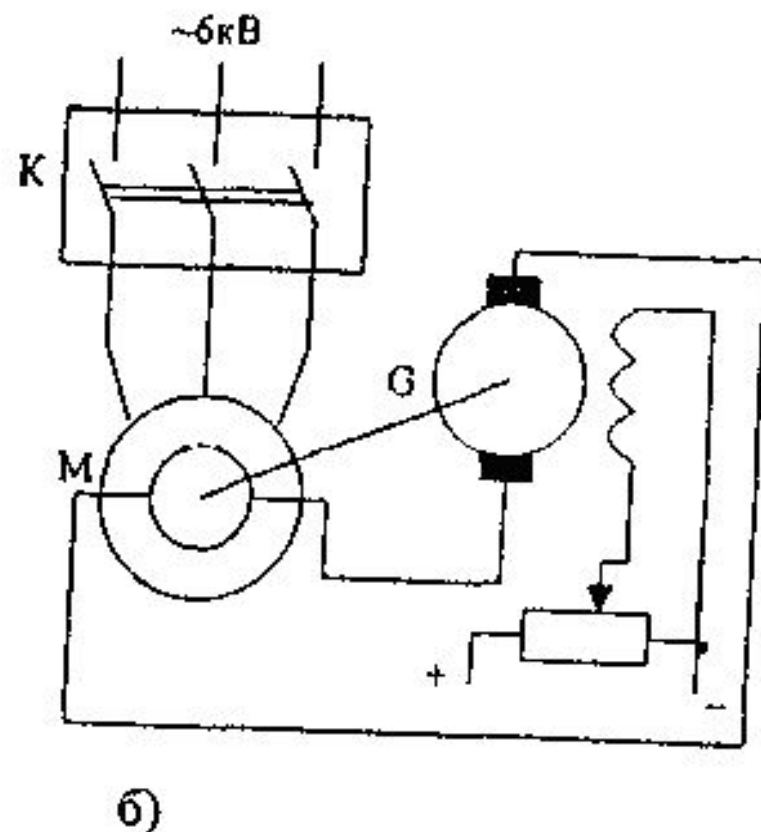
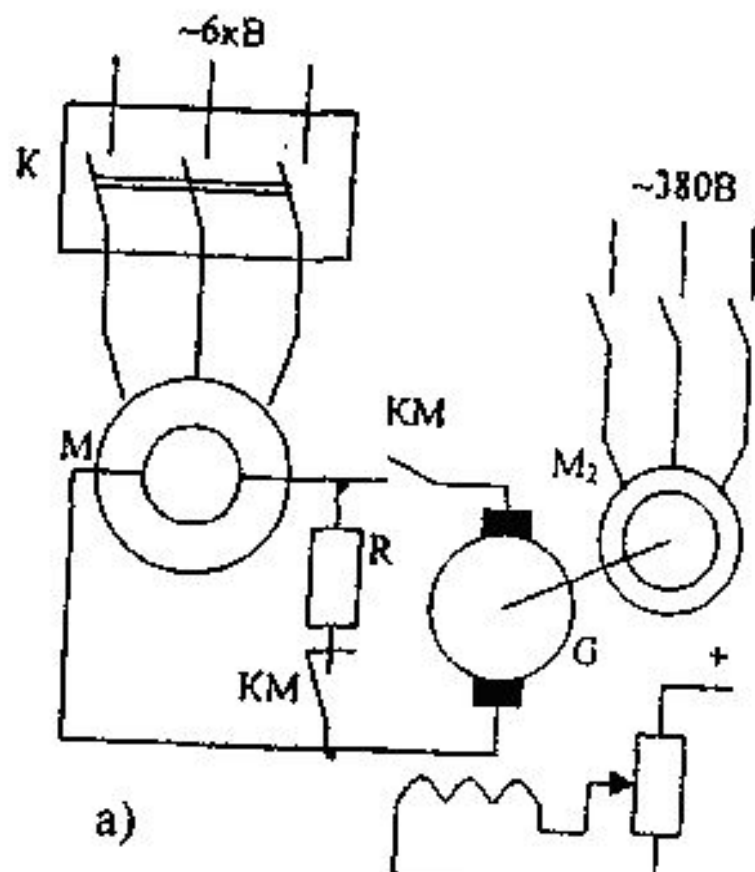
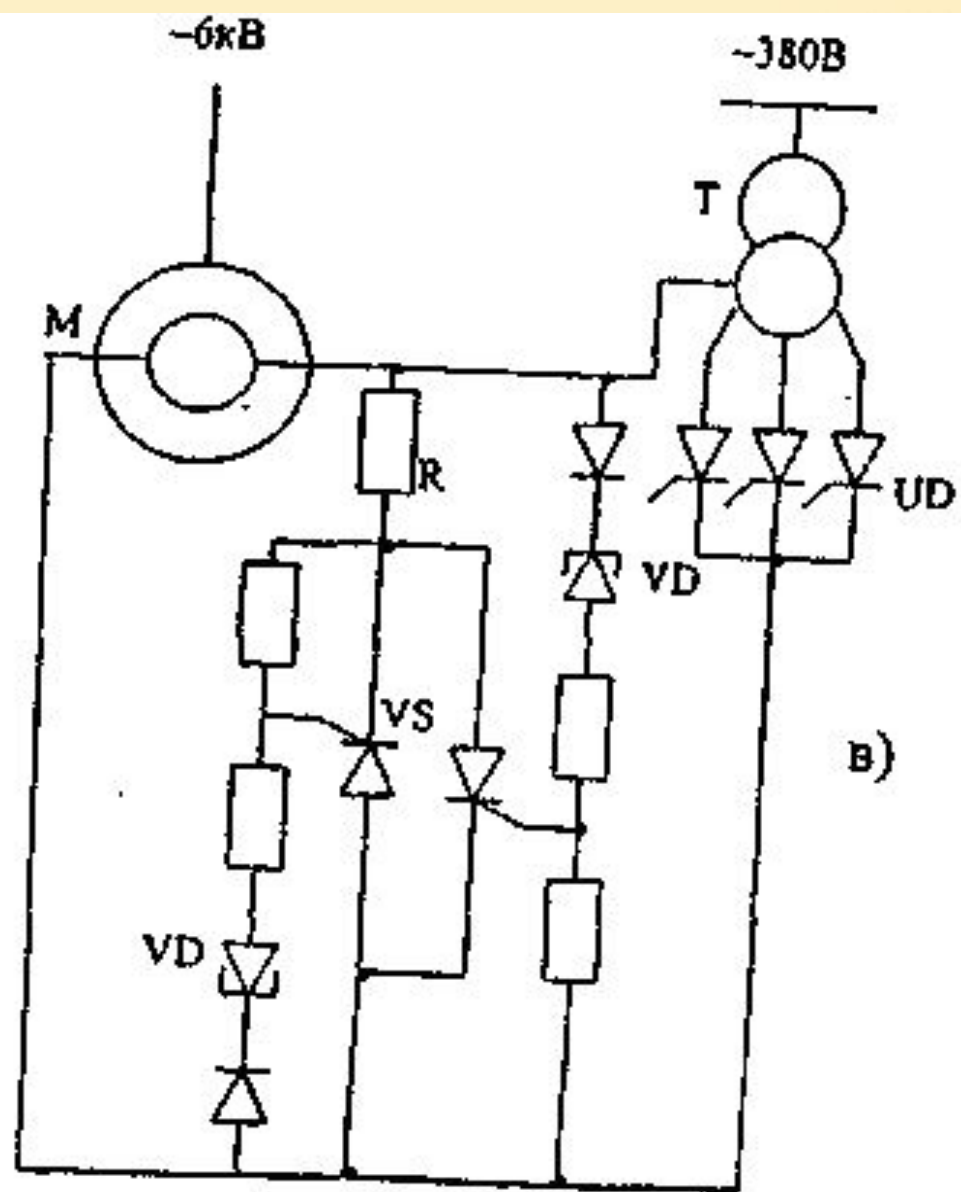


Рис.3.25. Механические характеристики синхронного двигателя

1 - характеристика синхронного режима

2 - пусковая характеристика (асинхронный режим)





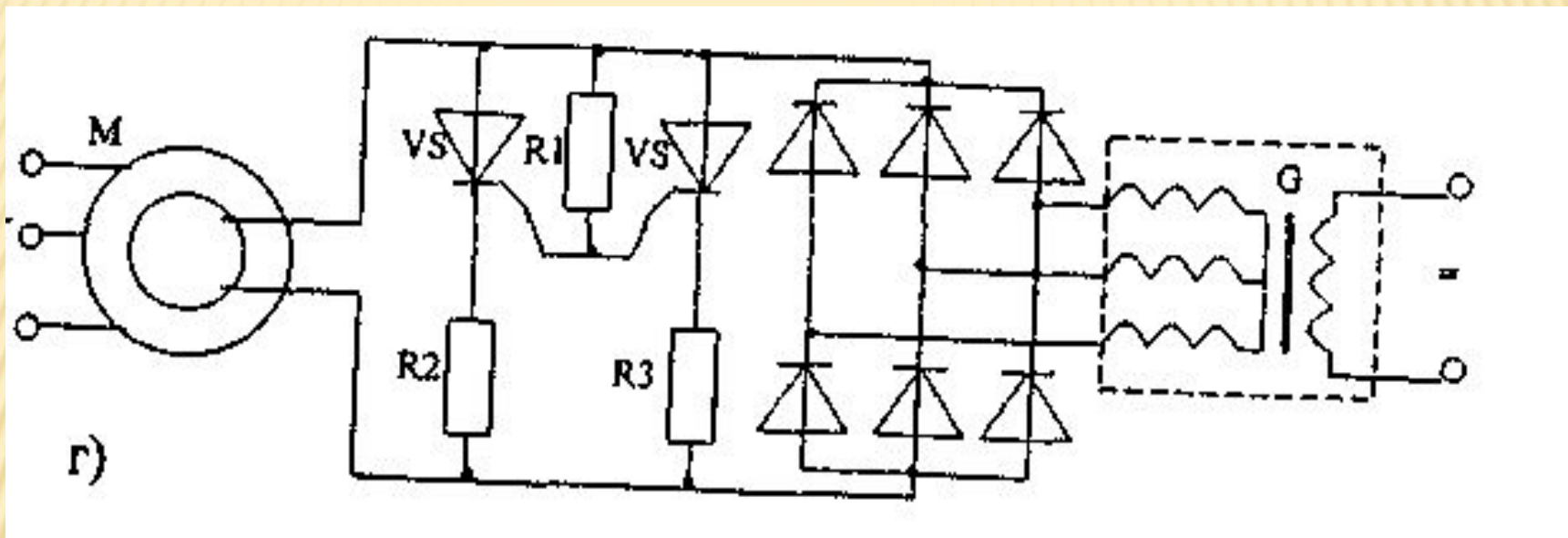


Рис.3.28. Схемы возбуждения синхронного двигателя

Регулирование тока возбуждения синхронного двигателя

Важным достоинством синхронных двигателей является возможность регулирования величины реактивной мощности, циркулирующей в цепи статора, в том числе возможность, работая двигателем, т.е. потребляя активную мощность, одновременно генерировать реактивную мощность, т.е. работать компенсатором реактивной мощности, потребляемой другими параллельно работающими приемниками электрической энергии, прежде всего асинхронными двигателями.

Применение на предприятиях наряду с асинхронными синхронных двигателей позволяет уменьшить реактивную мощность, потребляемую предприятием в целом, и поддерживать нормативное значение $\cos\varphi$ в энергосистеме данного предприятия.

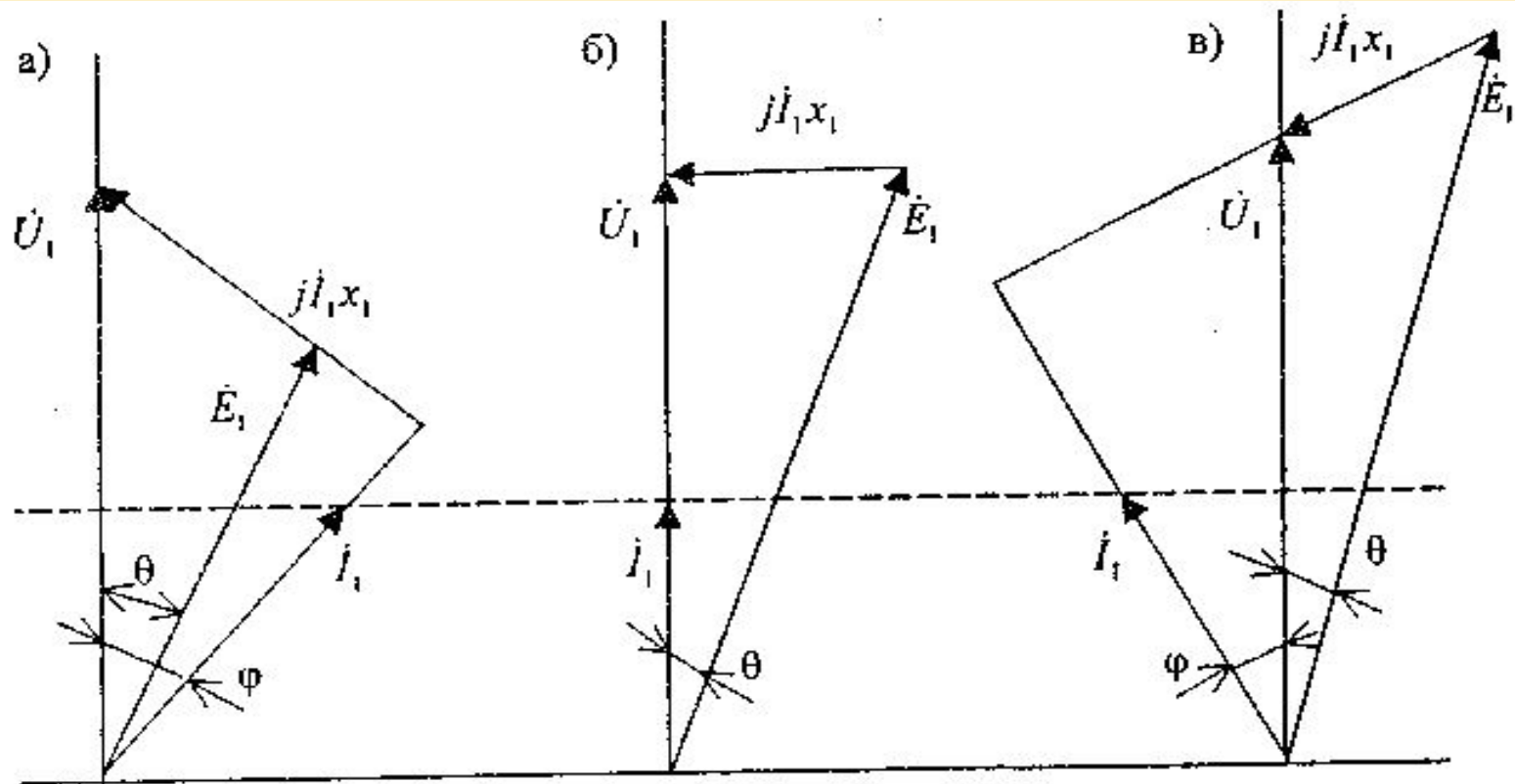


Рис.3.29. Векторные диаграммы синхронного двигателя при разных токах возбуждения и одинаковой нагрузке на валу

Зависимость тока статора от тока возбуждения синхронного двигателя отражается U – образными характеристиками синхронного двигателя, представленными на рис.3.30.

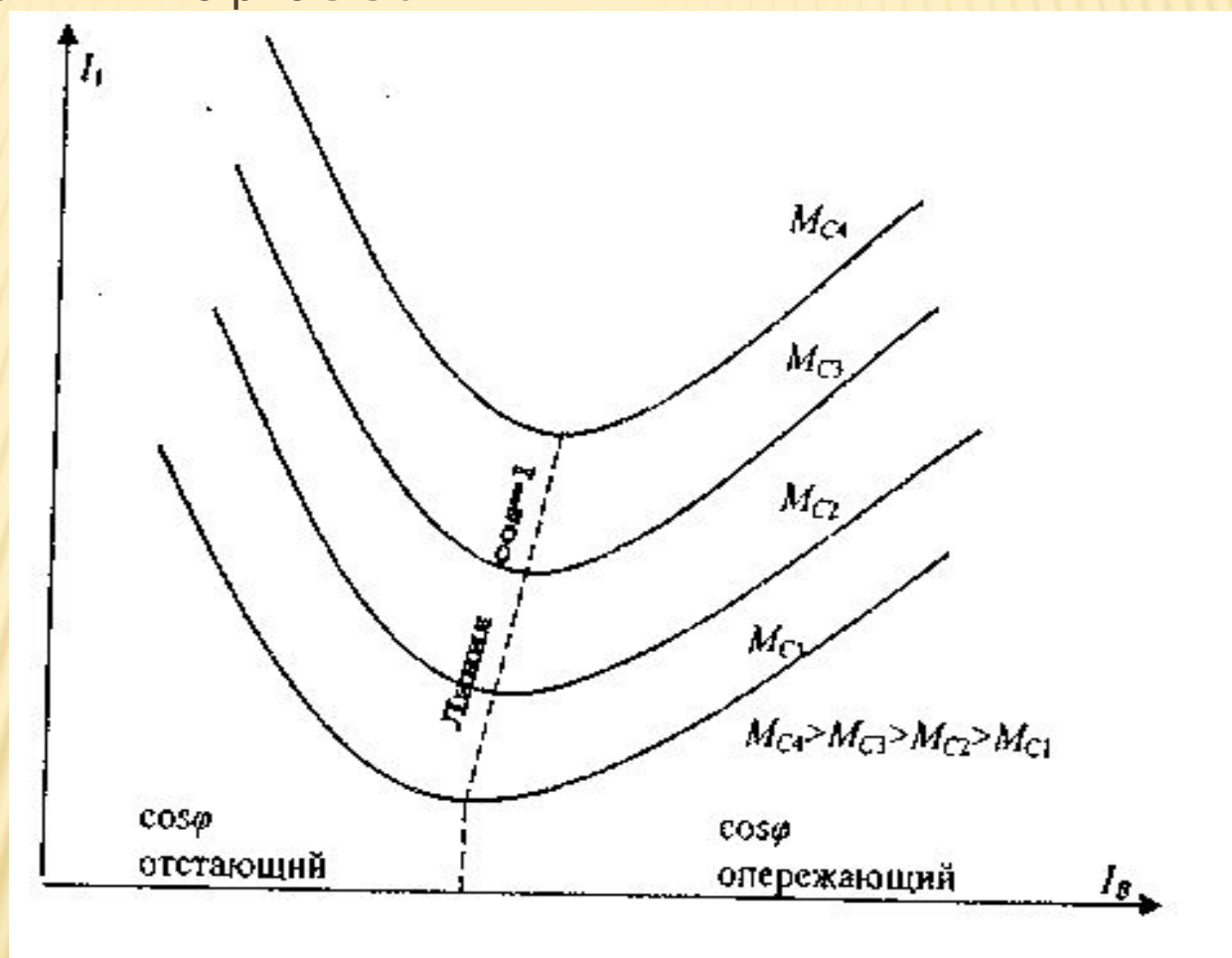


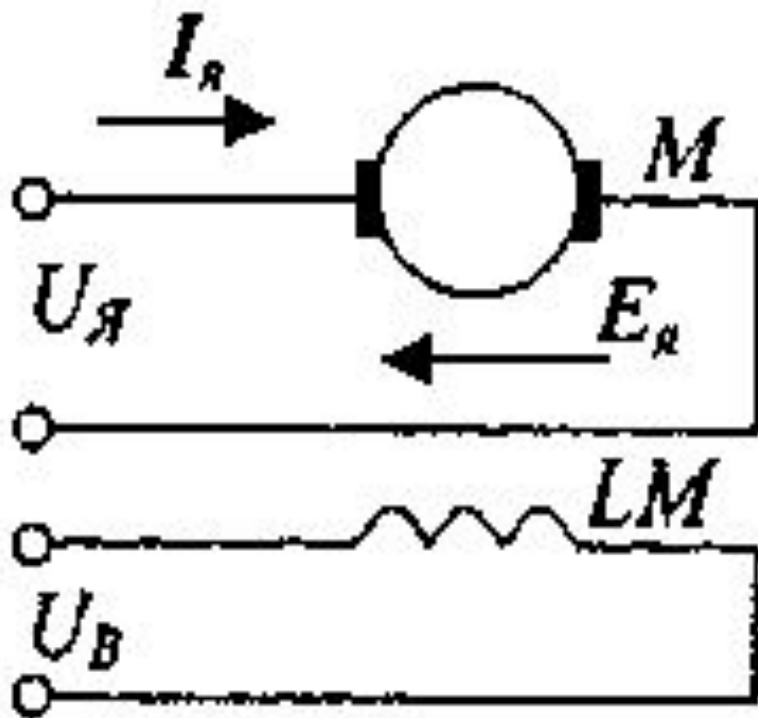
Рис.3.30. U-образные характеристики синхронного двигателя

РЕГУЛИРУЕМЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

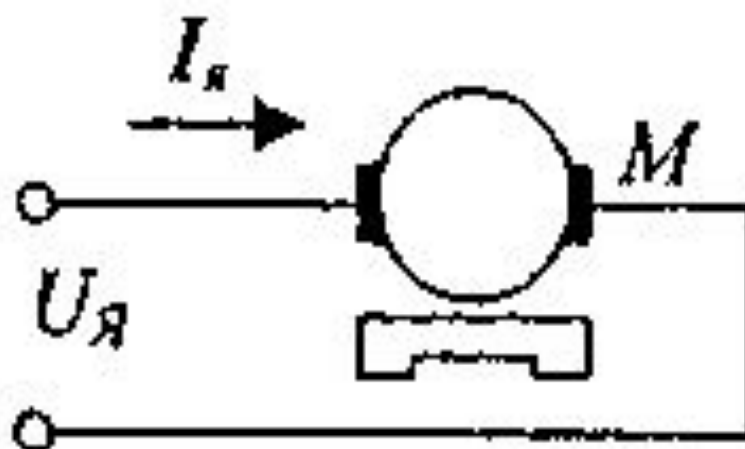
Электромеханические характеристики двигателей постоянного тока независимого возбуждения

Двигатели постоянного тока традиционно являлись основой регулируемого электропривода и широко применяются во всех областях техники. Только в последние годы началось интенсивное использование регулируемых электроприводов на базе двигателей переменного тока.

Напряжение, подводимое к якорной цепи двигателя, в установившемся режиме уравнивается падением напряжения на сопротивлениях цепи якоря и противоэ.д.с. якоря, которая наводится в обмотке якоря при его вращении в электромагнитном поле, создаваемом обмоткой возбуждения (см. рис.5.1,а)



а)



б)

Рис.5.1. Схема включения двигателей постоянного тока независимого возбуждения
а) с электромагнитным возбуждением; б) с возбуждением от постоянных магнитов

$$U_{\text{я}} = E_{\text{я}} + R_{\text{я}} I_{\text{я}} \quad (5.1)$$

$R_{\text{я}}$ – сопротивление якорной цепи, складывающееся из сопротивления обмотки якоря $R_{\text{оя}}$, обмотки дополнительных полюсов $R_{\text{дп}}$, компенсационной обмотки $R_{\text{ко}}$ (если она имеется) и внутреннего сопротивления источника питания двигателя $R_{\text{п}}$ (если оно учитывается)

$$R_{\text{я}} = R_{\text{оя}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ко}} + R_{\text{п}}$$

Э.д.с. якоря $E_{\text{я}}$ равна

$$E_{\text{я}} = k \Phi \omega \quad (5.2)$$

где Φ – поток возбуждения (Вб);

$k = p_{\text{п}} N / 2\pi a$ – конструктивная постоянная двигателя; где $p_{\text{п}}$ – число пар полюсов машины; N – число активных проводников обмотки якоря; a – число параллельных ветвей обмотки якоря.

Момент, развиваемый двигателем, пропорционален току якоря и потоку возбуждения

$$M = k \Phi I_{\text{я}} \quad (5.3)$$

Из уравнений (5.1), (5.2) и (5.3) легко получить зависимость скорости от тока якоря $\omega = f(I_{\text{я}})$, которая называется электромеханической характеристикой двигателя, и зависимость скорости от момента двигателя $\omega = f(M)$ – механическую характеристику привода.

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{k\Phi} \quad (5.4)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}} M}{(k\Phi)^2} \quad (5.5)$$



Рис.5.2. Естественная механическая характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Жесткость естественной механической характеристики β для рассматриваемых двигателей обычно высока и равна

$$\beta = \frac{C^2}{R_{\text{я}}} = \frac{(\kappa\Phi)^2}{R_{\text{я}}} \quad (5.11)$$

Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения представляют собой прямые, пересекающие ось ординат в точке идеального холостого хода ω_0 , величина которой равна

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{я}}}{\kappa\Phi} = \frac{U_{\text{я}}}{C} \quad (5.12)$$

Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения может производиться тремя способами:

1. Введением добавочного сопротивления в цепь якоря.
2. Изменением величины напряжения, питающего якорную цепь двигателя, при постоянном потоке возбуждения.
3. Изменением тока возбуждения, т.е. изменением магнитного потока двигателя.

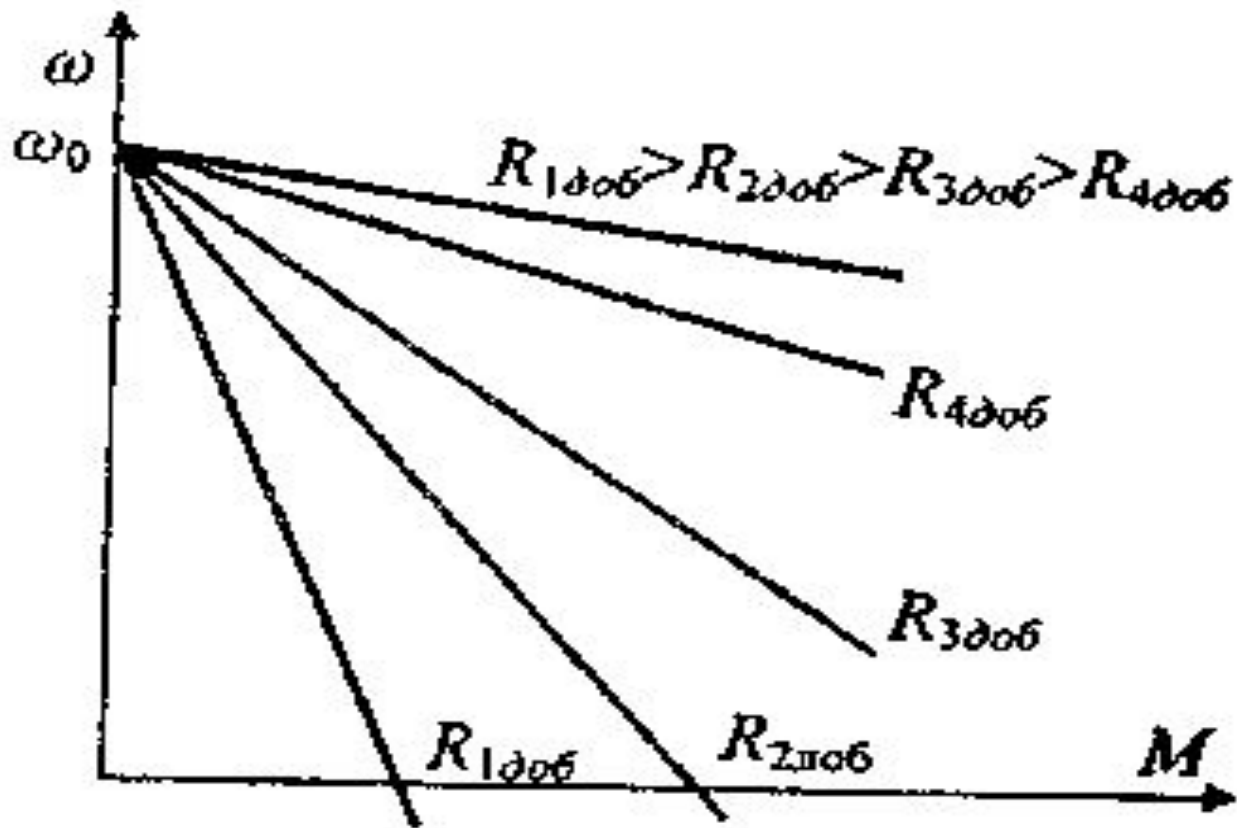


Рис.5.3. Реостатные механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

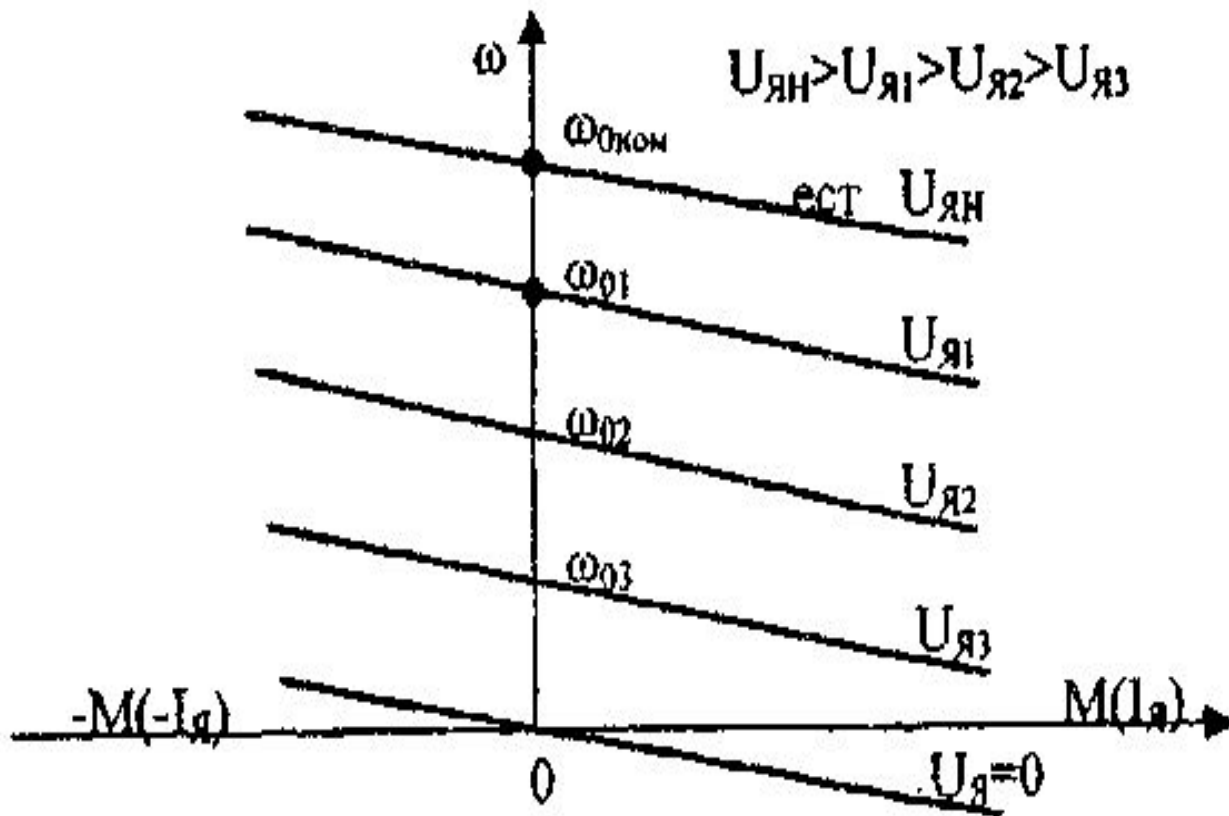


Рис.5.4. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при регулировании напряжения якоря

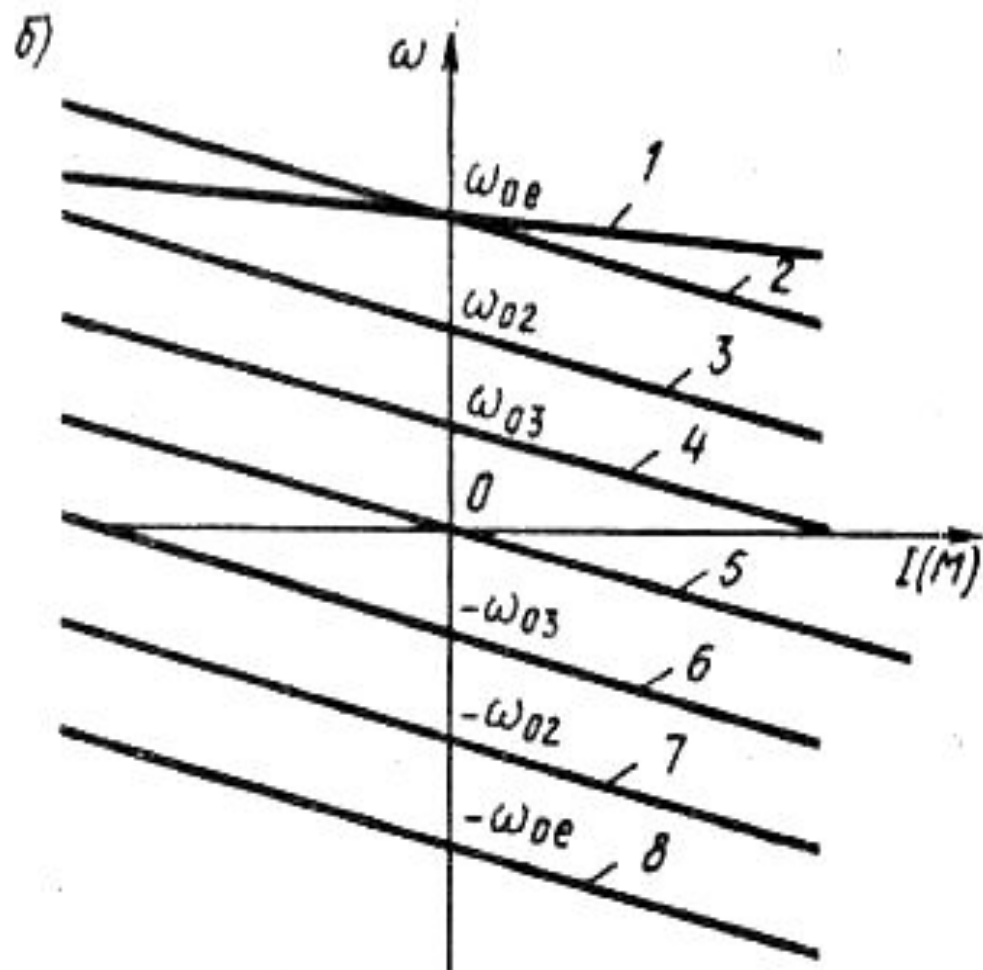
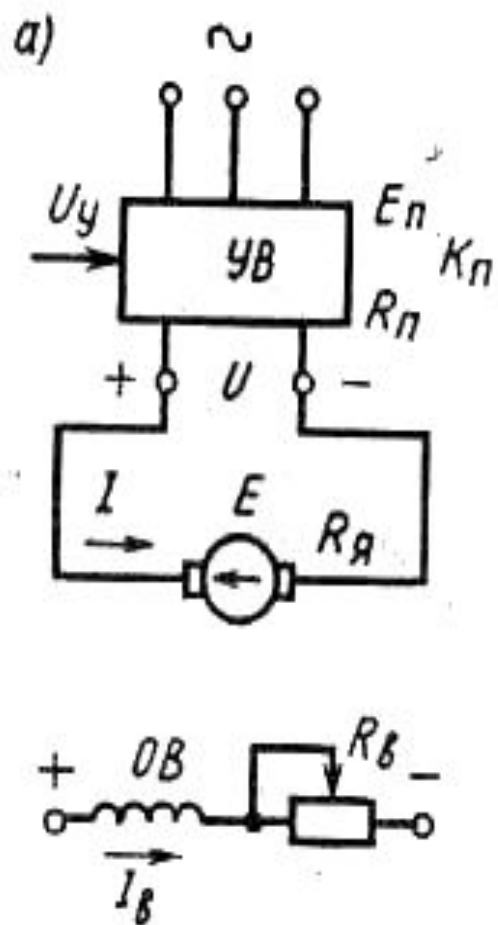


Рис 4.11. Схема включения двигателя ДПТ НВ (а) и его характеристики при регулировании напряжения (б)

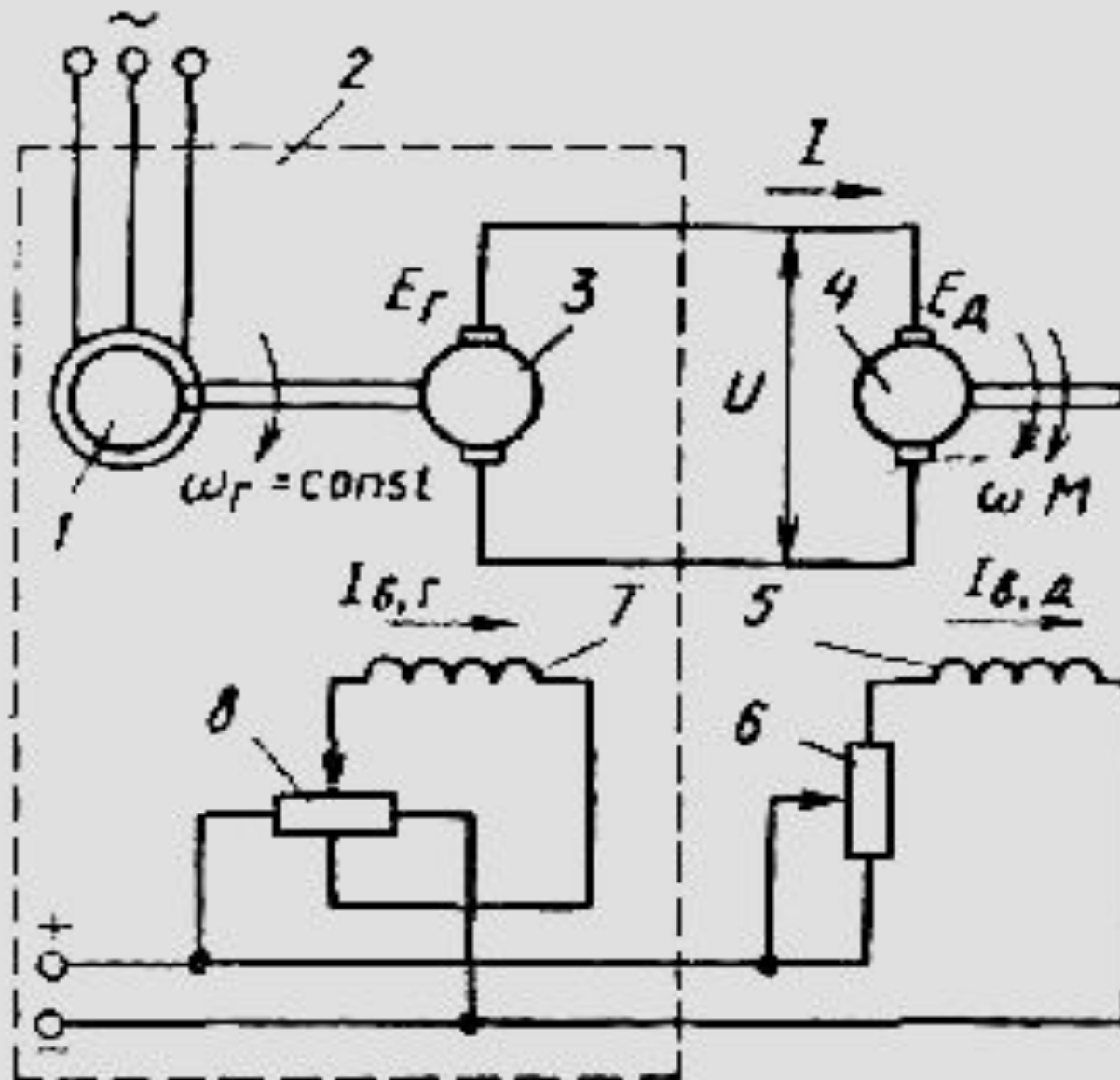


Рис 4.12. Схема системы Г – Д

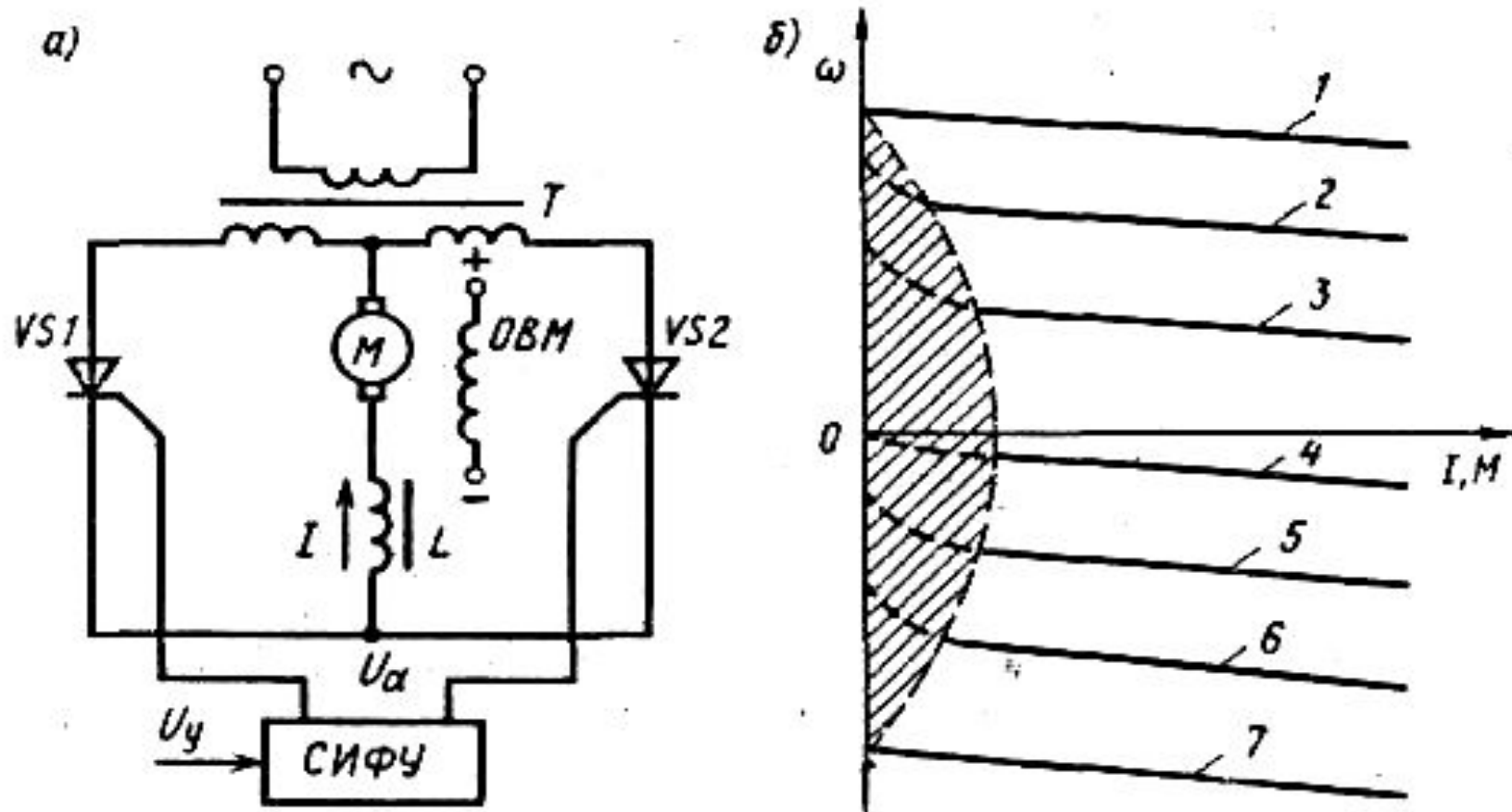


Рис 4.13. Схема системы ТП – Д (а) и характеристики двигателя (б)

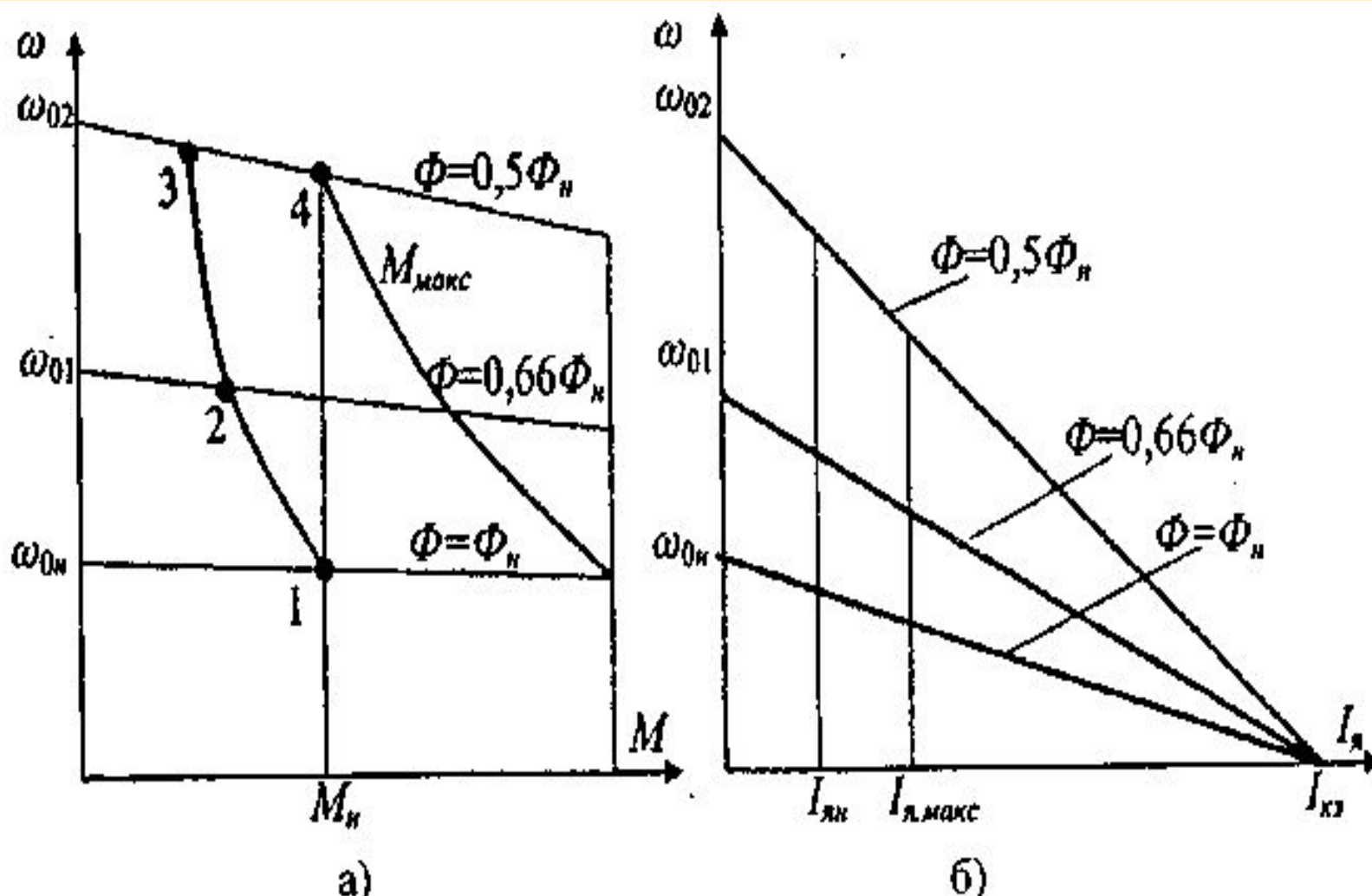


Рис.5.5. Механические (а) и электромеханические (б) характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при уменьшении потока возбуждения и номинальном напряжении якоря

Увеличение тока возбуждения выше номинального нецелесообразно, так как вследствие насыщения магнитной цепи машины существенного возрастания магнитного потока не произойдет, а тепловой режим двигателя нарушится. Электромеханические характеристики двигателя при ослаблении поля $\omega = f(I_{\text{я}})$ будут иметь вид, показанный на рис.5.5,6. Эти характеристики, как следует из (5.4), на оси абсцисс сходятся в одной точке, соответствующей току короткого замыкания $I_{\text{кз}} = U_{\text{я}} / R_{\text{я}}$.

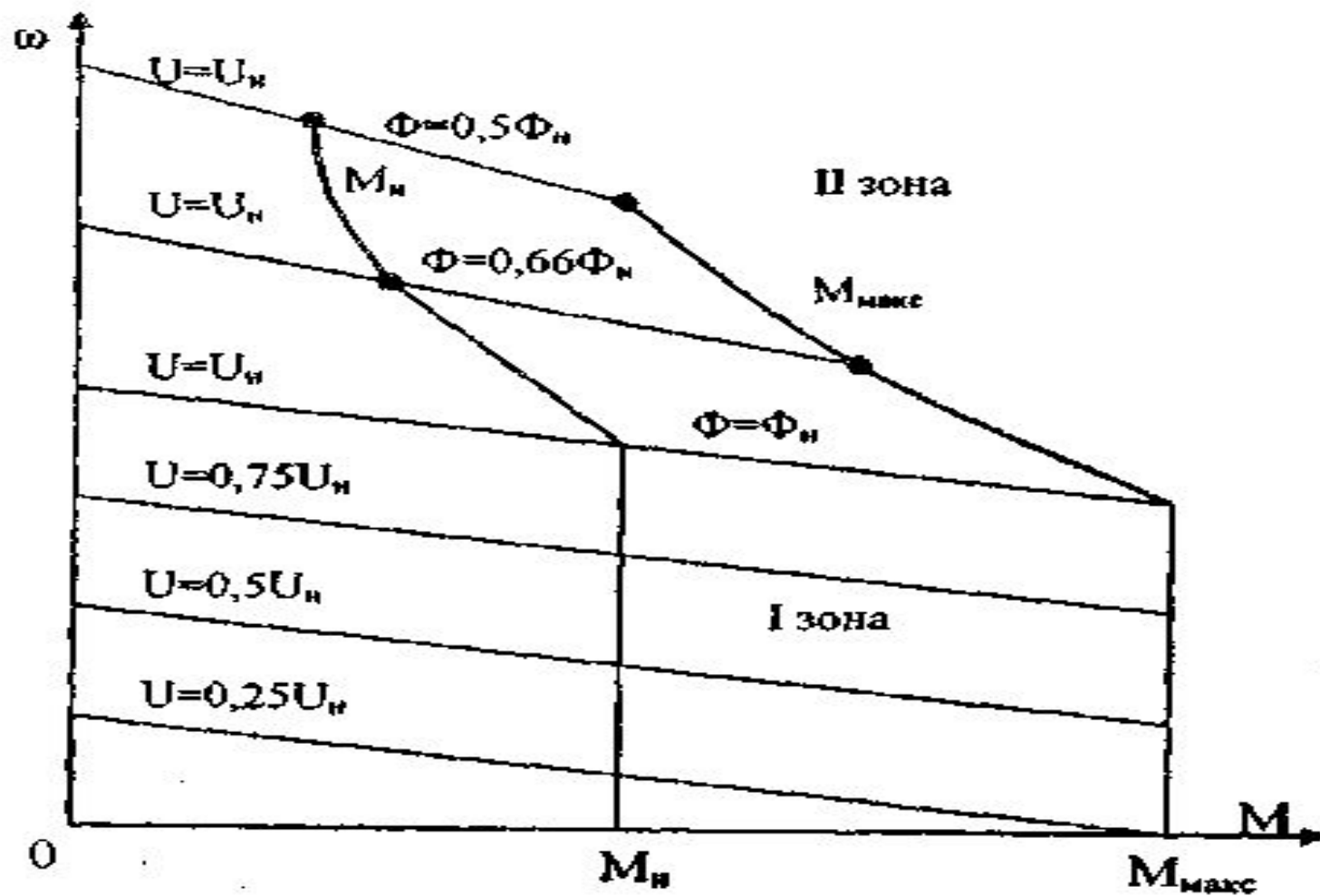


Рис.5.6. Двухзонное регулирование скорости двигателя постоянного тока

Линия номинального момента при ослаблении поля отображается кривой 1-2-3. Аналогично при ослаблении поля уменьшается допустимый максимальный момент, определяемый по условиям коммутации на коллекторе. Поскольку при ослаблении поля скорость увеличивается примерно пропорционально степени ослабления поля $\Phi_n / \Phi_{осл}$, а длительно допустимый момент $M_{доп}$ уменьшается пропорционально отношению $\Phi_{осл} / \Phi_n$, то длительно допустимая мощность двигателя $P = M_{доп} \omega$ остается примерно постоянной. Поэтому регулирование ослаблением поля называют регулированием с постоянной мощностью в отличие от регулирования изменением напряжения якоря при постоянном потоке возбуждения, которое называют регулированием с постоянным моментом.

Для электроприводов многих механизмов используют комбинированное управление, так называемое двухзонное регулирование скорости. Механические характеристики для этого способа управления показаны на рис.5.6. В первой зоне скорость двигателя в диапазоне от нуля до основной скорости $\omega_{он}$ регулируется изменением напряжения якоря при постоянном потоке возбуждения Φ_n . Во второй зоне регулирование производится изменением тока (потока) возбуждения при постоянном номинальном напряжении якоря. Соответственно номинальный момент в первой зоне регулирования остается постоянным, а во второй зоне снижается пропорционально уменьшению потока. Максимально допустимая скорость двигателя при ослаблении поля определяется механической прочностью якоря и условиями коммутации на коллекторе. Эта скорость указывается в каталоге на двигатели.

Тормозные режимы

Электродвигатели постоянного тока независимого возбуждения могут работать в трех тормозных режимах: режиме рекуперативного торможения, динамического торможения и торможения противовключением.

Режим рекуперативного генераторного торможения имеет место, когда скорость двигателя превышает скорость холостого хода $\omega > \omega_0$ (рис. 5.7).

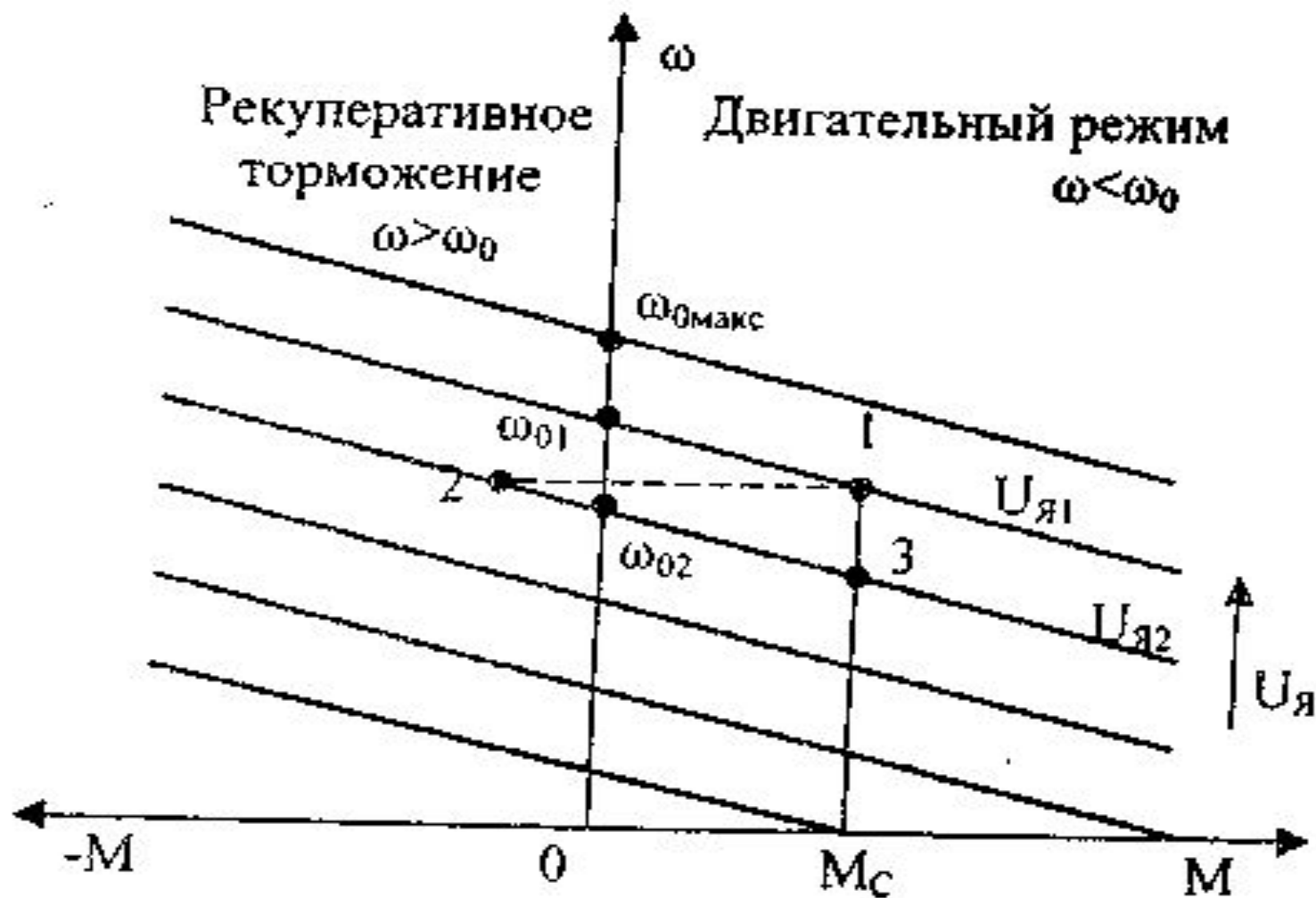


Рис.5.7. Механические характеристики двигателя постоянного тока в двигательном режиме и режиме рекуперативного торможения

При этом э.д.с. якоря $E_{\text{я}}$ превышает величину напряжения питания якорной цепи

$E_{\text{я}} > U_{\text{я}}$ и ток в якорной цепи пойдет под действием э.д.с. якоря $E_{\text{я}}$; знак тока будет противоположен знаку напряжения питания, что означает, что энергия торможения отдается в сеть питания постоянного тока. Отсюда следуют три условия существования режима рекуперативного торможения.

1. Цепь питания должна обеспечивать возможность протекания тока встречно напряжению источника питания; это условие особенно важно в случае питания двигателя постоянного тока от полупроводниковых преобразователей, элементы которых обладают односторонней проводимостью тока.
2. Источник питания должен обладать возможностью воспринимать отдаваемую двигателем энергию и передавать ее в питающую сеть; так режим рекуперативного торможения невозможен, если привод получает питание от автономной дизельгенераторной установки.
3. Для того чтобы рекуперативное торможение было возможно в пределах заданного диапазона регулирования скорости, регулирование должно производиться путем изменения напряжения, подводимого к якорной цепи двигателя.

Основными достоинствами рекуперативного торможения являются: энергетическая эффективность, связанная с полезным использованием энергии торможения; высокая жесткость механических характеристик; плавный переход из двигательного в тормозной режим на одной и той же характеристике. Благодаря такому характеру механических характеристик улучшается качество управления приводом.

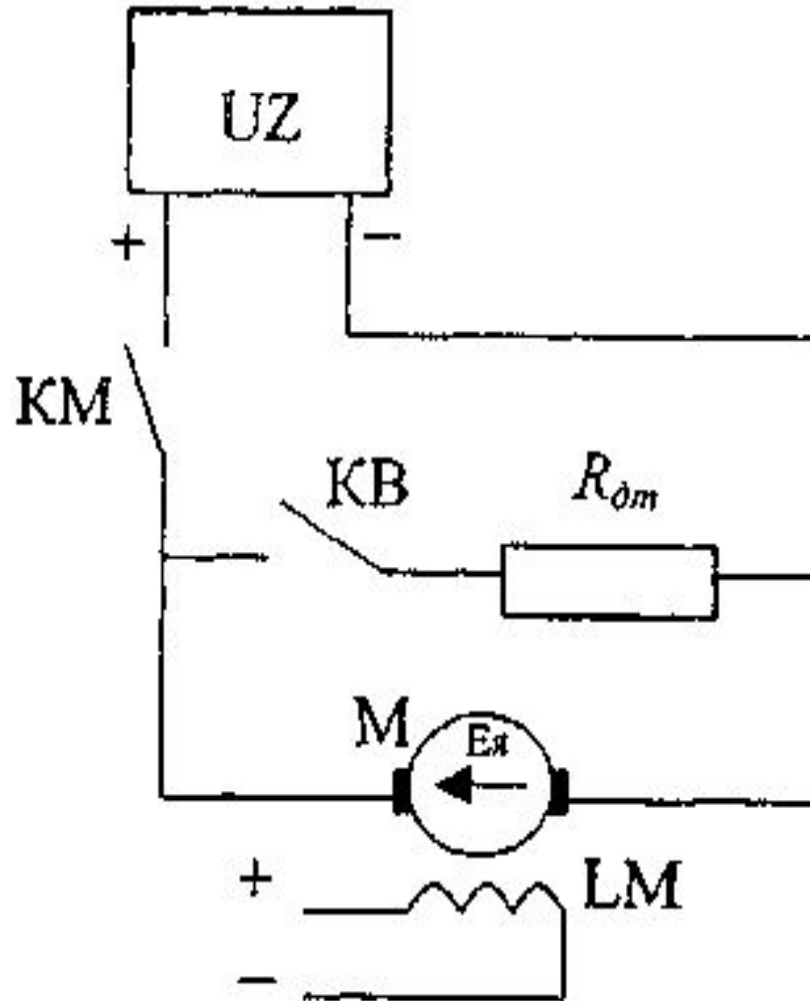


Рис.5.8. Схема динамического торможения ДПТ-НВ

Вторым возможным тормозным режимом является режим динамического торможения. В этом режиме якорь двигателя отключается от источника $K_{\text{дт}}$ постоянного тока (см. рис.5.8) и замыкается на сопротивление динамического торможения. Питание обмотки возбуждения при этом должно быть обязательно сохранено.

Достоинством режима динамического торможения является его высокая надежность, определяемая тем, что этот режим может осуществляться при исчезновении питающего напряжения и в случае выхода из строя источника питания цепи якоря, когда режим рекуперативного торможения становится невозможен. Исходя из этого, динамическое торможение в приводах постоянного тока часто используется в качестве средства аварийного торможения.

Торможение противовключением не характерно для двигателей постоянного тока независимого возбуждения. Этот режим может использоваться в приводах малой мощности с широтноимпульсным регулятором тока, позволяющим ограничить ток торможения допустимой величиной.

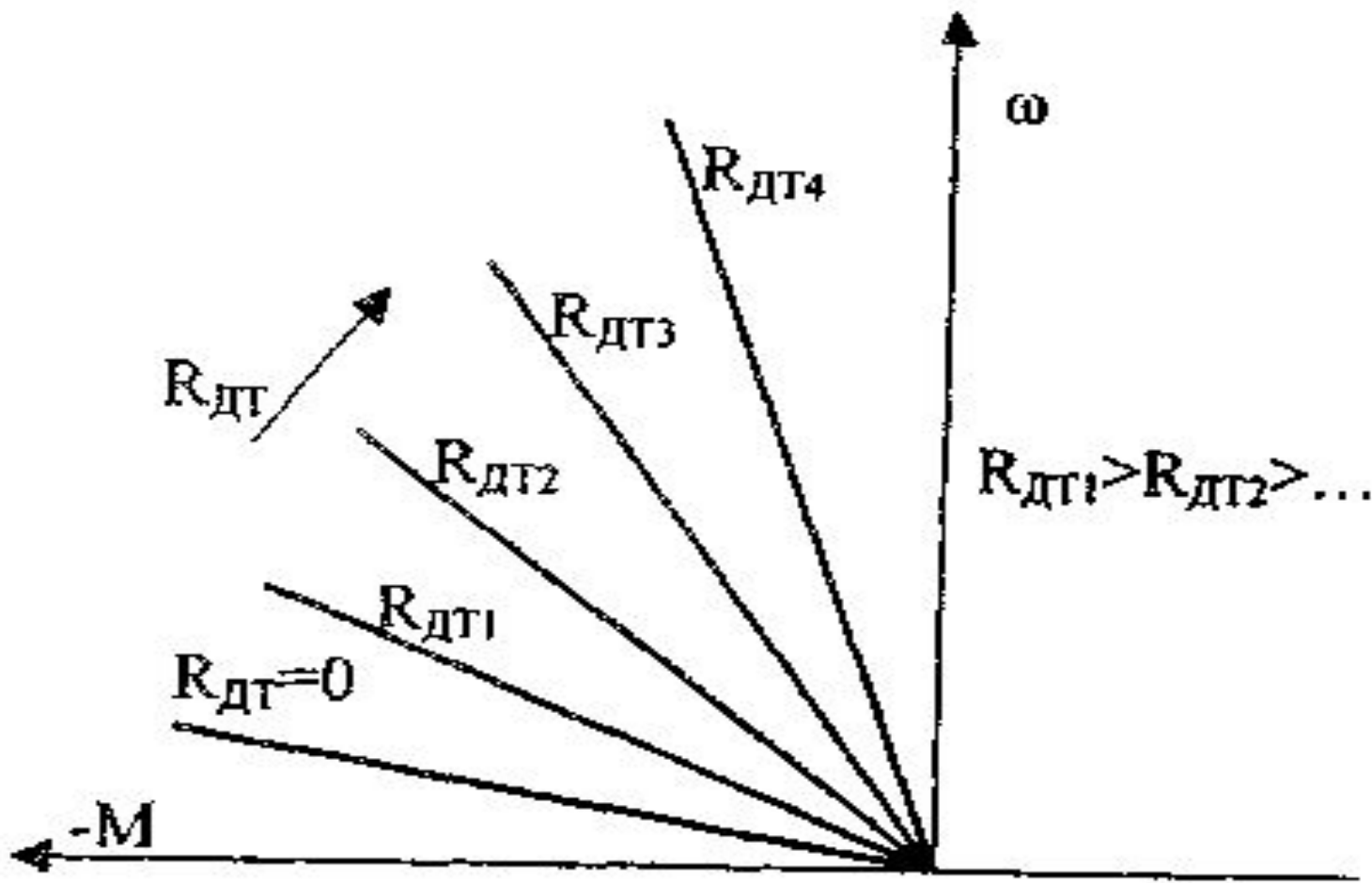


Рис.5.9. Механические характеристики ДПТ-НВ в режиме динамического торможения

Электропривод с двигателями постоянного тока с последовательным возбуждением

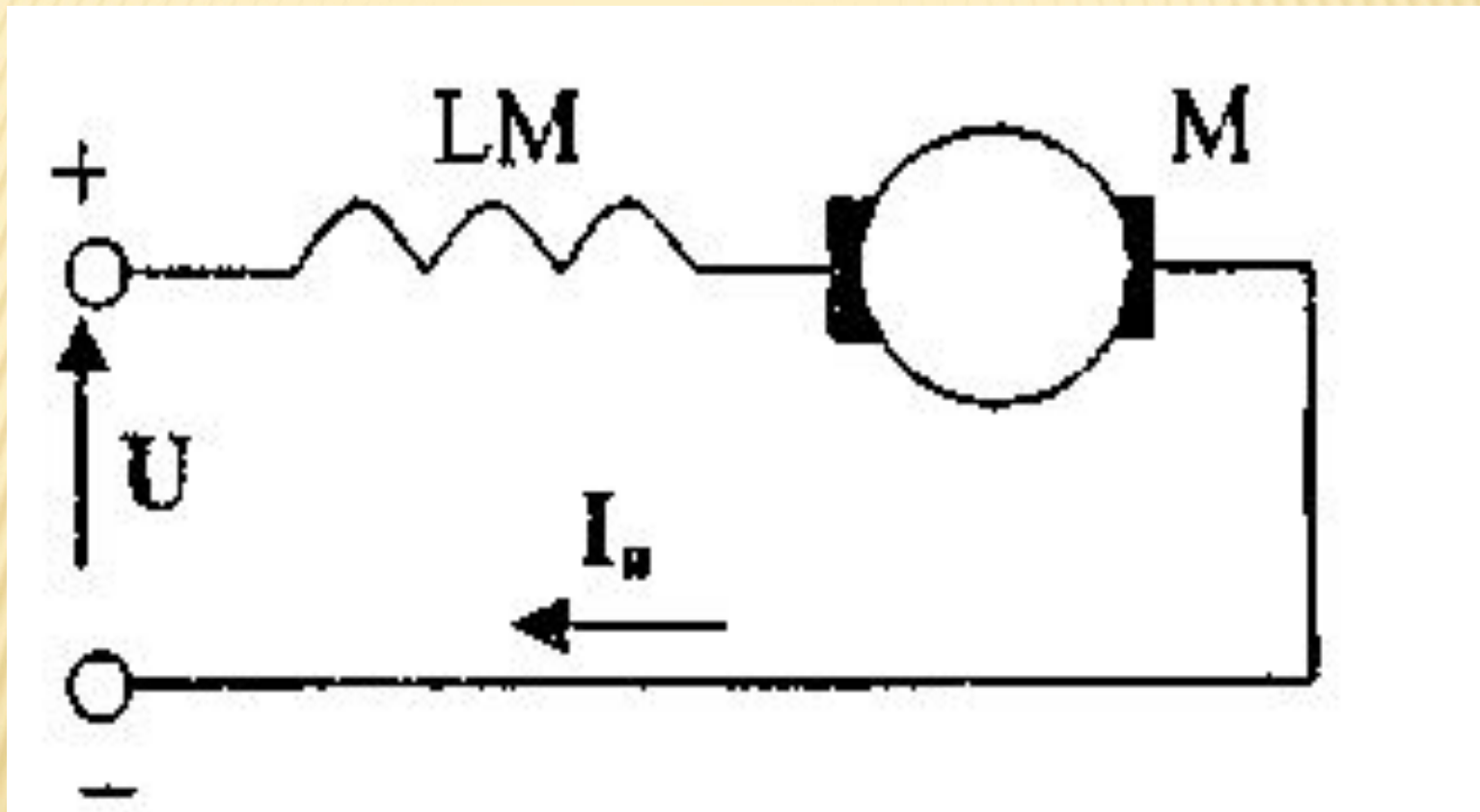


Рис.5.16. Схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

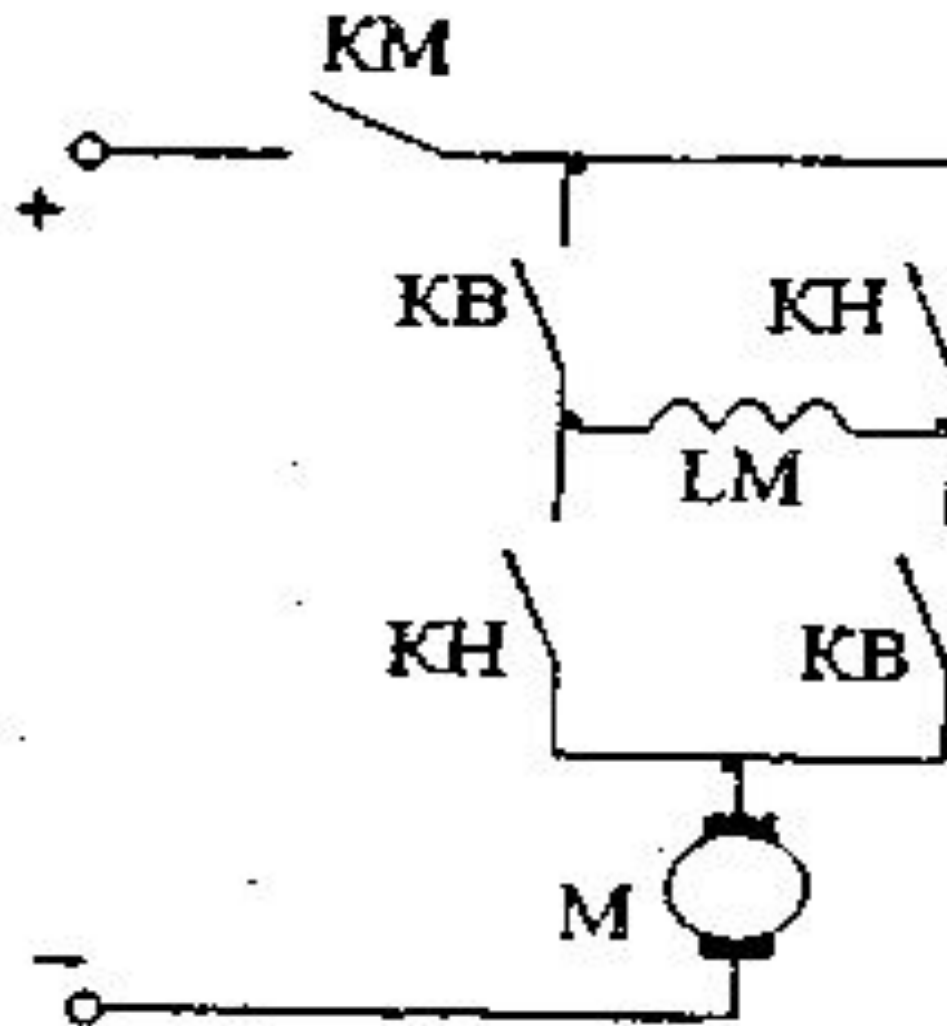


Рис.5.17. Схема реверсирования двигателя постоянного тока последовательно

$$M = k a l_{\text{я}}^2$$

(5.12)

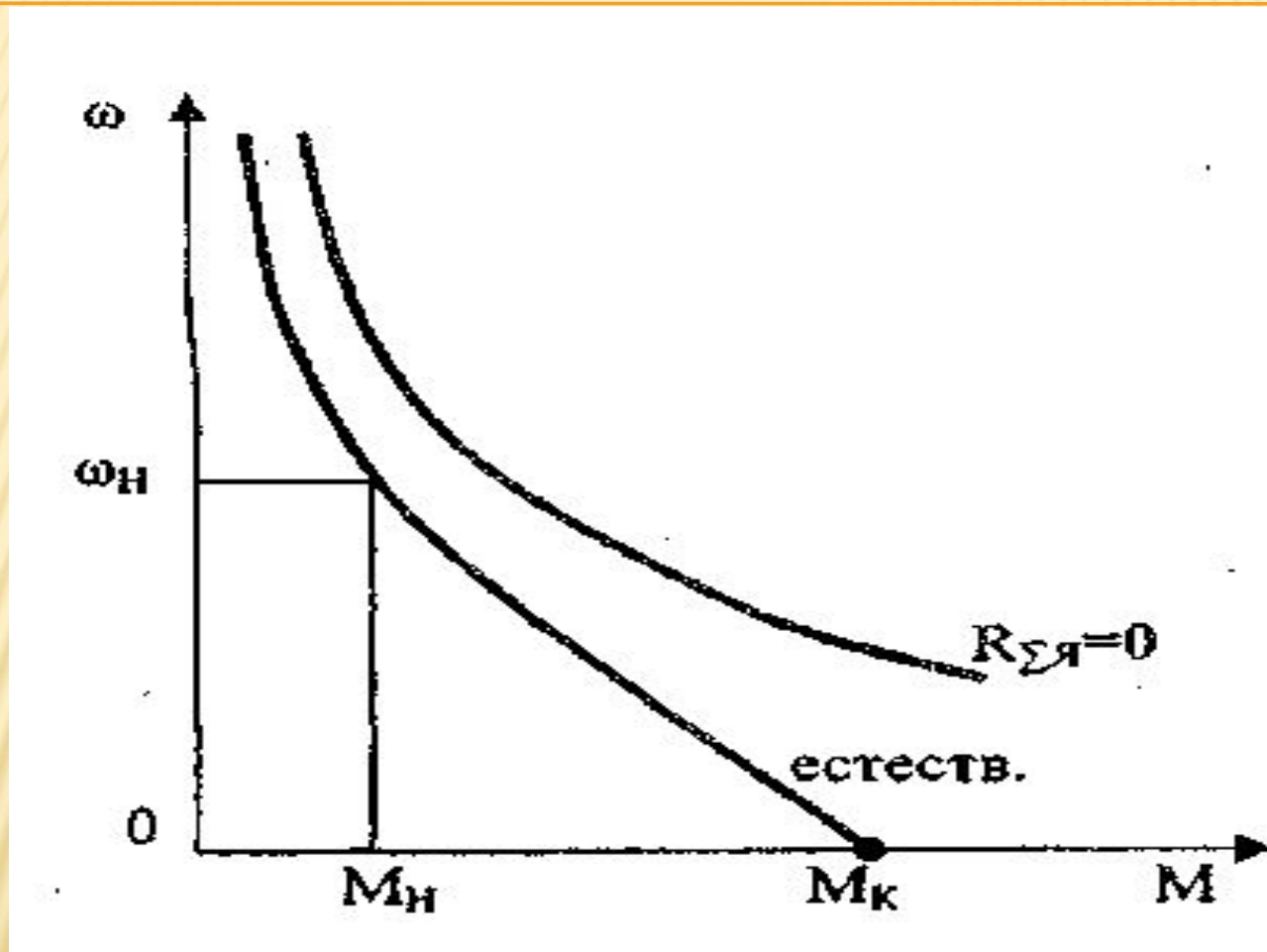


Рис.5.18. Естественная и «идеальная» механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения

Важным достоинством двигателей последовательного возбуждения является большая перегрузочная способность на низких скоростях. При перегрузке по току в 2,25-2,5 раза двигатель развивает момент 3,0-3,5 номинального. Это обстоятельство определило широкое использование двигателей последовательного возбуждения для электрических транспортных средств, где наибольшие моменты необходимы при трогании с места. Вторым важным достоинством двигателей последовательного возбуждения является отсутствие источника питания для цепи возбуждения двигателя.

Искусственные механические характеристики могут быть получены тремя способами: включением добавочного сопротивления в цепь якоря, изменением величины питающего напряжения и шунтированием обмотки якоря добавочным сопротивлением.

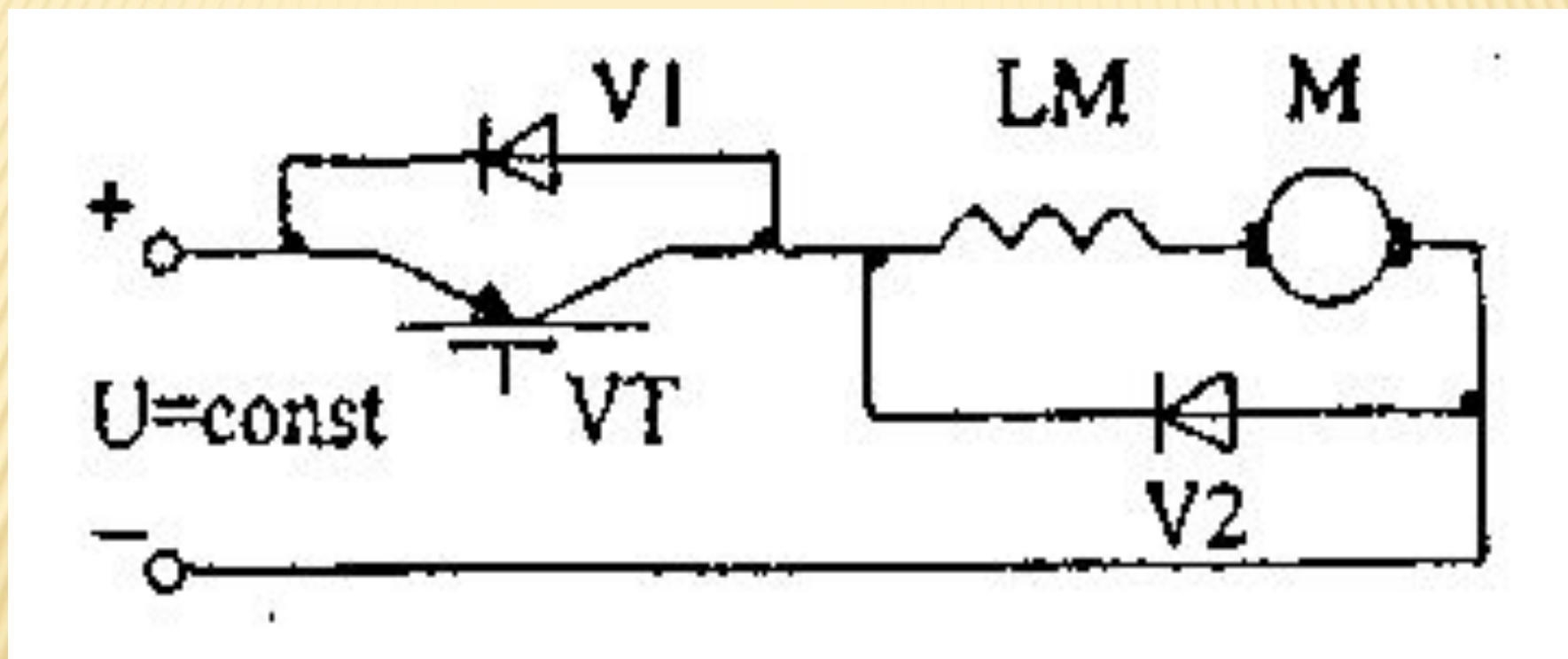


Рис.5.21. Схема регулируемого электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения и широтно-импульсным регулятором напряжения

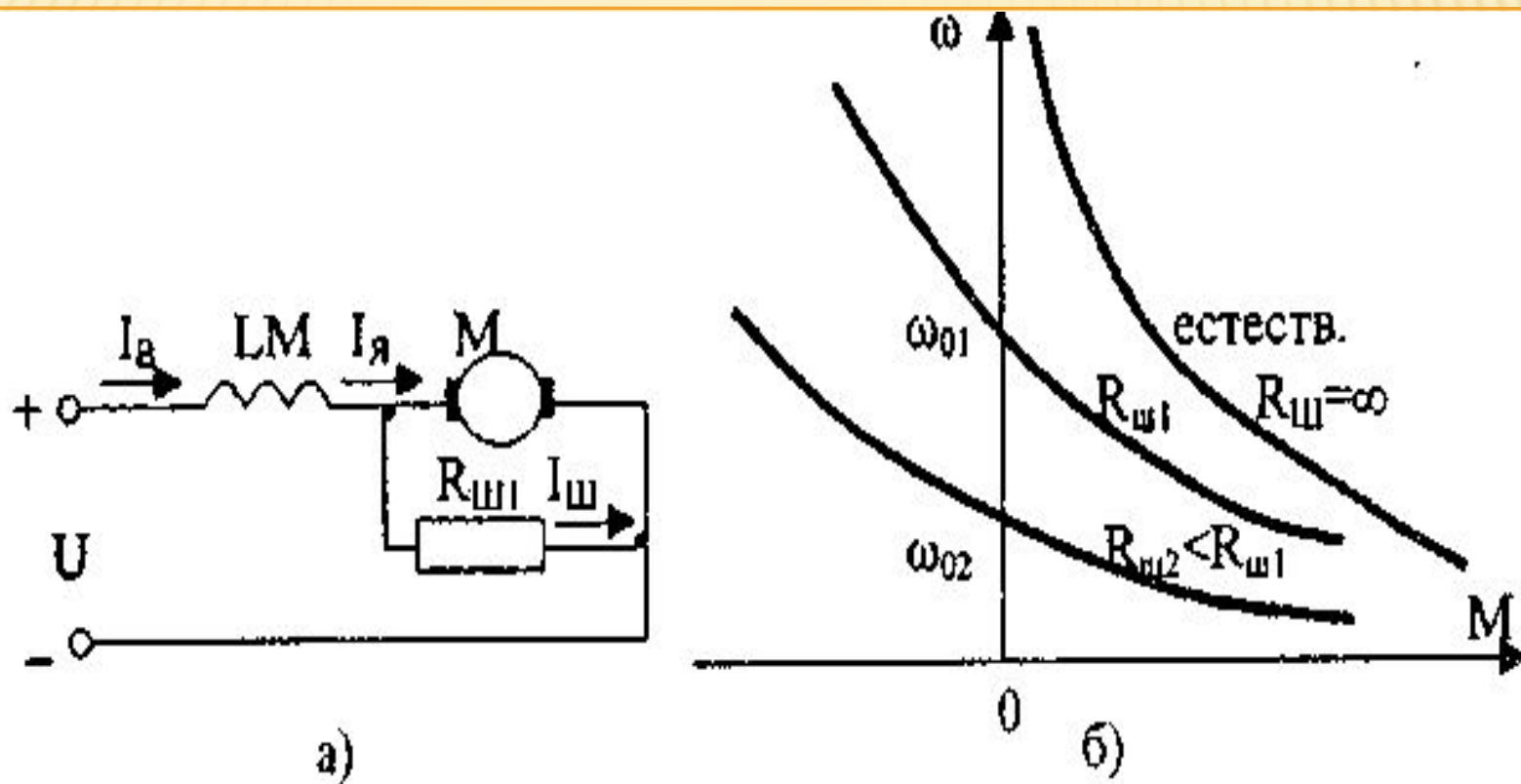


Рис.5.22. Схема и механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при шунтировании обмотки якоря

Изменение потока возбуждения в рассматриваемых двигателях возможно, если шунтировать обмотку якоря сопротивлением (см. рис.5.22,а). В этом случае ток возбуждения будет равен

$$I_{\text{в}} = I_{\text{я}} + \frac{U}{R_{\text{ш}}} \quad (5.13)$$

т.е. содержит постоянную составляющую, не зависящую от нагрузки двигателя. При этом двигатель приобретает свойства двигателя смешанного возбуждения: независимого и последовательного. Благодаря независимому возбуждению механические характеристики т.е. содержит постоянную составляющую, не зависящую от нагрузки двигателя.

Существенным недостатком рассматриваемого способа регулирования является его неэкономичность, обусловленная большими потерями энергии в шунтирующем сопротивлении.

Для двигателей последовательного возбуждения характерны два режима торможения: противовключением и динамический. В режиме противовключения необходимо включение добавочного сопротивления в цепь якоря двигателя.

Режим противовключения сопряжен со значительными потерями энергии в цепи двигателя и добавочной сопротивлением.

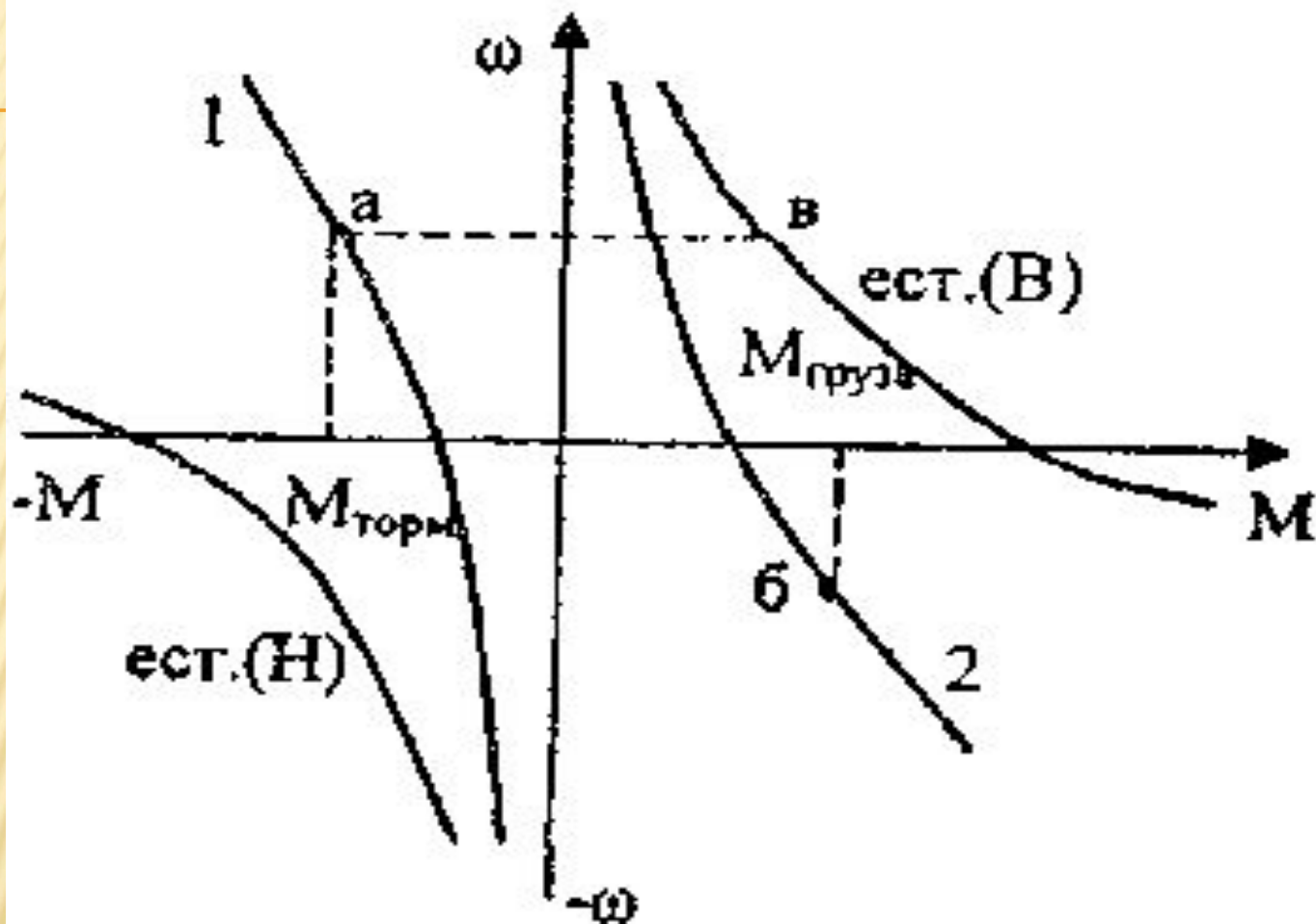


Рис.5.23. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения в режиме противовключения

Режим динамического торможения для двигателей последовательного возбуждения возможен в двух вариантах. В первом - якорь двигателя замыкается на сопротивление, а обмотка возбуждения питается от сети через добавочное сопротивление.

Во втором варианте, двигатель работает как генератор с самовозбуждением. Особенность данной схемы состоит в том, что при переходе из двигательного режима в режим динамического торможения необходимо сохранить направление тока в обмотке возбуждения во избежание размагничивания машины. При размыкании контактора КМ ток в обмотке возбуждения становится равным нулю, но, так как магнитопровод машины был намагничен, то сохраняется остаточный поток возбуждения, благодаря которому в обмотке якоря вращающегося двигателя наводится э. д.с., под действием которой при замыкании контактов КВ в цепи обмотка якоря-обмотка возбуждения-сопротивление К протекает ток, и машина самовозбуждается. Этот процесс происходит, если скорость двигателя будет больше граничной скорости $\omega_{гр}$

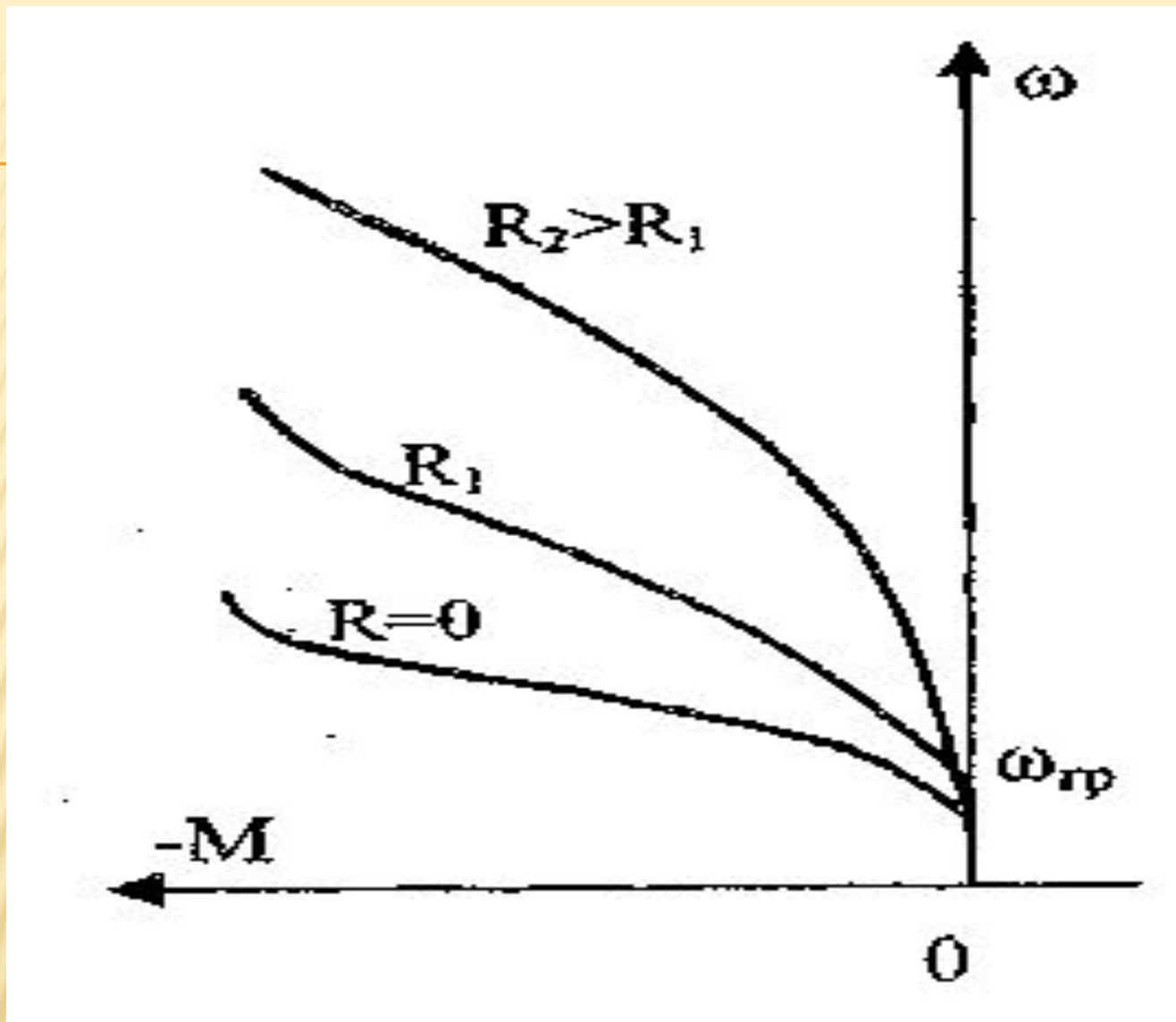


Рис.5.25. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения в режиме динамического торможения с самовозбуждением

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Переходным процессом (переходным режимом) электропривода называется протекающий во времени процесс перехода от одного установившегося режима работы (или отключенного состояния) к другому установившемуся состоянию.

Причиной возникновения переходных процессов могут быть:
управляющие воздействия (включение – отключение электропривода, изменение задания на скорость привода и др.);

возмущающие воздействия, главным из которых является изменение нагрузки на валу двигателя (изменение M_c).

Переходные процессы могут быть колебательными или апериодическими, как показано на рис.8.1, и характеризуются следующими показателями.

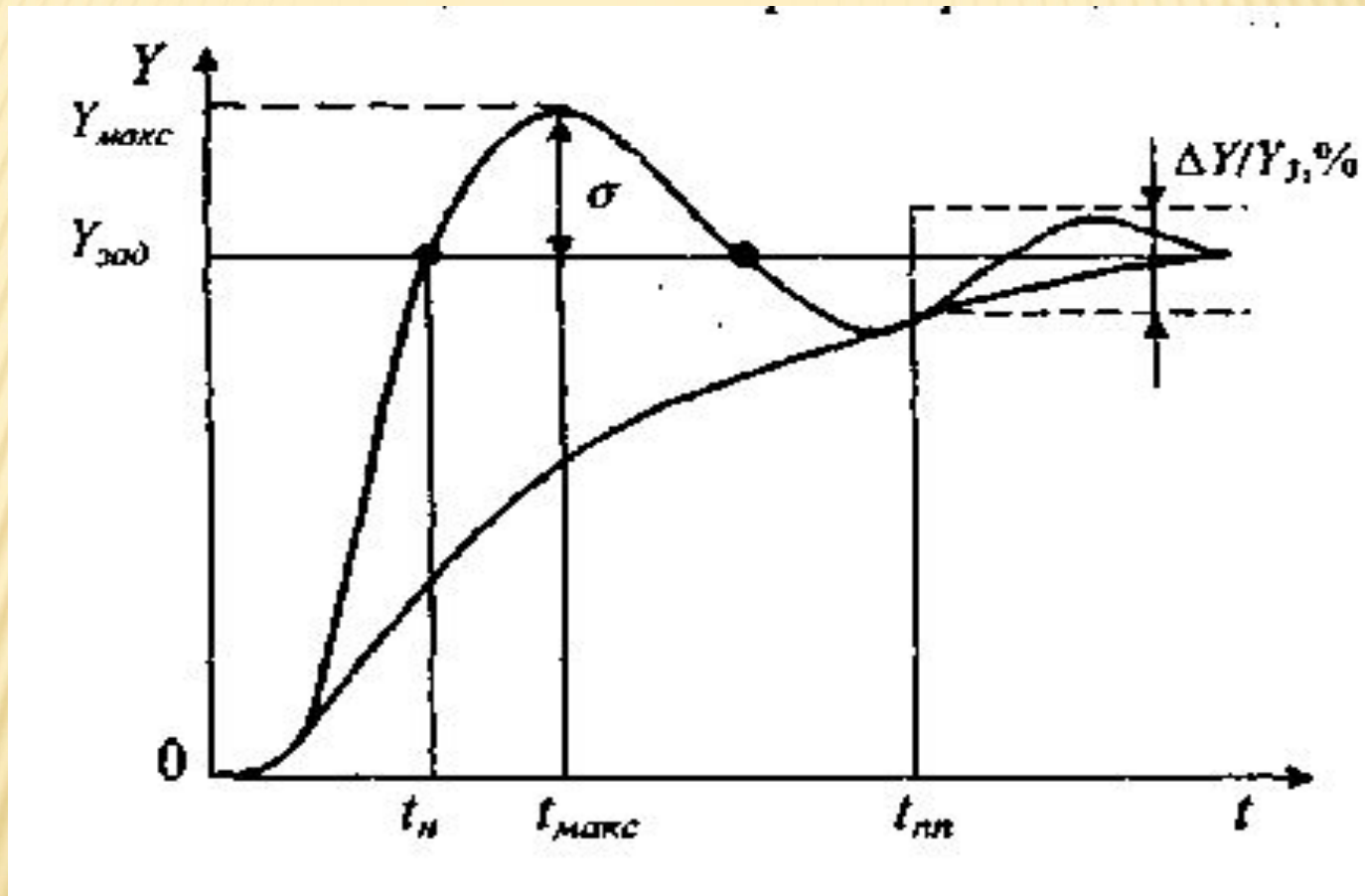


Рис.8.1. Динамическая (переходная) характеристика системы регулирования

Для расчета и анализа переходных процессов необходимо найти переходную функцию – зависимость параметров электропривода (скорости, тока, момента и др.) от времени.

Переходные функции описываются дифференциальными уравнениями. Порядок дифференциального уравнения будет определяться числом инерционностей, которые учитываются при рассмотрении данного переходного процесса. Ниже перечислены основные инерционности, характерные для электроприводов.

Механическая инерционность, связанная с накоплением и отдачей кинетической энергии; величина механической инерционности определяется для вращательного движения моментом инерции J_{Σ} , приведенным к валу электродвигателя; при анализе переходных процессов механическая инерционность оценивается электромеханической постоянной времени

(8.1)

$$T_m \frac{J_{\Sigma}}{\beta} \quad (8.1)$$

где β – абсолютная величина (без учета знака) жесткости механической характеристики электропривода.

$$T_{\varepsilon} \frac{L}{R} \quad (8.2)$$

где L и R - индуктивность и активное сопротивление электромагнитного устройства (например, обмотки двигателя).

$$T_c = RC \quad (8.3)$$

где C – емкость конденсатора, R – сопротивление цепи его заряда-разряда.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

$$U = iR + L \frac{di}{dt}$$

$$T_{\vartheta} \cdot \frac{di}{dt} + i = \frac{U}{R} = I_{уст} \quad (8.4)$$

$$i(T_{\vartheta} p + 1) = I_{уст} \quad (8.5)$$

$$i = I_{уст} - (I_{уст} - I_{нач}) e^{-t/T_{\vartheta}} \quad (8.6)$$

При $I_{нач} = 0$

$$i = I_{уст} (1 - e^{-t/T_{\vartheta}}) \quad (8.7)$$

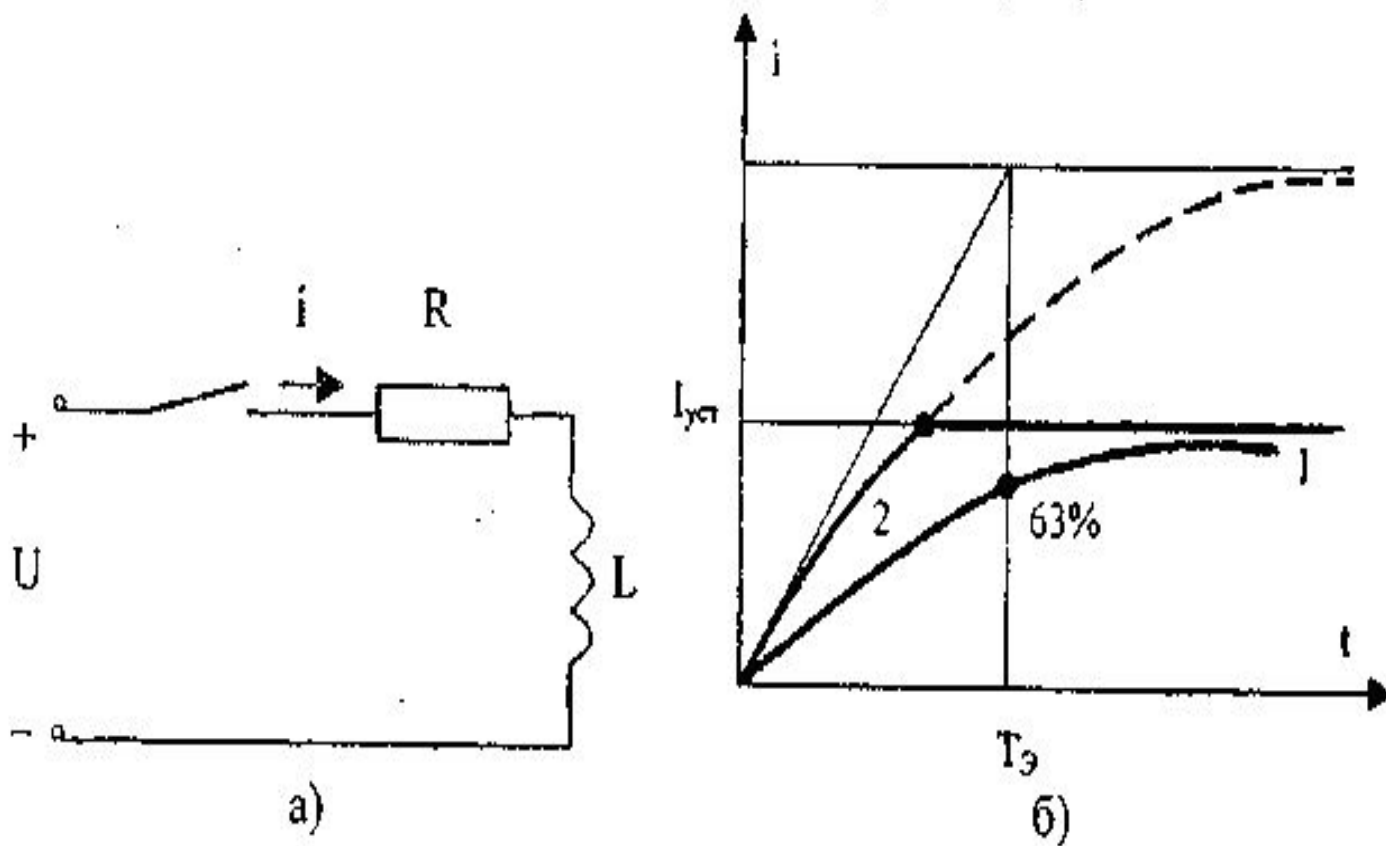


Рис.8.2. Переходные характеристики при включении обмотки возбуждения

Если нужно ускорить нарастание тока в обмотке возбуждения, то это можно сделать единственным способом - увеличить напряжение, подводимое к индуктивности (обмотке возбуждения) на время протекания переходного процесса.

По достижении током значения $I_{уст}$ напряжение на обмотке возбуждения следует уменьшить до значения $U = I_{уст} R$.
Отношение $\alpha = U_{\phi} / U$ называется коэффициентом форсировки.

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ИНЕРЦИОННОСТЬЮ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Проведем анализ электромеханической системы, состоящей из двигателя с линейной механической характеристикой, и жесткого механического звена.

$$M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \quad (8.8)$$

где J_{Σ} и M_c — суммарный момент инерции и момент сопротивления движению, приведенные к валу двигателя.

$$M = \beta(\omega_0 - \omega) \quad (8.9)$$

здесь ω_0 — скорость идеального холостого хода.

$$\frac{J_{\Sigma}}{\beta} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_0 - \frac{M_c}{\beta} \quad (8.10)$$

$$M_c / \beta = \Delta \omega_c \quad (8.11)$$

$$\omega_0 - M_c / \beta = \omega_{det}$$

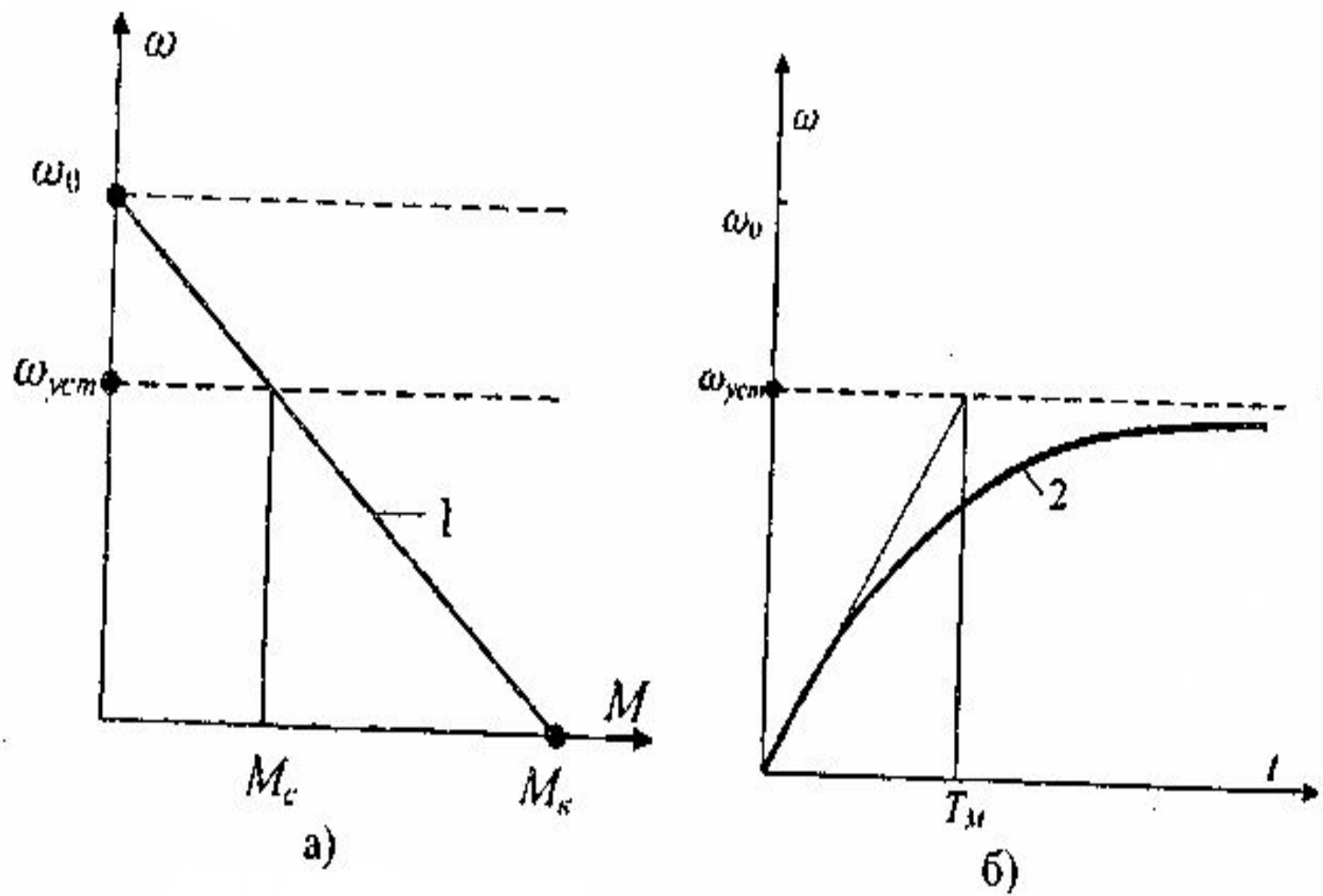


Рис.8.3. Переходный процесс пуска электропривода

$$\frac{J_{\Sigma}}{\beta} = T_m \quad (8.12)$$

$$T_m \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{уст} \quad (8.13)$$

Переходные процессы, определяемые одной механической инерционностью, суммарным приведенным к валу двигателя моментом инерции J_{Σ} описываются дифференциальным уравнением первого порядка. Решением этого уравнения является переходная характеристика, имеющая вид экспоненты с постоянной времени T_m (см. рис.8.3, б)

$$\omega = \omega_{уст} - (\omega_{уст} - \omega_{нач}) e^{-t/T_m} \quad (8.14)$$

ЭНЕРГЕТИКА ЭП

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ И ВЫБОР ТИПА

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ РАЗНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

- ✓ При выборе приводного электродвигателя решается комплекс вопросов:
- ✓ расчет мощности электродвигателя;
- ✓ расчет номинальной скорости вращения (вместе с определением передаточного отношения механической передачи);
- ✓ выбор двигателя в соответствии с режимом его работы по условиям нагрузки;
- ✓ выбор двигателя по условиям пуска;
- ✓ определение необходимой степени защиты оболочки двигателя;
- ✓ выбор конструктивного исполнения на соответствие условиям окружающей среды;
- ✓ выбор системы охлаждения двигателя.

По условиям окружающей среды двигатели изготавливают в следующих климатических исполнениях У, УХЛ, Т, М, ОМ (ГОСТ 15543-70) (для умеренного, умеренного и холодного, тропического и морского климата).

По степени защиты персонала от соприкосновения с токоведущими и движущимися частями и попадания посторонних тел внутрь машины, а также степени защиты от проникновения воды внутрь машины, они выпускаются в следующих исполнениях:

1Р00 - открытая электрическая машина, специальная защита отсутствует;

1Р10, 1Р20 - машина, защищенная от прикосновения и попадания посторонних предметов;

1Р11...1Р43 - машина, защищенная от капель воды, от прикосновения и попадания посторонних предметов;

1Р44-1Р54 - закрытая машина, защищенная от брызг, прикосновения и попадания посторонних предметов;

1Р55...1Р58 - закрытые машины, защищенные от водяных струй (1Р55) и от проникновения воды внутрь при неограниченно длительном погружении в воду (1Р58).

Кроме того, выпускаются машины для работы во взрывоопасной среде и в особых условиях окружающей среды.

По способу охлаждения двигатели подразделяют на машины с естественным охлаждением, с самовентиляцией, имеющие вентилятор на валу двигателя (защищенные или закрытые) и с независимой вентиляцией.

Для электроприводов, предназначенных для работы в динамических режимах (механизмы циклического действия, следящие электроприводы и другие) стремятся выбирать двигатель с пониженным моментом инерции ротора (якоря). Для таких условий изготавливаются малоинерционные двигатели. Для машин с кри-вошипно-шатунной кинематикой применяют двигатели с повышенным моментом инерции. Для электроприводов, работающих в повторно-кратковременном режиме и в неблагоприятных условиях эксплуатации, связанных с механическими нагрузками, воздействием повышенной влажности, температуры и прочее, изготавливаются двигатели специального конструктивного исполнения - двигатели краново-металлургических серий.

Масса, габаритные размеры электродвигателя (а, следовательно, его стоимость) определяются не его номинальной мощностью, а номинальным моментом.

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{30P_n}{n_n} \quad (12.1)$$

где P_n — номинальная мощность двигателя, Вт;

M_n — номинальный момент двигателя, Нм;

ω_n — номинальная угловая скорость двигателя, 1/с;

n_n — номинальная скорость вращения, об/мин.

При выборе кинематической схемы привода следует выбирать, чему отдать предпочтение: электродвигателю меньшего веса и меньших габаритов, но с редуктором, имеющим большое передаточное отношение, или большему по габаритам и весу электродвигателю в сочетании с более простым редуктором с меньшим передаточным отношением или вообще обойтись без механической передачи. Выбор производится, исходя из технико-экономических соображений и удобства компоновки конструкций рабочей машины в целом.

Для электроприводов малой и средней мощности (до 200 кВт), как правило, применяются редукторные электроприводы. Современным конструкторским решением является использование моторредукторов, в которых электродвигатель и редуктор объединены в один конструктивный узел.

Мощность приводного электродвигателя рассчитывается, исходя, главным образом, из трех условий:

1. Нагрев двигателя во время работы не должен превосходить допустимый для данного класса изоляции.
2. Перегрузочная способность двигателя должна быть достаточной, чтобы обеспечивать кратковременно максимальные значения момента, определяемые, как правило, динамическими режимами пуска или торможения.
3. В случае привода механизмов с большим моментом инерции или для механизмов, имеющих большое число включений в час пусковые потери в двигателе не должны приводить к перегреву ротора.

4. НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ДВИГАТЕЛЯ

Допустимые температура нагрева и превышение температуры электродвигателя для различных классов изоляции

Параметры	Класс изоляции			
	Е	В	F	Н
Допустимая температура нагрева изоляционного материала (СТ-СЭВ 782-77)°C	120	135	155	180
Допустимая температура нагрева обмоток электродвигателя (ГОСТ 183-74)°C	-	120	140	165
Допустимое превышение температуры (ГОСТ 183-74)°C	75	80	100	125

$$\Delta P \cdot dt = C \cdot d\tau + A \cdot \tau \cdot dt \quad (11.11)$$

где τ – превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды.

Первый член уравнения (11.11) характеризует потери в двигателе, которые преобразуются в тепло, второй член – количество тепла, идущее на нагрев двигателя,

третий – количество тепла, которое двигатель отдает окружающей среде.

Преобразовав уравнения (11.11) к нормальному виду при условии $\Delta P = \text{const}$, получим

$$\frac{C}{A} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_{уст}$$

Решения этого уравнения будет

$$\tau = \tau_{уст} + (\tau_{нач} - \tau_{уст}) e^{-t/T_n} \quad (11.12)$$

При $\tau_{нач} = 0$

$$\tau = \tau_{уст} \left(1 - e^{-t/T_n} \right) \quad (11.13)$$

В полученных выражениях:

$\tau_{уст} = \Delta P / A$ – установившееся значение температуры, которое зависит от величины потерь в двигателе, т.е. от его нагрузки;

$T_n = C / A$ – постоянная времени нагрева двигателя.

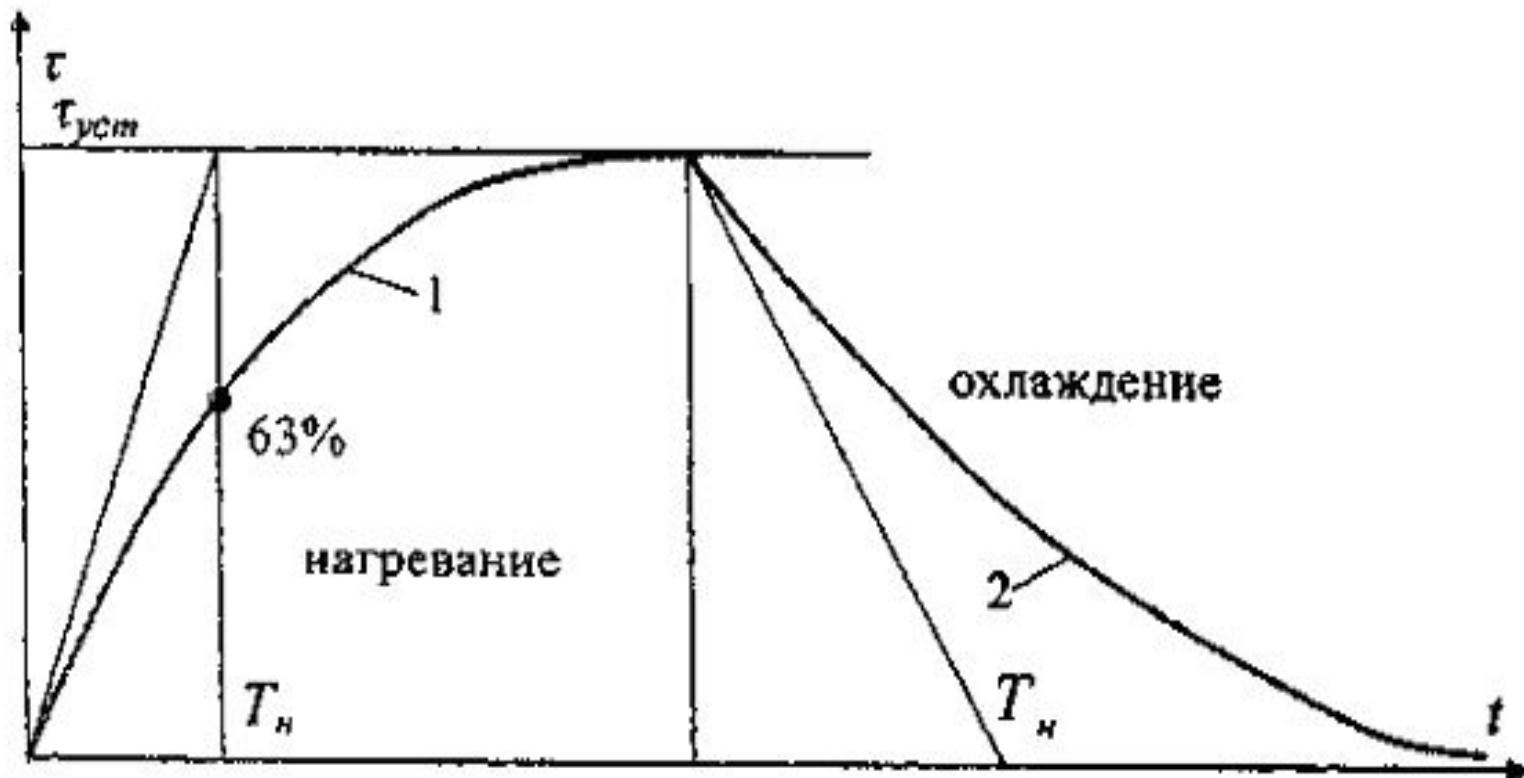


Рис. 11.2. Кривые нагрева (1) и охлаждения (2) двигателя

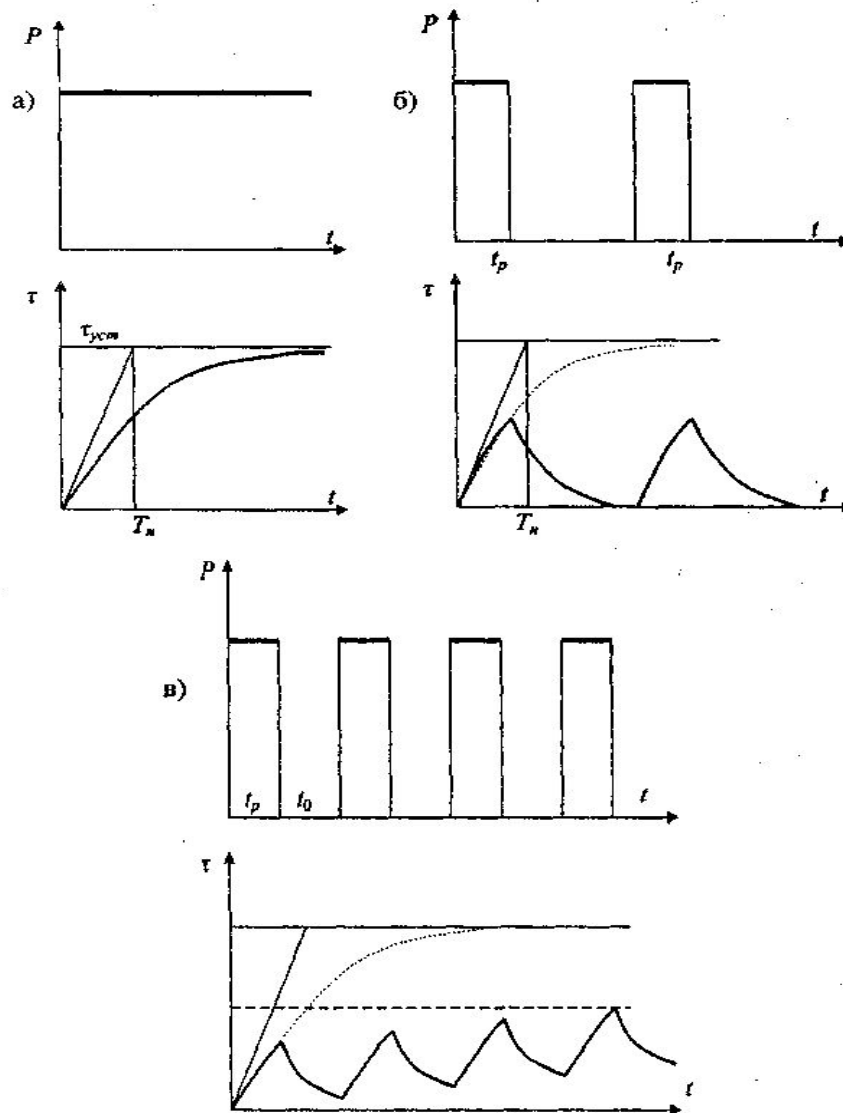


Рис. 11.4. Температурные характеристики двигателя при режимах работы: а) продолжительном S1; б) кратковременном S2; в) повторно - кратковременном S3

Исходя из особенностей режимов нагрева и охлаждения двигателей различают 8 режимов работы, основными из которых являются: продолжительный S1, кратковременный S2 и повторно-кратковременный S3.

Продолжительный режим (S1) – режим работы электродвигателя при неизменной нагрузке такой продолжительности, при которой превышение температуры электродвигателя достигает установившегося значения. Графики изменения мощности на валу P , потерь мощности ΔP и температуры перегрева τ , соответствующее режиму S1, приведены на рис.11.4,а.

В паспортных данных двигателя указываются номинальная мощность P_n скорость вращения ω_n , напряжение U_n ток I_n соответствующие режиму S1.

Кратковременный режим (S2) – это режим, в котором периоды нагрузки чередуются с периодами отключения двигателя. При этом за время работы двигателя, превышение температуры не достигает установившегося значения, а при отключении все части электродвигателя охлаждаются до температуры окружающей среды. Режим характеризуется мощностью (моментом) и временем включения t_p . Стандартная продолжительность рабочего периода составляет 10, 30, 60, 90 мин.

МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНОГО ТОКА

Потери в двигателях примерно пропорциональны квадрату тока в его обмотках.

Зная график тока, протекающего по обмоткам двигателя, можно определить для каждого конкретного режима работы значение тока $I_{\text{э}}$ характеризующее его нагрев.

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{t_y} \int_0^{t_y} i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0}} \quad (12.2)$$

$$I_{\text{э}} \leq I_{\text{НОМ}}$$

МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНОГО МОМЕНТА

Если момент двигателя пропорционален току, то можно пользоваться методом эквивалентного момента.

Эквивалентный момент — это такой постоянный момент нагрузки, который вызывает такой же нагрев двигателя, как и реально изменяющийся момент в соответствии с графиком работы механизма.

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{t_y} \int_0^{t_y} M^2(t) dt} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0}} \quad (12.4)$$

МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНОЙ МОЩНОСТИ

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{t_y} \int_0^{t_y} P^2(t) dt} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0}} \quad (12.5)$$

Продолжительный режим S1.

где F , M – сила, момент сопротивления, приведенные к двигателя, Н и Нм; V_n ω_n номинальная линейная и угловая скорости механизма и двигателя соответственно, м/с, с⁻¹; η_n – КПД передачи.

$$P = \frac{F \cdot V_n \cdot 10^{-3}}{\eta_n} = \frac{M \cdot \omega_n \cdot 10^{-3}}{\eta_n} \quad (12.6)$$

По каталогу выбирается электродвигатель из условия

$$P_{\text{н.дв}} \geq K_3 P \quad (12.7)$$

где $P_{\text{н.дв}}$ – номинальная мощность электродвигателя по каталогу; $K_3 = 1,05 \div 1,2$ – коэффициент

запаса, учитывающий неточности расчета сил сопротивления.

Электродвигатель при необходимости проверяется на перегрузочную способность по условиям пуска

$$M_{\text{макс}} \geq K_3 (M_c + M_d) = K_3 (M_c + J_{\Sigma} \frac{\omega_n}{t_n}) \quad (12.8)$$

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Анализируя эффективность использования электрической энергии, следует различать энергетическую эффективность самого технологического процесса, который осуществляется рабочей машиной с электроприводом, и эффективность собственно электропривода, характеризуемую его коэффициентом полезного действия - КПД, который представляет собой отношение выходной мощности данного устройства к входной мощности. КПД определяют также как отношение полезной мощности (или энергии) к затраченной

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{затр}}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{пол}} + \Delta P}$$

$$\eta = \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{преоб}}$$

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{затр}}} = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{мех}} + \Delta P}$$

Номинальный КПД асинхронных двигателей мощностью от 0,1-15,0 кВт составляет 0,85-0,9. С ростом мощности номинальный КПД повышается и у крупных высокоскоростных двигателей переменного тока мощностью свыше 1000 кВт может достигать величины 0,97.

КПД электродвигателей существенно зависит от нагрузки на валу двигателя. Для анализа этой зависимости пользуются методом разделения потерь ΔP на постоянные K и переменные V .

$$\Delta P = K + V \quad (11.2)$$

Для нерегулируемых по скорости двигателей постоянные потери складываются из:

- ✓ потерь в стали;
- ✓ механических потерь, в том числе на самовентиляцию;
- ✓ добавочных потерь.
- ✓ Переменные потери зависят от квадрата тока в обмотках машины и будут равны:
- ✓ для машин постоянного тока $V = I_a^2 R_a$
- ✓ для асинхронных двигателей сумме потерь в обмотках статора и ротора

$$✓ \quad V = 3I_1^2 r_1 + 3I_2^2 r_2$$

Потери в роторной цепи согласно (6.8) пропорциональны моменту на валу двигателя и скольжению

$$3I_2^2 r_2 = M \cdot \omega_0 s$$

Ориентировочно можно считать, что потери в обмотках статора относятся к потерям в обмотках ротора в соотношении r_1 / r_2 . Тогда переменные потери для асинхронных двигателей будут

$$V = M \cdot \omega_0 s \left(1 + \frac{r_1}{r_2} \right)$$

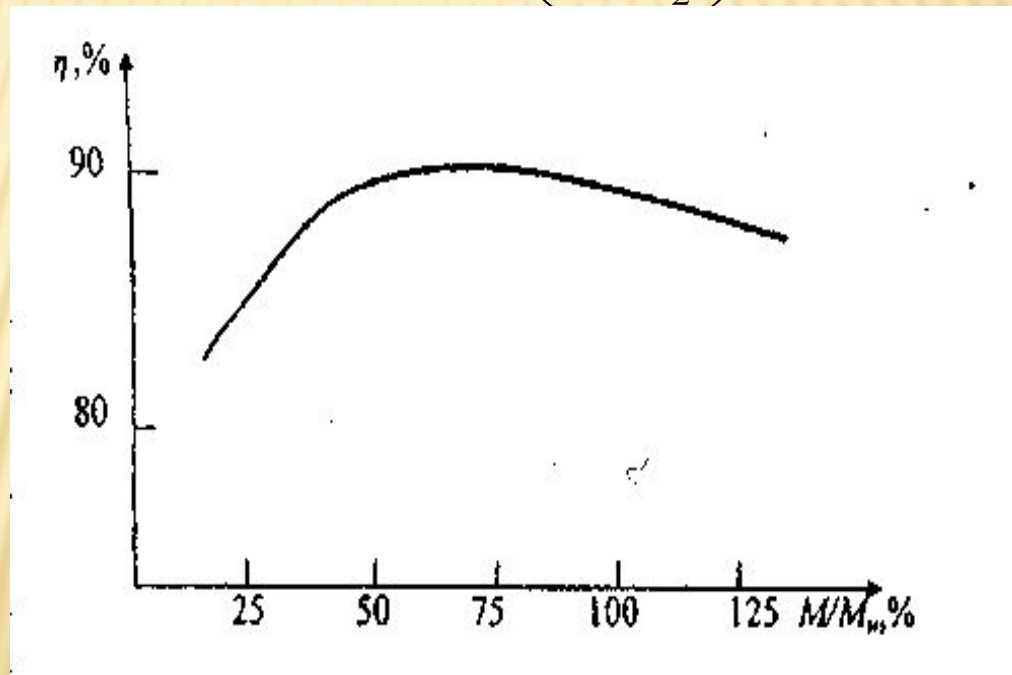


Рис. 11.1. Зависимость кпд асинхронного двигателя от нагрузки (двигатель 4АИ16084)

Кпд преобразовательного устройства, если последнее выполнено на базе силовых полупроводниковых приборов составляет 0,95-0,98.

~~Потери в механическом передаточном устройстве: редукторе, трансмиссии и др., определяются главным образом, силами рения. Величина этих потерь, а, следовательно, кпд механической передачи зависит от типа используемых подшипников, класса обработки зубчатых колес, систем смазки и др. Кпд механической передачи не остается постоянным, а существенно зависит от~~

В сети переменного тока, питающей электропривод, Циркулирует реактивная мощность. Негативным результатом наличия реактивной мощности является загрузка питающей сети реактивным током, не создающим работы

У асинхронных короткозамкнутых двигателей номинальный $\cos\varphi$ составляет примерно 0,7-0,8. величины передаваемого момента.

$$\cos\varphi_{\text{эп}} = \cos\varphi_{\text{эд}} \cdot \cos\varphi_{\text{пр}}$$

В приводах ТП-Д при высокой скорости вращения $\cos\varphi$ в питающей сети переменного тока будет высоким (0,8-0,9), по мере снижения скорости, когда угол α растёт, $\cos\varphi$ будет уменьшаться.

ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

Рассмотрим потери энергии в короткозамкнутом асинхронном двигателе за время пуска вхолостую (M^0).

потери в роторе пропорциональны моменту и скольжению

$$\Delta P = M \cdot \omega_0 s$$

то потери энергии за один пуск будут:

$$\Delta A = \int_0^{t_n} M \cdot \omega_0 s \cdot dt \quad (11.7)$$

$$\Delta A = \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} \quad (11.8)$$

Заметим, что потери в роторе не зависят от времени пуска, пусковых токов и других параметров. Потери в статоре, напротив, зависят от параметров пуска.

Потери энергии в роторной цепи двигателя при динамическом торможении от скорости ω до минимальной скорости (затормозить двигатель до нулевой скорости при динамическом торможении нельзя) также равны запасу кинетической энергии, которой обладали движущиеся массы ротора и рабочей машины.

$$\Delta a_{\text{дт}} = J_{\text{Е}} \omega_0^2 / 2$$

При торможении противовключением двигатель работает при еще больших скольжениях - от $s_{\text{нач}} = 2$ до $s = 1$. Подставляя эти значения в (11.7), получим, что

$$\Delta A_{\text{првк}} = 3 \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2}$$

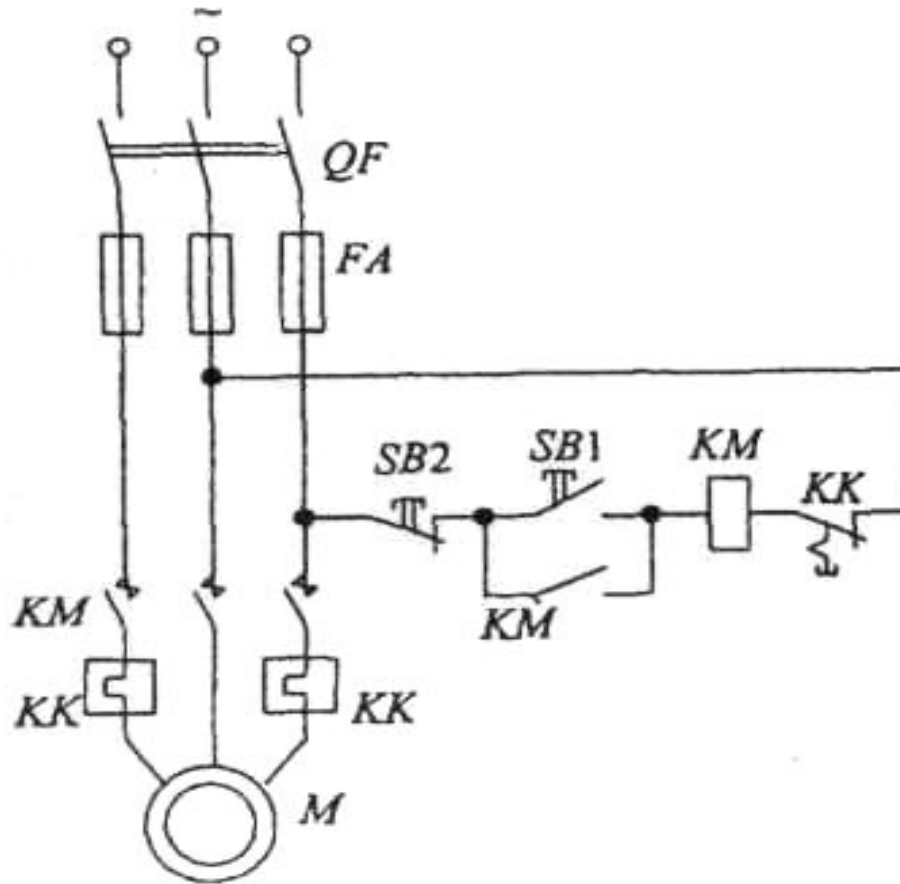
В статорной цепи можно найти, зная потери в роторе и пользуясь соотношением

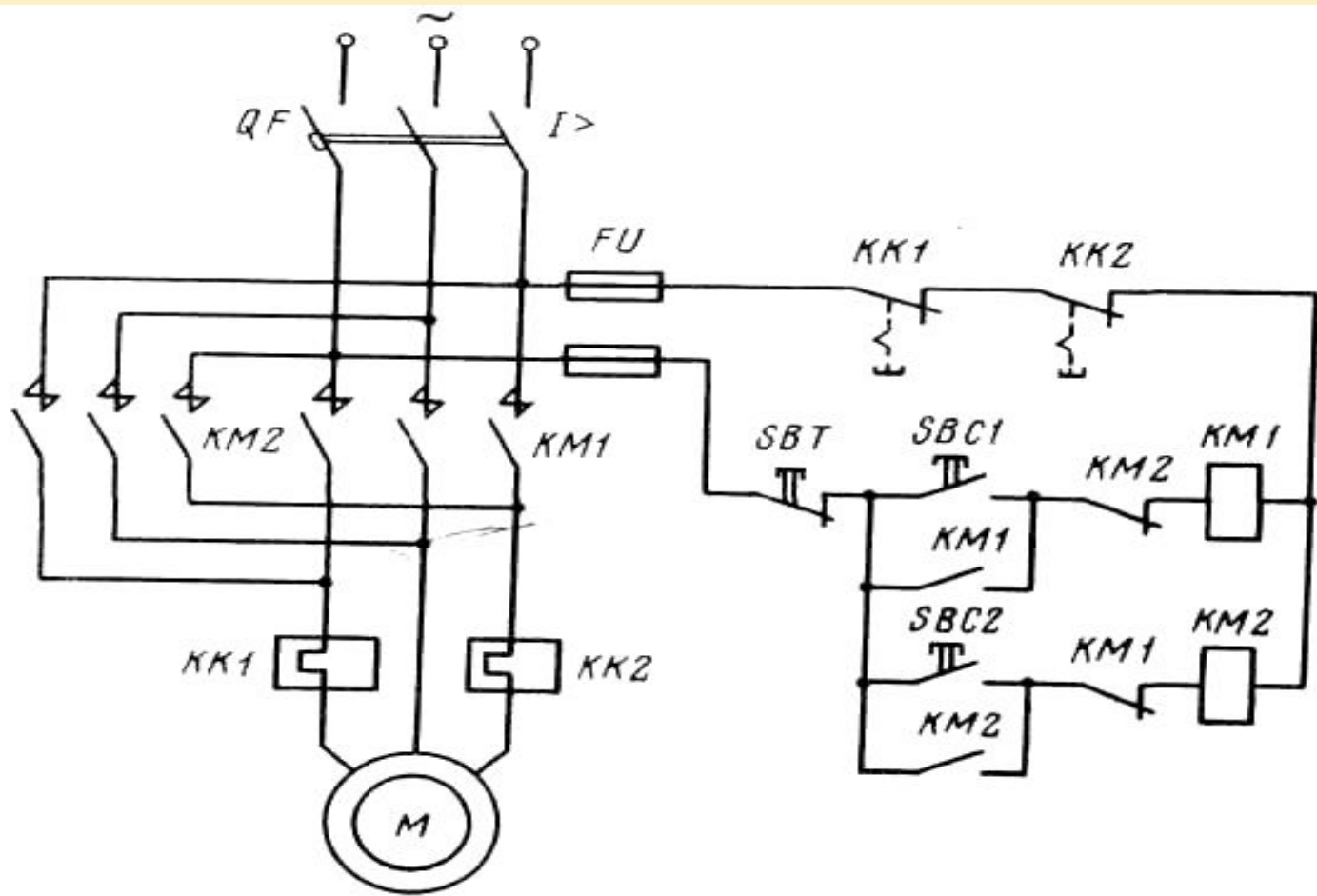
$$\Delta A_{\text{ст}} = \Delta A_{\text{рот}} \cdot r_1 / r_2$$

Потери в статоре могут быть сокращены, используя, например, снижение напряжения на статоре при пуске (если это возможно). При плавном изменении ω_0 в соответствии с заданным темпом разгона (частотном управлении асинхронным двигателем или плавном повышении напряжения в приводах постоянного тока) двигатель работает с малыми скольжениями и потери в двигателе, как и в установившемся режиме, определяются величиной развиваемого момента.

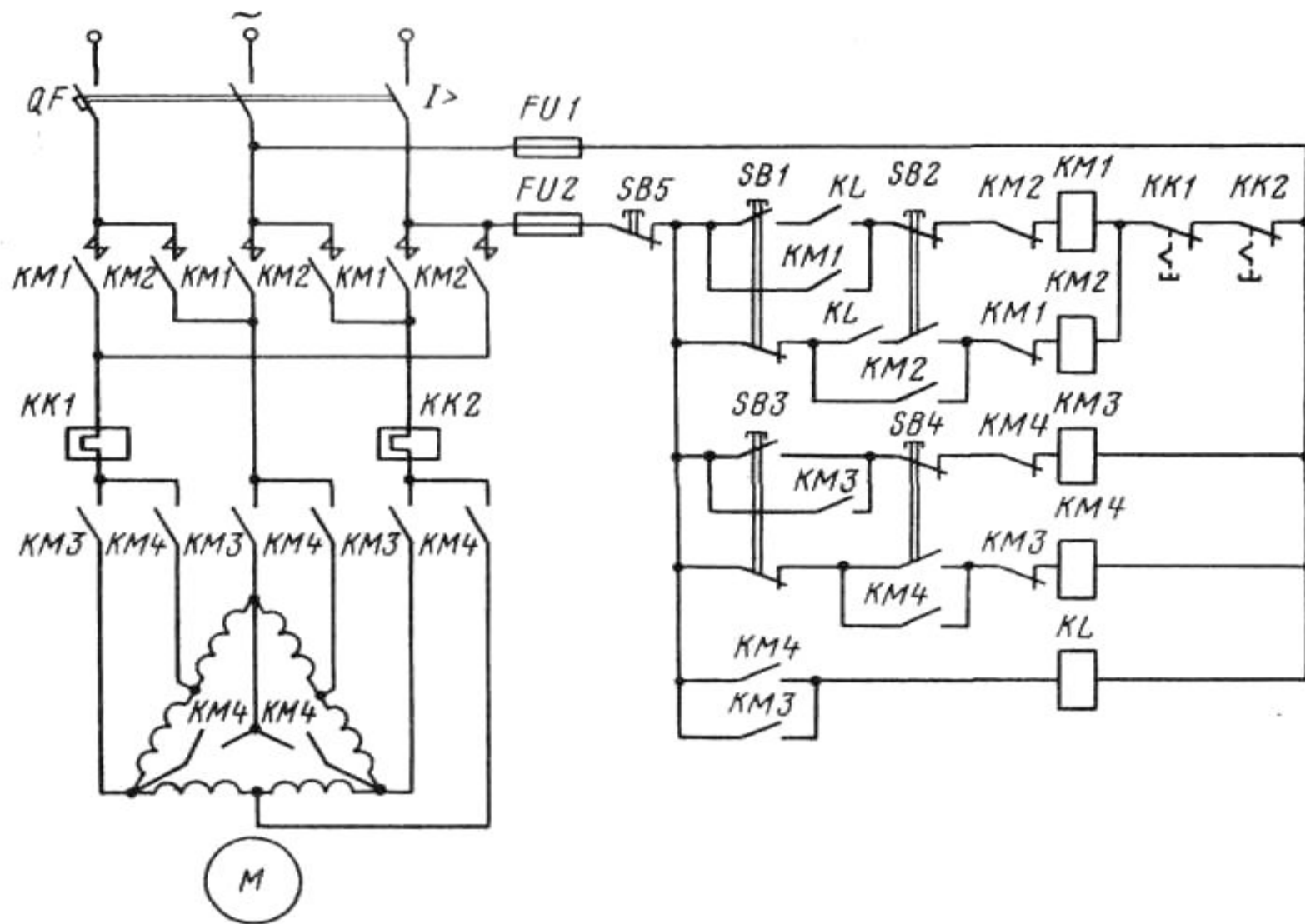
. СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПУСКОМ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Схема управления асинхронным двигателем посредством магнитного пускателя нереверсивного (а) и реверсивного (б) показана на рис.9.1.





9.1 СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСРЕДСТВОМ МАГНИТНОГО ПУСКАТЕЛЯ
А) НЕРЕВЕРСИРОВАННОГО Б) РЕВЕРСИРОВАННОГО



. Схема управления реверсивным электроприводом с двухскоростным асинхронным короткозамкнутым двигателем

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА И ЕЕ СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ

Составными частями типовой энергетической системы являются: электрические станции, подстанции, линии электропередачи и тепловые сети. *Электрическими станциями* называются электроустановки, служащие для производства электрической и тепловой энергии из других видов энергии.

Подстанциями называются электроустановки, служащие для преобразования и распределения электроэнергии и состоящие из трансформаторов или других преобразователей энергии, распределительных устройств, аккумуляторной батареи, устройств управления и вспомогательных сооружений.

Распределительным устройством называется электроустановка, служащая для приема и распределения электроэнергии и состоящая из коммутационных аппаратов, устройств защиты и автоматики, измерительных приборов, сборных и соединительных шин и вспомогательных устройств.

Линиями электропередачи называется система проводов, служащих для передачи электроэнергии от генераторов электростанций к местам потребления и для распределения ее между электроприемниками.

Часть энергетической системы, кроме электроприемников, называется системой электроснабжения.

В качестве стандартных напряжений в общей системе электроснабжения принимают для: а) генераторов — 230, 400, 690, 6300, 10 500 и 21 000 В; б) электроприемников—127, 220, 380, 660, 6000 и 10 000 В; в) распределения и передачи электроэнергии — все напряжения, перечисленные в предыдущем пункте, а также 20, 35, 110, 220, 330, 500, 750 и 1000 кВ.

Основными требованиями, которым должна удовлетворять всякая система электроснабжения, являются: надежность электроснабжения, хорошее качество электроэнергии, безопасность и экономичность всех элементов системы.

КАТЕГОРИИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ

ПУЭ разделяют электроприемники промышленных предприятий на следующие три категории .

I категория — электроприемники, нарушение электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, значительный ущерб народному хозяйству, массовый брак продукции, расстройство сложного технологического процесса.

II категория — электроприемники, нарушение электроснабжения которых связано с массовым недоотпуском продукции, простоем рабочих,, механизмов и промышленного транспорта. В горной промышленности к этой категории относят: скиповые подъемные установки, калориферные установки для районов страны без тяжелых климатических условий, вентиляторы на рудниках и шахтах, не опасных по газу и пыли, измельчительные и классификационные механизмы и др.;

III категория — все остальные электроприемники, не подходящие под определение I и II категорий (электроприемники цехов несерийного производства, вспомогательных цехов, небольшие поселки и др.).

В соответствии с требованиями ПУЭ допускаются перерывы в электроснабжении: а) электроприемников I категории — на время автоматического ввода резервного питания при условии обеспечения их электроэнергией от двух независимых источников питания; б) электроприемников II категории — на время, необходимое для включения резервного питания дежурным персоналом или выездной оперативной бригадой; в) электроприемников III категории — на время, необходимое для ремонта или замены поврежденного элемента системы электроснабжения, но не более одних суток.

отнесение потребителей к той или иной категории определяет степень резервирования, что, естественно, влияет на капитальные затраты.

СХЕМЫ ПИТАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЕЙ

Схемы электроснабжения предприятий должны выполняться, исходя из следующих принципов:

- а) максимального приближения высшего напряжения к электроустановкам потребителей путем устройства глубоких вводов напряжением 35, 110 и 220 кВ с наименьшим числом ступеней промежуточной трансформации и аппаратов; сооружения под станций вблизи центров нагрузки, цеховых подстанций и др.;
- б) широкого применения наиболее простых и дешевых аппаратов (предохранителей, разъединителей, отделителей, выключателей нагрузки) там, где они соответствуют параметрам сети, обеспечивают селективность и надежную чувствительность действия;
- в) широкого применения автоматического повторного включения и автоматического включения резерва.

Электроэнергия от районной энергосистемы подается при напряжении 35 кВ и более, в качестве ПП сооружают узловые распределительные подстанции (УРП), от которых электроэнергия распределяется при том же напряжении между подстанциями глубоких вводов (ПГВ), или главные понизительные подстанции (ГПП), на которых напряжение понижается до напряжения рас

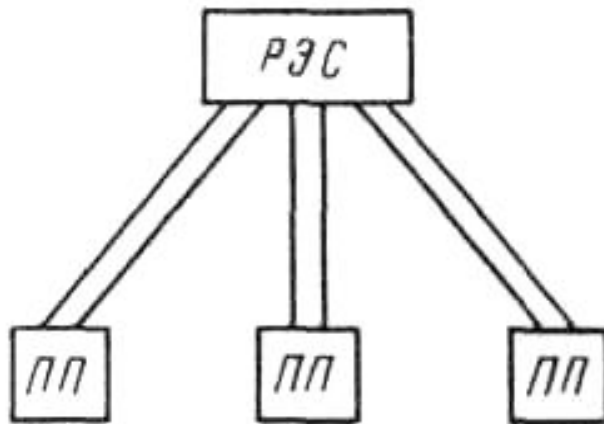


Рис 9.1. Схема питания приемных пунктов по двум радиальным линиям

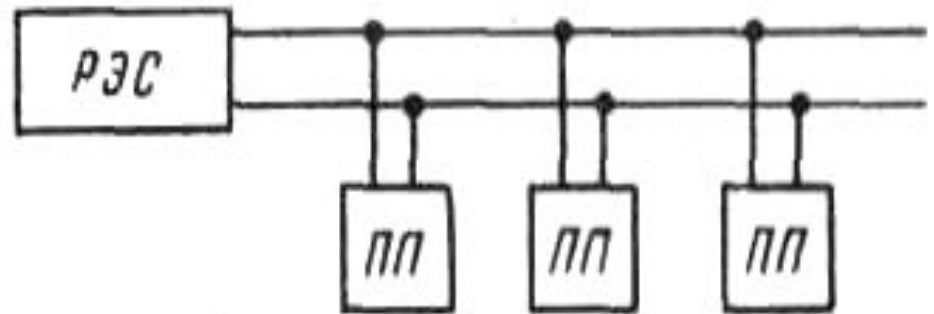


Рис 9.2. Схема питания приемных пунктов от двойной магистральной линии

На малых предприятиях в качестве ПП сооружают трансформаторные подстанции (ТП), совмещенные с РП.

СХЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРЕДПРИЯТИИ

Схемы в отдельных звеньях системы внутреннего электроснабжения могут быть радиальными, магистральными (с односторонним и двусторонним питанием и кольцевыми) и смешанными.

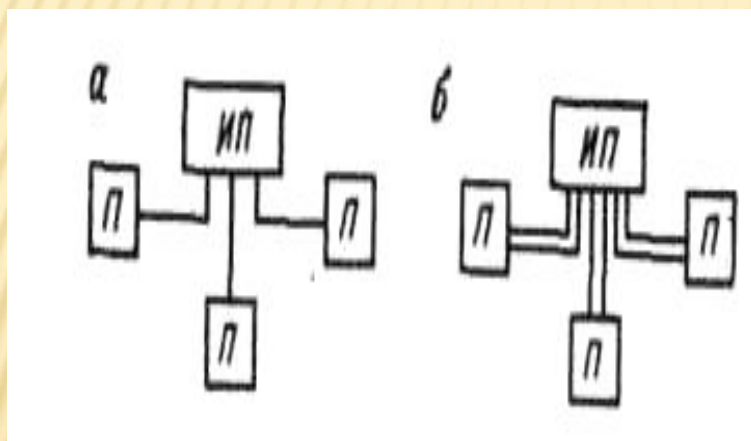


Рис 9.3. Радиальные схемы распределения электроэнергии:
а – одиночная; б – двойная

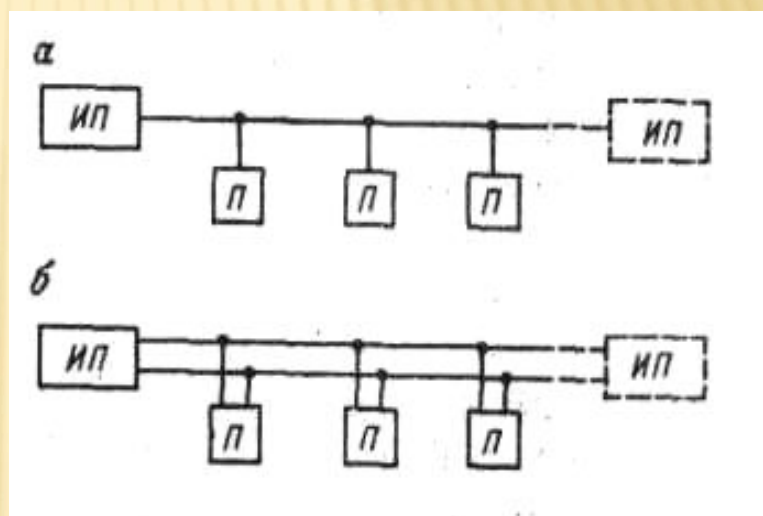
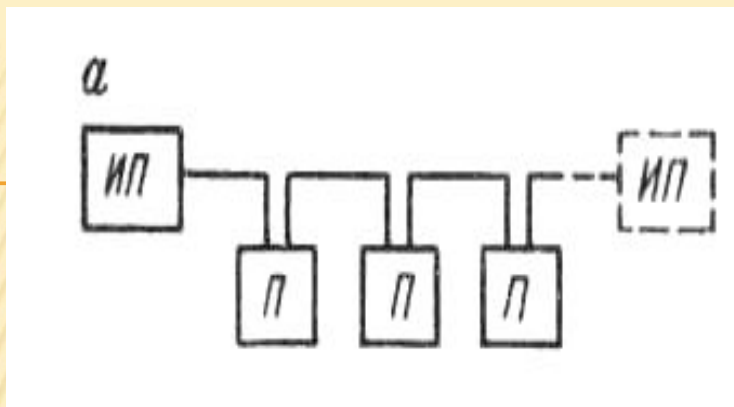
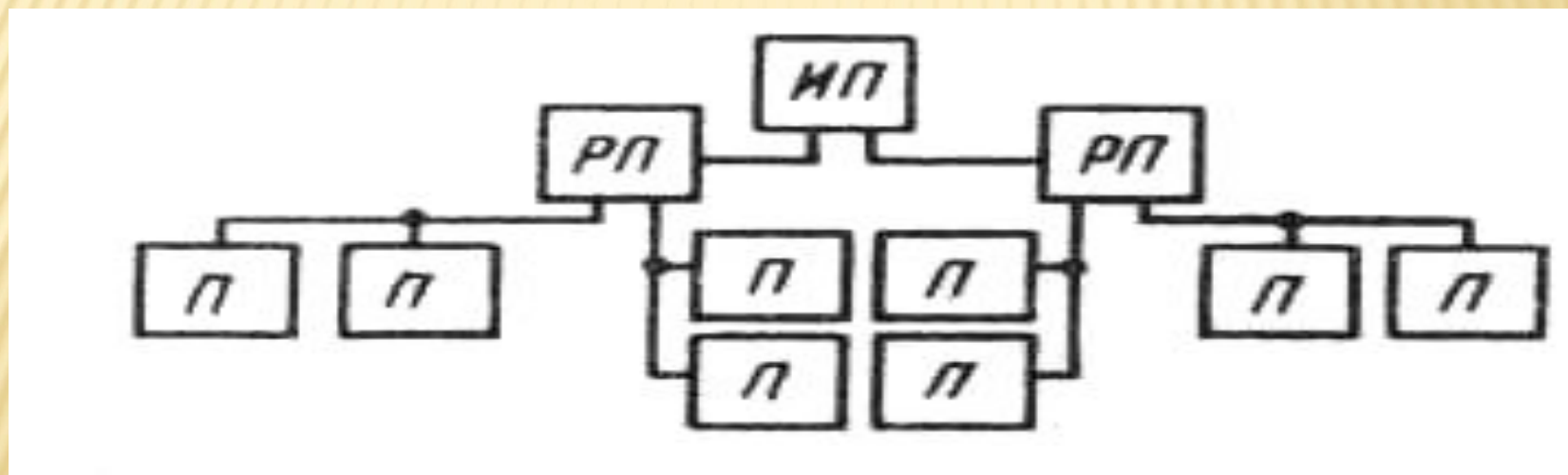


Рис 9.4. Магистральные схемы распределения электроэнергии с глухими ответвлениями:
а – одиночная; б – двойная



. Цепочные магистральные схемы распределения электроэнергии:
а – одиночная; б – двойная



Радиальная двухступенчатая схема

ЭЛЕКТРООСВЕЩЕНИЕ

ВИДЫ ОСВЕЩЕНИЯ ЦЕХОВ

- В помещениях различных цехов и сооружений используется система *обще освещения*, предназначенная для освещения всего или части помещения как с одинаковой освещенностью (или равномерном освещении), так и с различной освещенностью (при общем локализованном освещении) и система *комбинированного освещения* – светильниками системы общего освещения и светильниками местного освещения (стационарного или переносного).
- Система комбинированного освещения с локализованным размещением светильников широко применяется при освещении основных цехов обогатительных и окомковательных фабрик: дробильного, обогатительного, приготовления шихты, бетонита и известняка, окомкования, обжига, погрузочных бункеров, ремонтно-механических и т.п.
- Система общего освещения с равномерным расположением светильников применяется в некоторых вспомогательных сооружениях фабрик: туннелях, конвейерах и пешеходных галереях, складских помещениях, бытовых корпусах, а также при освещении территории накопительных складов, складов окатышей и т.д.

- В отдельных сооружениях фабрики предусматриваются: рабочее освещение, аварийное освещение для продолжения работы и аварийное освещение для эвакуации.

- Аварийное освещение для продолжения работы устраивают в помещениях и на открытых пространствах, если отсутствие рабочего освещения и связанное с этим нарушение нормального обслуживания оборудования и механизмов может вызвать взрыв, пожар, отравление, частичное расстройство технологического процесса и опасность травматизма в местах большого скопления людей.
- Такое освещение устраивается в цехах: дробильном, обогатительном, приготовления шихты, бетонита и известняка, электроподстанциях, окомковательном, обжига, и т.п. В этом случае значительная часть светильников (30 – 500), необходимых для создания минимальной освещенности на рабочих местах, выделяется из числа светильников рабочего освещения и питается от второго источника (понижающего трансформатора), при выходе из строя переключателя на основной источник питания.
- Аварийное освещение для эвакуации применяется: в корпусах дробления, обогащения, приготовления шихты, окомкования, обжига, в местах, опасных для перехода людей, и административнобытовом корпусе с числом работающих более 50 человек, в основных проходных помещениях и на лестницах, предназначенных для эвакуации людей из производственных и административнобытовых корпусов и др.

ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

- Эксплуатация электроосвещения производится в соответствии с требованиями Правил технической эксплуатации и техники безопасности.
- Для освещения производственных и вспомогательных корпусов и открытых пространств применяются осветительные приборы ближнего действия – светильники, и дальнего действия – прожекторы и осветительные приборы с керосиновыми лампами.
- Окружающая среда отдельных помещений и корпусов различна. На ряду с нормальными сухими помещениями (административные корпуса) имеются корпуса пыльные (корпус обжига, погрузочные бункеры), влажные, сырые и особо сырые (помещения корпусов обогащения – отделения сепарации и флотации), пожароопасные (склады горюче-смазочных материалов) и взрывоопасные (газораспределительные пункты). В зависимости от условий среды применяются соответствующие светильники.

При использовании светильников с ксеновыми лампами для внутреннего освещения цехов выходные отверстия в светильниках при нормированной освещенности более 100 лк необходимо перекрывать прозрачным силикатным стеклом толщиной не менее 2 мм, защищающим людей от ультрафиолетового облучения.

Для освещения улиц и открытых пространства применяются светильники с лампами накаливания, ртутными и люминесцентными.

Светильники: с лампами накаливания до 200, 500 и 1 000 Вт подвесные открытые СПО – 200, СПО – 2-200, СПО – 1 000; призматические открытые СПП – 200, СПП – 500, СПЗ – 500 (зеркальный); с ртутными лампами ДРЛ-СППР-125 (подвесные призматические с лампой 125 Вт), СЗПР-250 (вертикальные призматические, консольные с лампой 500 Вт); с люминесцентными лампами СПЗЛ2х80, СПЗЛ3х80 (зеркальные, призматические с двумя или тремя лампами по 80 Вт), СКЗЛ2х80, СКЗЛ3х80 (зеркальные консольные).

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Электрические источники света подразделяются в основном на 2 типа: лампы накаливания и газоразрядные.

Лампы накаливания это источники света с тепловым световым излучением, вольфрамовой нитью помещенной в стеклянный баллон. Из 100% электрической энергии, потребляемой из сети, на световое излучение расходуется 10-12%. Световая отдача ламп при $T=2800-3400^{\circ}\text{C}$ достигает 18-19 лм/вт.

Лампы мощностью до 60 вт выпускаются вакуумными, а большей мощности – с баллоном, заполненным газом в виде смеси аргона и азота или криптоном. Наполнение колбы газом позволяет повысить температуру нити накала до $2800-3000^{\circ}\text{C}$, что увеличивает световую отдачу.

Для крепления ламп в патроны на колбу крепят цоколь – резьбовой или штифтовой.

Основными характеристиками ламп накаливания являются $U_{\text{ном}}$, $P_{\text{ном}}$, $\Phi_{\text{ном}}$, световая отдача и средняя продолжительность горения.

ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Осветительный прибор – это устройство, состоящее из одного или нескольких источников света и осветительной арматуры. Осветительная арматура служит для перераспределения светового потока ламп, их крепления и подключения к системе питания, защиты от механического повреждения и загрязнения, изоляции от окружающей среды. Состоит арматура из корпуса с патронами, отражателями, защитного стекла или рассеивателя, приспособления для крепления светильника и устройства для ввода кабеля.

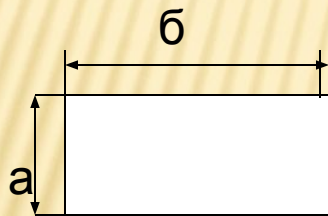
Осветительные приборы по назначению делятся на приборы ближнего (светильники) и дальнего (прожекторы) действия.

Осветительные приборы дальнего действия – прожекторы – состоят из корпуса с защитным стеклом отражателя, лиры (крепленной скобы с опорной плитой), фиксирующего приспособления и вентиляторного устройства. Освещение должно быть равномерным и экономичным, что достигается правильным выбором осветительных приборов и их размещением.

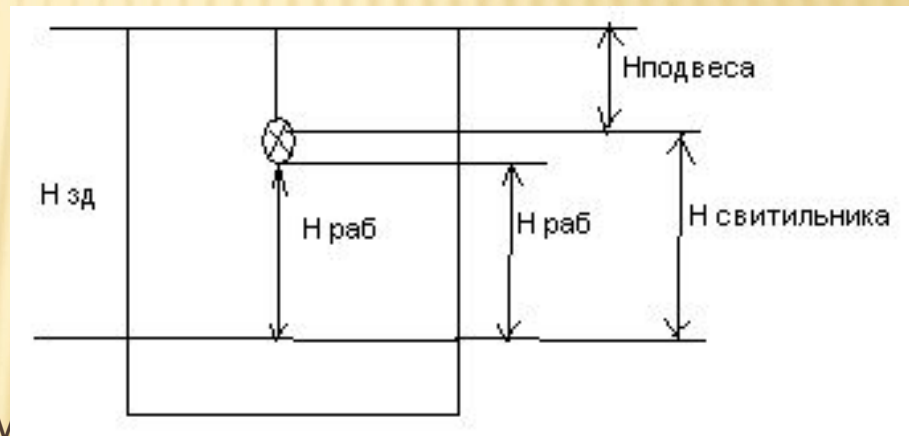
РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОСВЕЩЕНИЯ

В практике проектирования освещения применяют несколько методов расчета: точечный, коэффициента использования светового потока и метод удельной мощности.

Метод коэффициента использования светового потока учитывает отражение и применяется для расчета внутреннего освещения помещений производственных и служебных зданий, имеющих коэффициент отражения 0.3 и более.



a и b – ширина и длина помещения (м),
 h – высота подвеса светильников (м)



При расчетах используют таблицы удельной мощности, составляемые в зависимости от типа светильников, освещенности, высоты подвеса, коэффициента отражения поверхностей и коэффициента заноса.

Зная освещаемую поверхность и удельную мощность получают общую установленную мощность

$$P = S \cdot W \cdot 10^{-3}$$

(кВт)

Задаваясь мощностью одной лампы определяют количество светильников N

$$N = \frac{P}{P_{\text{л}}}$$

(целое число)

и определяют реальное значение с учетом N - числа светильников

Расчет сечений проводов и кабелей осветительной сети выполняют по нагреву и проверяют по допустимой потере напряжения.

$$I_{\text{нагр}} = (P_{\text{л}} \cdot N) / (\sqrt{3}) \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{св}} \cdot \eta_{\text{св}}$$

cos		Тип светильника
1	1	лампы накаливания
0.5	0.83	люминисцентная

РАСПОЛОЖЕНИЕ СВЕТИЛЬНИКОВ

Выбор расположения светильников общего освещения является одним из основных вопросов, влияющим на экономичность, качество освещения и удобство эксплуатации.

H - высота помещения; h_c - расстояние светильников от перекрытия; h_p - высота рабочей поверхности над полом в (М),
Расчетная высота:

$$h = H - h_c - h_p \text{ (М)}$$

$$h = H - h_c - h_p \text{ (М)}$$

L - расстояние между светильниками или их рядами; L_A и L_B - расстояние между светильниками в направлении вдоль и поперек помещения, если они неодинаковы. l - расстояние крайних рядов светильников от стены

$h_c = 0-5\text{м}$; $h_p = 0,8-12\text{м}$. Расстояние l рекомендуется принимать $l = 1/2L$ при наличии у стен проходов и около $1/3 L$ в остальных случаях.

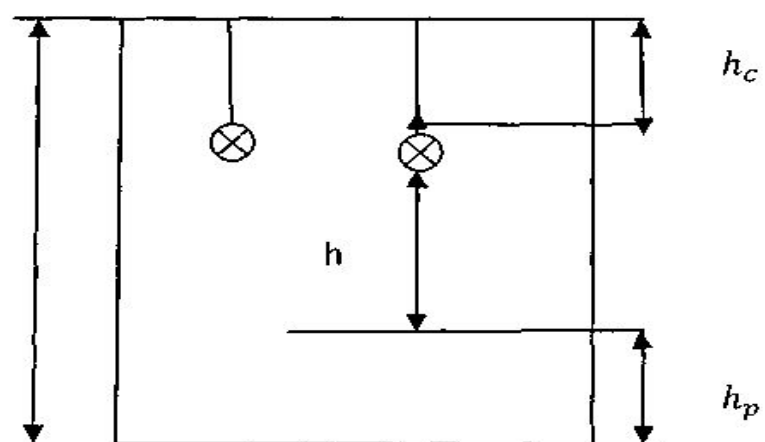


рис. 1

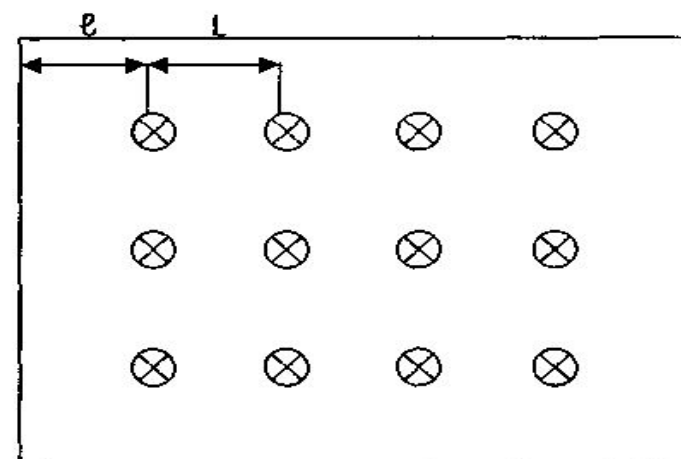


рис. 2

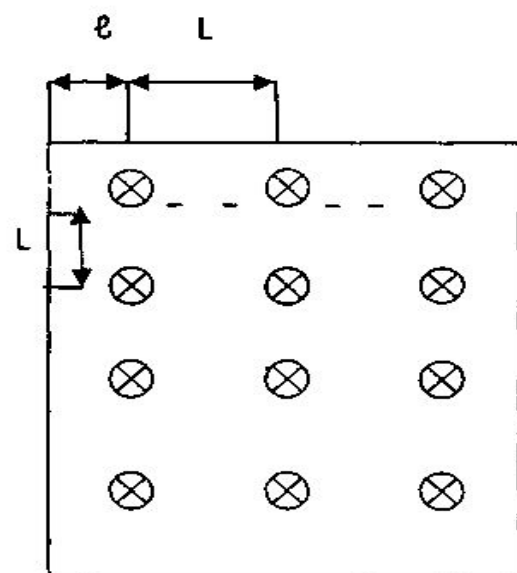


рис. 3

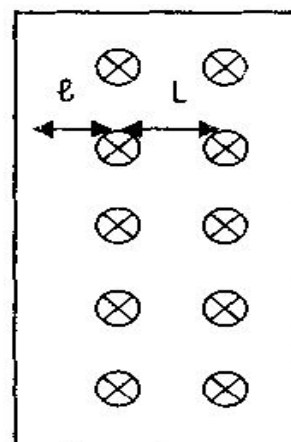


рис. 4

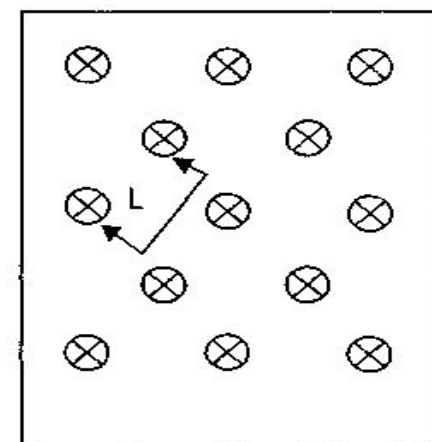


рис. 5