

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

С.В. Константинова

Электрооборудование
кузнечно-штамповочных машин

Учебное пособие

для студентов специальности 1-36 01 05

«Машины и технология обработки материалов давлением»

Учебное электронное издание

М и н с к 2009

УДК 621.97-83 (075.8)

ББК 34.623я7

Т 30

Автор:

С.В. Константинова

Рецензенты:

В.А. Артишевский, заместитель главного редактора журнала «Главный энергетик», кандидат технических наук;

В.Н. Радкевич, доцент кафедры «Электроснабжение» БНТУ, кандидат технических наук

В учебном пособии рассмотрены основные вопросы автоматизированного электропривода и электрооборудования кузнечно-штамповочных машин: механика электропривода, электромеханические свойства электродвигателей постоянного и переменного тока, электрические аппараты и схемы управления электроприводами, расчет мощности и выбор двигателей при различных режимах их работы по нагреву, включая привод с маховиком.

Белорусский национальный технический университет
Пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел (017) 292-77-52 факс (017) 292-91-37
Регистрационный № БНТУ/ФИТР46 – 6.2009

© БНТУ, 2009
© Константинова С.В., 2009
© Константинова С.В.,
компьютерный дизайн, 2009

СОДЕРЖАНИЕ

Сокращения, используемые в пособии	5
1. ЭЛЕКТРОПРИВОД	6
1.1. Составные части электропривода.....	6
1.2. Механика электропривода.....	8
1.3. Основное уравнение движения электропривода.....	9
1.5. Расчет момента инерции привода J	15
2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ (ИЗОБРАЖЕНИЕ НА ПЛОСКОСТИ) И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ДИАГРАММЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН.....	17
3. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ	20
3.1. Принцип работы и устройство асинхронных машин	20
3.2. Схемы замещения асинхронных машин	21
3.3. Механическая характеристика асинхронной машины	23
3.4. Способы регулирования скорости вращения асинхронного двигателя ...	26
3.5. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя в кузнечно-штамповочных машинах.....	31
3.6. Способы пуска асинхронных двигателей	32
3.7. Тормозные режимы асинхронного двигателя	33
4. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА (ДПТ).....	36
4.1. Уравнение механической характеристики	37
4.2. Естественная механическая характеристика	38
4.3. Регулирование скорости	39
4.3.1. Регулирование скорости изменением сопротивления якорной цепи... 39	
4.3.2. Регулирование скорости изменением напряжения питания..... 39	
4.3.3. Регулирование скорости изменением магнитного потока..... 40	
4.4. Тормозные режимы	41
4.4.1. Рекуперативное торможение.....	41
4.4.2. Торможение противовключением	42
4.4.3. Динамическое торможение	43
4.5. Основные области применения.....	44

5. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ КШМ	45
5.1. Требования к электрооборудованию кузнечно-штамповочных машин ...	45
5.2. Электропривод кузнечно-штамповочных машин.....	47
5.3. Электрические машины, применяемые в КШМ	48
5.4. Особенности работы электропривода КШМ.....	49
5.5. Применение асинхронных двигателей повышенного скольжения для ударной нагрузки.....	52
5.6. Согласование параметров маховика и электродвигателя	53
6. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ	57
6.1. Выбор мощности электродвигателя	59
6.2. Этапы выбора электродвигателя.....	65
ЛИТЕРАТУРА	67

СОКРАЩЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ПОСОБИИ

АД	– асинхронный двигатель
АМ	– асинхронная машина
АЭП	– автоматизированный электропривод
ДОСМ	– датчик обратной связи механический
ДОСЭ	– датчик обратной связи электрический
ДПТ	– двигатель постоянного тока
ДПТ НВ	– двигатель постоянного тока независимого возбуждения
ДПТ ПВ	– двигатель постоянного тока последовательного возбуждения
ДПТ СВ	– двигатель постоянного тока смешанного возбуждения
ЗУ	– задающее устройство
КЗР	– короткозамкнутый ротор
КШМ	– кузнечно-штамповочная машина
КШО	– кузнечно-штамповочное оборудование
МПТ	– машина постоянного тока
ОВ	– обмотки возбуждения
ОС	– обратная связь
П	– преобразователь электроэнергии
ПУ	– передаточное устройство
ПУЭ	– правило устройств электроустановок
РО	– рабочий орган исполнительного механизма
СД	– синхронные двигатели
СУ	– система управления
ТБ	– техника безопасности
УУ	– устройство управления
ФР	– фазный ротор
ЭД	– электродвигатель
ЭМ	– электрическая машина
ЭП	– электропривод

1. ЭЛЕКТРОПРИВОД

1.1. Составные части электропривода

Рациональное проектирование современного автоматизированного электропривода (АЭП) требует глубокого знакомства с условиями работы производственного механизма. Оно может вестись лишь на основе тщательно разработанного технического задания, в котором должны быть учтены все особенности производственного процесса и условия работы исполнительного механизма.

Электропривод (ЭП) является одним из основных элементов любой электромеханической системы. От его свойств и характеристик в значительной мере зависит производительность рабочей машины и качество выпускаемой ею продукции. Поэтому проектирование ЭП должно вестись взаимосвязано с проектированием рабочей машины.

В простейшем случае ЭП представляет собой электродвигатель (ЭД), питаемый от сети и приводящий в движение с неизменной скоростью какой-либо механизм. При этом система управления может сводиться к обычному пакетному выключателю, включающему двигатель в сеть.

Электропривод – электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенных для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением.

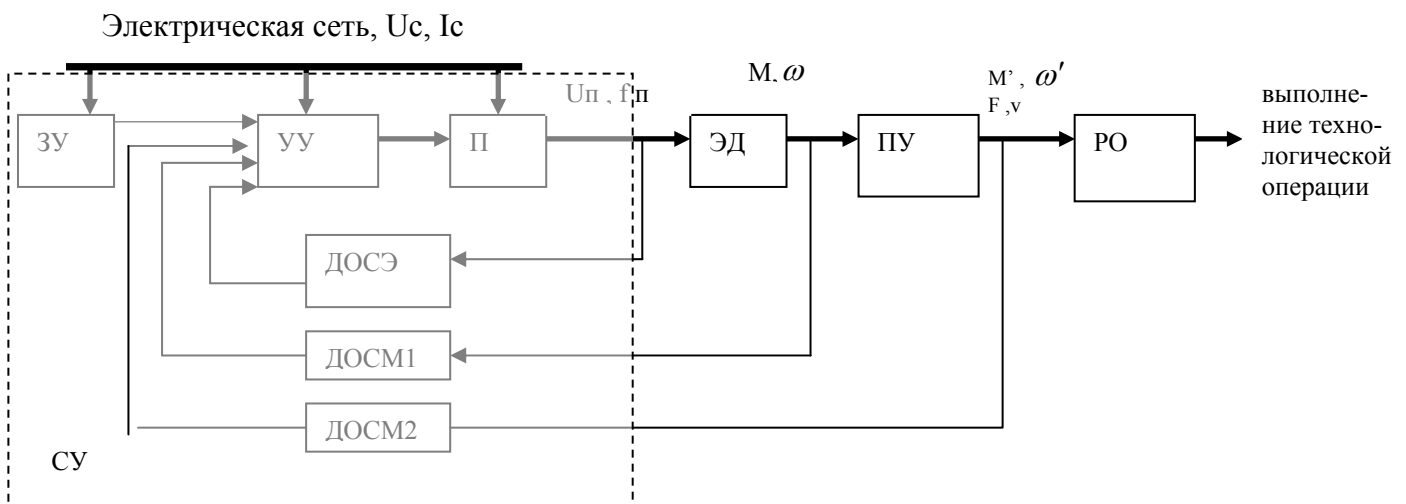


Рис. 1.1. Структурная схема автоматизированного электропривода

На рис. 1.1. изображена структурная схема автоматизированного электропривода (АЭП), где:

П – преобразователь электроэнергии, устройство, преобразующее электроэнергию сети с параметрами U_c, I_c (электрическая сеть постоянного тока

характеризуется величиной постоянного напряжения U и тока I , электрическая сеть переменного тока характеризуется величиной напряжения U , частотой f , количеством фаз) в электроэнергию с параметрами U_p , I_p (преобразователи, выпрямители, трансформаторы). П предназначен для питания электродвигателя и создания управляющего воздействия на него;

ЭД – электродвигатель (преобразует электрическую энергию в механическую с параметрами M (вращающийся момент), ω (угловая скорость вращения));

ПУ – передаточное устройство (кинематическая цепь). ПУ – передаточный механизм (устройство) осуществляет преобразование движения в механической части ЭП. При помощи ПУ может увеличиваться или снижаться скорость, изменяться вид движения (например, преобразовываться вращательное в поступательное). К ПУ относятся редукторы, винтовые, зубчатые, реечные, ременные передачи, кривошипно-шатунные механизмы... ПУ характеризуется коэффициентом передачи, механической инерционностью и упругостью его элементов;

УУ – устройство управления, сравнивает показания датчиков с опорными величинами. УУ управляет преобразователем и получает командные сигналы от задающего устройства (ЗУ), а информацию о текущем состоянии ЭП и технологического процесса – от датчиков обратной связи (ОС). С помощью этих датчиков ток, напряжение, мощность (или другие электрические параметры) а так же скорость, момент или усилие, положение (перемещение) исполнительного органа рабочей машины, преобразуются в пропорциональные этим параметрам электрические сигналы, которые подаются в УУ. В нем текущее состояние ЭП и технологического процесса сравнивается с заданным и при наличии рассогласования вырабатывается управляющий сигнал, воздействующий через П на ЭД в направлении устранения возникшего рассогласования с требуемой точностью и быстродействием;

РО – рабочий орган исполнительного механизма, при вращательном движении характеризуется моментом инерции J_{po} , угловой скоростью ω_{po} и моментом M_{po} ; при поступательном движении – массой m_{po} , линейной скоростью v_{po} и силой F_{po} .

Верхний ряд прямоугольников отражает структуру так называемой разомкнутой системы АЭП, которая характеризуется тем, что выходные параметры системы M_{po} , ω_{po} , (F_{po}, v_{po}) не связаны электрически с входом этой системы (система не имеет обратных связей).

Жирными линиями обозначен силовой поток мощности, соответственно тонкими – слаботочные линии или провода управления.

Обратная связь (ОС) – канал воздействия выходных или промежуточных параметров системы на ее управляющий вход. Для организации ОС не-

обходимы датчики (ДОСЭ – датчики обратной связи электрические, ДОСМ – датчики обратной связи механические).

В структурной схеме можно выделить 3 части:

- 1) электрический двигатель (ЭД);
- 2) механическая часть, для передачи механической энергии от ЭД к исполнительному органу и для изменения вида и скорости движения;
- 3) система управления (СУ).

1.2. Механика электропривода

Механическая часть ЭП передает механическую энергию с помощью ПУ от вала ЭД к рабочему органу производственной машины, где эта энергия реализуется в полезную работу. Механическая часть ЭП состоит из нескольких звеньев и может представлять собой сложную кинематическую цепь с большим числом движущихся элементов. Конструктивное выполнение механической части может быть различным, но имеет определенные звенья:

ЭД, как звено механической части – источник или потребитель механической энергии. В механическую часть привода входит лишь вращающаяся часть ЭД – его ротор, который обладает определенным моментом инерции и может вращаться с некоторой угловой скоростью ω и развивать движущий или тормозящий момент M .

Элементы ПУ вращаются или движутся поступательно с разной скоростью, имеют определенный момент инерции (массу), соединения между ними в общем случае содержат зазоры. Наличие этих свойств элементов ПУ вносит определенные искажения в процесс передачи движения и требует соответствующего учета. Анализ механического движения осуществляется с помощью расчетных схем ЭП, получаемым по определенным правилам.

Для облегчения расчетов переходят к расчетной схеме, т.е. обычно приводят все инерционные массы механических звеньев, все внешние моменты и силы к валу ЭД. Движущие моменты, инерционные массы, моменты сопротивления должны быть пересчитаны так, чтобы сохранились кинематические и динамические свойства исходной системы.

Расчетную схему можно свести к одному обобщенному жесткому звену, имеющему эквивалентную массу с моментом инерции J_{Σ} , на которую воздействует электромагнитный момент двигателя M и суммарный приведенный к валу двигателя момент сопротивления (статический момент M_c), включающий все механические потери в системе, в том числе механические потери в двигателе. Считаем, что система абсолютно жесткая (рис. 1.2).

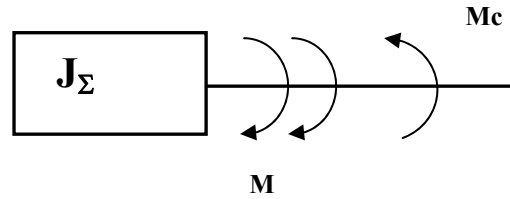


Рис. 1.2. Расчетная схема ЭП

Механическое движение элементов ЭП описывается с помощью законов электромеханики.

В соответствии с основным законом динамики для вращающегося тела векторная сумма моментов, действующих относительно оси вращения, равна производной момента количества движения. Движение материального тела определяется вторым законом Ньютона:

$$\Sigma \vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \text{ – для поступательного движения;}$$

$$\sum_{i=1}^n \vec{M}_i = J \frac{d\vec{\omega}}{dt} \text{ – для вращательного движения,}$$

где ΣM , ΣF – векторные суммы моментов и сил, действующих на тело,

$$\frac{d\vec{\omega}}{dt} = \vec{\varepsilon}, \quad \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{a} \text{ – угловое ускорение и ускорение поступательно движущегося тела соответственно;}$$

где $\vec{\varepsilon}$, \vec{a} – угловое и линейное ускорения соответственно;

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}, \quad v = \frac{ds}{dt} \text{ – угловая и линейная скорости тел, движущихся вращательно и поступательно соответственно.}$$

Момент сопротивления M_c , возникающий на валу рабочей машины, состоит из двух слагаемых: полезной работы Р.О. (связана с выполнением соответствующей технологической операции) и работы сил трения.

1.3. Основное уравнение движения электропривода

Для приведения к валу ЭД момента или усилия нагрузки РО производственной машины используют баланс мощностей в механической части ЭП.

Баланс мощностей для ЭП можно записать следующим образом:

$$P = P_c + P_d, \tag{1.1}$$

где P – мощность, развиваемая ЭД (Вт);

P_c – мощность статической нагрузки, в том числе и мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения;

P_d – мощность, обусловленная изменением кинетической энергии системы.

Запишем выражение определения мощности для вращательного движения:

$$P = M\omega; P_C = M_C\omega; P_D = \frac{dA_k}{dt} = M_D\omega,$$

где M – вращающий момент ЭД, Нм;

ω – угловая скорость вала ЭД, рад/сек;

M_C – момент статической нагрузки, приведенный к валу ЭД, Нм;

$\frac{dA_k}{dt}$ – скорость нарастания кинетической энергии системы $A_k = \frac{J\omega^2}{2}$;

P_D, M_D – динамическая мощность и динамический момент, учитывающие изменение кинетической энергии A_k :

$$P_D = \frac{dA_k}{dt} = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \left(\frac{dJ}{dt} \right) \Rightarrow P_D = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt}, \quad (1.2)$$

где $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$ – угловая скорость;

$d\alpha$ – угол поворота вала ЭД за время dt ;

J – момент инерции системы, приведенный к валу ЭД.

Определим динамический момент:

$$M_D = \frac{P_D}{\omega} = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}, \quad (1.3)$$

тогда в соответствии с (1.1) можно записать:

$$M = M_C + M_D.$$

Уравнение движения ЭП, в общем виде, имеет вид

$$M = M_C + J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}, \quad (1.4)$$

или

$$M - M_C = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}, \quad (1.5)$$

где M и ω – текущие значения момента и угловой частоты вращения ЭД. Момент M и ω связаны механической характеристикой.

В ряде случаев M_C определяется угловой скоростью производственного механизма (вентилятора, насоса, компрессора).

Момент инерции привода J для большинства машин (кривошипных) является периодической функцией, явно зависящей от угла α или времени t . Если момент инерции J не зависит от угла α или в приводе КШМ есть маховик с большим моментом инерции (что справедливо для значительного числа механизмов), уравнение движения приобретает вид:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.6)$$

Решение уравнения (1.6) определяется законом движения вала ЭД. Движение других элементов привода определяется их кинематическими связями.

Вместо момента инерции часто вводится понятие махового момента GD^2 :

$$GD^2 = 4gJ; \quad J = \frac{GD^2}{4g},$$

где G – вес системы (сила тяжести), Н;

D – диаметр инерции, м;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

В этом случае уравнение движения ЭП принимает следующий вид:

$$M = M_c + \frac{GD^2 dn}{375dt} + \frac{n^2}{7200} \frac{dGD^2}{d\alpha}, \quad (1.7)$$

где n – скорость вращения вала ЭД (об/мин).

$$\omega = \frac{2 \pi n}{60} = \frac{\pi n}{30}.$$

Если $GD^2 = const$, тогда

$$M = M_c + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}. \quad (1.8)$$

Выражение определения мощности для поступательного движения запишем следующим образом:

$$P = Fv; \quad P_c = F_c v; \quad P_d = \frac{dA_k}{dt},$$

где F – движущая сила, Н;

v – скорость перемещения точки приложения этой силы, м/сек;

F_C – сила сопротивления, приведенная к скорости v ;

$A_k = \frac{mv^2}{2}$ – кинетическая энергия;

m – масса системы, приведенная к скорости точки приложения силы.

Тогда для поступательного движения уравнение движения ЭП имеет вид:

$$F = F_C + m \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{2} \frac{dm}{dL}, \quad (1.9)$$

где L – путь, пройденный точкой приложения силы.

Если масса системы остается неизменной $m = const$, то уравнение движения ЭП для поступательного движения запишется в виде

$$F = F_C + m \frac{dv}{dt}. \quad (1.10)$$

Статические моменты (моменты сопротивления) делятся на активные и реактивные:

активные – обусловлены потенциальными силами и не меняют своего направления при изменении направления движения (при подъеме и опускании груза), активные моменты могут быть движущими и могут препятствовать движению.

реактивные – всегда направлены против движения, моменты, обусловленные силами трения, а также рабочие моменты не потенциальных сил являются реактивными.

При установившемся режиме работы ЭП $M = M_C$, скорость привода постоянна.

Во многих случаях привод или замедляется или ускоряется, тогда возникает инерционный момент (сила), которые ЭД должен преодолевать, находясь в переходном режиме. Переходный режим ЭП – режим работы при переходе от одного установившегося состояния к другому. Причины возникновения переходных режимов в ЭП – изменение нагрузки, связанное с производственным процессом, либо воздействие на ЭП при управлении им, т.е. пуск, торможение, изменение направления движения, а также в результате аварий, нарушения нормальных условий электроснабжения (например, изменение напряжения, или частоты сети, несимметрия напряжения).

Уравнение движения ЭП должны учитывать все силы и моменты, действующие в переходных режимах:

$$\pm M \mp M_C = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.11)$$

Уравнение движения показывает, что развиваемый двигателем вращающий момент M , уравновешивается моментом сопротивления M_C на его валу и инерционным, или динамическим моментом $M_d = J \frac{d\omega}{dt}$. Знаки $+$ и $-$ говорят о двигательном и тормозном режимах работы.

1.4. Приведение статических моментов и усилий к валу электродвигателя

Обычно ЭД приводит в действие производственный механизм через систему передач. При расчетах все моменты и усилия необходимо привести к одному валу (чаще к валу ЭД), учитывая при этом потери на трение КПД (η) передач.

В качестве примера рассмотрим следующую кинематическую схему (рис. 1.3).

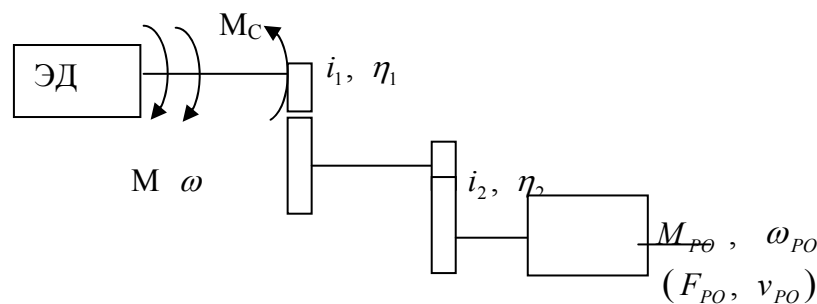


Рис. 1.3. Кинематическая схема механизма

Мощность, развиваемая на валу ЭД (P_C) рассчитывается следующим образом:

$$P_C = M_C \omega, \quad (1.12)$$

где M_C – момент сопротивления на валу ЭД (статический момент, приведенный к валу ЭД).

Мощность на Р.О. исполнительного механизма P_{PO} , определяется по формулам:

$$P_{PO} = M_{PO} \cdot \omega_{PO} \quad (1.13)$$

для вращательного движения, где M_{PO} – момент на РО;

$$P_{PO} = F_{PO} \cdot v_{PO} \quad (1.14)$$

для поступательного движения, где F_{PO} – усилие нагрузки на РО,

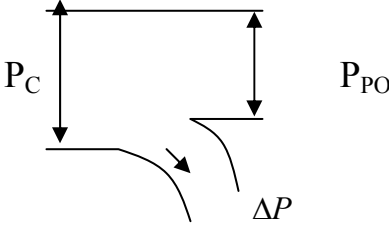
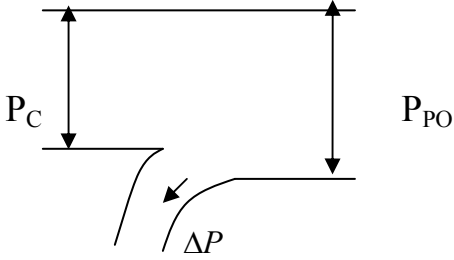
где $i_{PO} = \frac{\omega}{\omega_{PO}} = i_1 i_2$ – передаточное отношение;

$i_1 = \frac{\omega}{\omega_1}$, $i_2 = \frac{\omega_1}{\omega_{PO}}$ – передаточные отношения редукторов.

Выражения приведения статических моментов и усилий к валу ЭД в зависимости от режима работы ЭП, с учетом КПД, сведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Учет потерь в передачах

1. Двигательный режим (подъем груза)	2. Тормозной режим (спуск груза)
 <p> $P_C = P_{PO} + \Delta P$; $P_C = \frac{P_{PO}}{\eta}$ для вращательного движения: $M_C \omega = \frac{M_{PO} \omega_{PO}}{\eta}$, тогда $M_C = \frac{M_{PO} \omega_{PO}}{\eta \omega} = \frac{M_{PO}}{\eta i_p}$ для поступательного движения: $M_C \omega = \frac{F_{PO} v_{PO}}{\eta}$, тогда $M_C = \frac{F_{PO} \rho}{\eta}$ </p>	 <p> $P_C = P_{PO} - \Delta P$; $P_C = P_{PO} \eta$ для вращательного движения: $M_C \omega = M_{PO} \omega_{PO} \eta$, тогда $M_C = \frac{M_{PO} \eta}{i_p}$ для поступательного движения: $M_C \omega = F_{PO} v_{PO} \eta$, тогда $M_C = \frac{F_{PO} v_{PO} \eta}{\omega}$; $M_C = F_{PO} \rho \eta$ </p>

ΔP – мощность потерь в механических звеньях;

ω – угловая скорость вала ЭД, $\omega = \frac{\pi n}{30}$;

η – КПД механической части ЭП, $\eta = \eta_1 \eta_2$;

$\rho = \frac{v}{\omega}$ – радиус приведения усилия нагрузки к валу ЭД.

Необходимо отметить, что i_{PO} и ρ определяются по конструктивным параметрам ПУ.

Общее выражение для приведения статических моментов к валу ЭД имеет вид:

$$M_C = M_P + \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{i_i \eta_i} + \sum_{k=1}^l \frac{F_k v_k}{\eta_k \omega}, \quad (1.15)$$

где M_P – статический момент, приложенный к ротору ЭД. Второе и третье слагаемые учитывают моменты всех частей движущихся вращательно и поступательно соответственно.

1.5. Расчет момента инерции привода J

Инерционное действие вращающихся частей механизма, находящихся на промежуточных валах можно заменить действием воображаемого маховика, расположенного на валу ЭД и обладающего запасом кинетической энергии, равным запасу кинетической энергии действующих частей. Приведение инерционных масс и моментов инерции механических звеньев к валу ЭД заключается в том, что эти массы и моменты инерции заменяются одним эквивалентным моментом инерции J на валу ЭД. Условием приведения являются равенство кинетической энергии, определяемой эквивалентным моментом инерции и суммой кинетических энергий всех движущихся элементов механической части привода (т.е. расчет J производится исходя из условия равенства кинетических энергий, запасенных во всех движущихся элементах ЭП и кинетической энергии, которая должна быть запасена в искомом J). Рассчитаем момент инерции для примера на рис. 1.3:

Пусть $J \frac{\omega^2}{2}$ – кинетическая энергия, запасенная моментом инерции J ,

тогда

$$J_1 \frac{\omega_1^2}{2} = J'_1 \frac{\omega^2}{2}; \quad J_2 \frac{\omega_2^2}{2} = J'_2 \frac{\omega^2}{2},$$

где J'_1, J'_2 – моменты инерции, приведенные к валу ЭД.

$$J'_1 = J_1 \frac{\omega_1^2}{\omega^2} = J_1 \frac{1}{i_1^2}; \quad J'_2 = J_2 \frac{\omega_2^2}{\omega^2} = J_2 \frac{1}{i_2^2},$$

где $i_1 = \frac{\omega}{\omega_1}, \quad i_2 = \frac{\omega}{\omega_2}$.

Суммарный момент инерции равен сумме моментов инерции, приведенных обычно к валу ЭД. Деталь механизма с массой m , движущуюся поступательно со скоростью v , заменяем воображаемой деталью с моментом инерции J'_Π , расположенным на валу ЭД. Запас кинетической энергии остается неизменным:

$$J'_\Pi \frac{\omega^2}{2} = m \frac{v^2}{2}; \Rightarrow J'_\Pi = m \frac{v^2}{\omega^2},$$

$$J \frac{\omega^2}{2} = J_\Delta \frac{\omega^2}{2} + \sum_{i=1}^n J_i \frac{\omega_i^2}{2} + \sum_{k=1}^l m_k \frac{v_k^2}{2}, \quad (1.16)$$

где J_Δ – момент инерции двигателя, определяемый из каталога.

Делим выражение (1.16) на $\omega^2 / 2$:

$$J = J_\Delta + \sum_{i=1}^n J_i \frac{1}{i_i} + \sum_{k=1}^l m_k \left(\frac{v_k}{\omega}\right)^2. \quad (1.17)$$

Второе и третье слагаемые уравнения являются суммарными моментами инерции всех вращательно и поступательно движущихся элементов ЭП соответственно.

Маховые моменты вращающихся частей механизма пропорциональны моментам инерции, поэтому приведение маховых моментов осуществляется аналогично:

$$(GD^2)'_\Pi = \frac{364Gv^2}{n},$$

где G – вес детали, движущийся последовательно.

2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ (ИЗОБРАЖЕНИЕ НА ПЛОСКОСТИ) И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ДИАГРАММЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Механической характеристикой называется зависимость, связывающая момент (M) и скорость (ω) электродвигателя (ЭД).

Положение точки на плоскости характеризует режим работы ЭД (рис. 2.1).

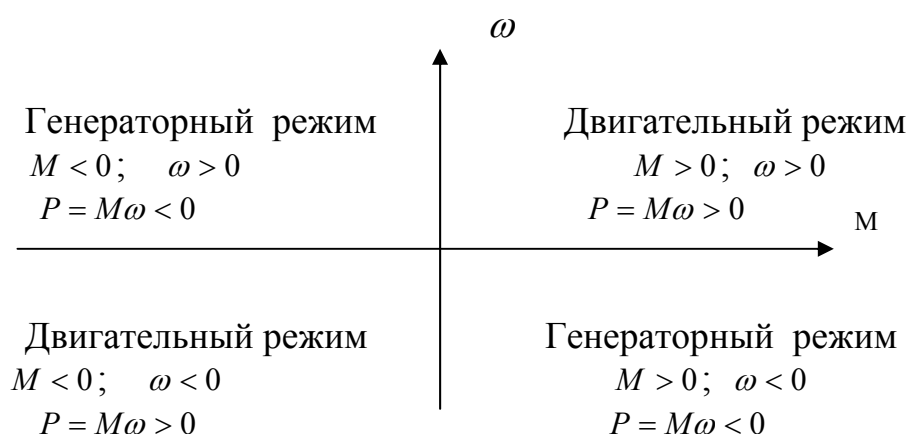
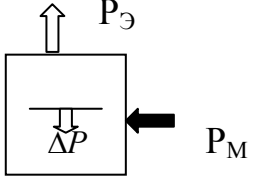
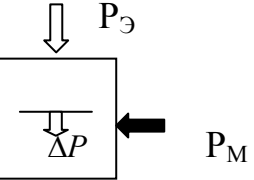
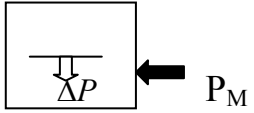


Рис. 2.1. Области двигательного и генераторного режимов ЭД в плоскости ω, M

Электрические машины (ЭМ) могут работать как в двигательном, так и в генераторном режимах. В двигательном режиме ЭМ развивает движущийся момент, а в генераторном – тормозной. В отличие от двигательного режима, генераторных (тормозных) может быть несколько, в зависимости от того, как используется преобразованная электроэнергия (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Энергетические диаграммы работы ЭМ	
Энергетическая диаграмма	Двигательный режим работы
<p>Двигательный режим</p> <p style="text-align: center;">↓ $P_{\text{Э}}$</p> <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;"> <p style="text-align: center;">↓ ΔP</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>→ P_M</p> </div> </div>	<p>$P_{\text{Э}}$ – электромагнитная мощность ЭД, потребляемая из сети;</p> <p>ΔP – потери мощности;</p> <p>P_M – механическая мощность на валу ЭД.</p> <p style="text-align: center; margin-top: 20px;">$P_{\text{Э}} = P_M + \Delta P$</p>

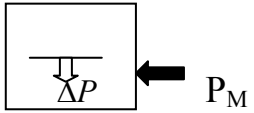
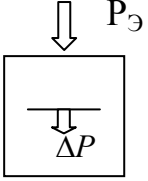
Энергетическая диаграмма	Тормозные режимы электрических машин
	<p>1. Генераторный режим с отдачей энергии в сеть (режим рекуперативного торможения), параллельно с сетью.</p> $P_M = P_{\text{э}} + \Delta P$ <p>Переход из двигательного режима в режим рекуперативного торможения возможен при увеличении скорости вращения ротора ЭД выше скорости холостого хода $\omega > \omega_{\text{ХХ}}$</p>
	<p>2. Режим торможения противовключением (последовательно с сетью). ЭМ потребляет как механическую энергию с вала, так и электрическую энергию из сети.</p> $P_M + P_{\text{э}} = \Delta P$ <p>Режим характеризуется большими электрическими потерями</p>
	<p>3. Режим динамического торможения. В этом случае на потери в силовой цепи ЭД расходуется только преобразованная электрическая энергия. Энергию из сети ЭД не получает.</p> $P_M = \Delta P$ <p>ЭД отключают от сети и в его силовую цепь вводят дополнительное сопротивление.</p>

В рассмотренных трех тормозных режимах учитываются мощности и потери только на пути электромеханического преобразования энергии. Потери, связанные с созданием магнитного потока не включены в баланс мощностей.

Также имеются граничные режимы работы ЭД – отделяющие двигательный режим от генераторного. Эти режимы соответствуют определенным точкам на координатных осях ω, M – режимы холостого хода и короткого замыкания (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Граничные режимы работы ЭД

Энергетическая диаграмма	Режим работы
	<p>Режим идеального холостого хода (и.х.х.)</p> $M = 0 \text{ при } \omega \neq 0; P_{\text{Э}} = 0$ <p>Чтобы ЭМ могла работать в этом режиме, требуется к ее валу подвести небольшую мощность, компенсирующую механические потери и дополнительные потери вне силовой цепи.</p>
	<p>Режим короткого замыкания</p> $\omega = 0; M \neq 0; P_M = 0; P_{\text{Э}} > 0$ <p>При этом потребляемая из сети электрическая энергия полностью расходуется на потери.</p>

3. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

3.1. Принцип работы и устройство асинхронных машин

По сравнению с другими электродвигателями (ЭД), асинхронные двигатели (АД) отличаются простотой, надежностью и меньшей стоимостью. Большинство кузнечно-штамповочных машин приводится в движение АД.

Трехфазный асинхронный двигатель состоит из неподвижной части (статора), в пазах которого помещены 3 катушки, создающие круговое вращающееся магнитное поле, и подвижной части (ротора).

Допустим, в начале ротор неподвижен. При этом вращающееся магнитное поле, созданное обмотками статора, пересекает обмотку неподвижного ротора с угловой скоростью ω_0 и наводит в ней ЭДС. ЭДС вызывают токи в обмотке ротора. По закону Ленца эти токи стремятся своим магнитным полем ослабить вызвавшее их магнитное поле. Механическое взаимодействие токов ротора с вращающимся магнитным полем приведет к тому, что ротор начнет вращаться в ту же сторону, что и магнитное поле со скоростью ω .

В установившемся режиме скорость вращения ротора составляет $(0,98 - 0,95) \omega_0$.

Асинхронные двигатели изготавливают двух основных типов – с короткозамкнутым ротором и с фазным ротором.

АД с фазным ротором (АД с ФР) имеют на роторе обмотку, выполненную по типу 3-фазной обмотки на статоре. Обмотка ротора соединяется обычно в звезду, а концы выводятся наружу через контактные кольца и щетки на пусковой реостат.

АД с короткозамкнутым ротором выполняются в трех основных модификациях:

- 1) с одиночной беличьей клеткой на роторе;
- 2) с двойной беличьей клеткой на роторе;
- 3) двухклеточные.

Короткозамкнутый ротор АД “беличья клетка” набирается из пакетов электротехнической стали и имеет пазы. В каждом пазу находится медный или алюминиевый стержень. Торцевые части стержней замыкаются кольцами. В машинах с мощностью до 100 кВт стержни обычно изготавливаются путем заливки ротора алюминием.

АД с короткозамкнутым ротором (АД с КЗР) имеют большие пусковые токи и сравнительно небольшой пусковой момент. При одинаковой мощности АД с короткозамкнутым ротором имеют несколько лучшие энергетические показатели – η , $\cos\varphi$, чем АД с фазным ротором.

Существующие АД с короткозамкнутым ротором специального исполнения (с двойной беличьей клеткой, с глубоким пазом, с повышенным скольжением) имеют несколько большую кратность пускового момента:

– АД серии 4А до 100 кВт, U до 500 В, и $s = (0,02 - 0,03)$ используются для длительного режима работы, когда не требуется большого пускового момента (для вентиляторов, насосов, станков);

– АД серии 4А с повышенным пусковым моментом 4АР мощностью до 100 кВт, U до 500 В. ($\frac{M_n}{M_n} \approx 8 \div 2$; $\frac{M_{max}}{M_n} \approx 2,2$; $\frac{I_n}{I_n} \approx 6 \div 7,5$; $s \approx 0,023 \div 0,03$). У этих АД ротор имеет или глубокий паз или двойную беличью клетку. Их используют при длительном режиме работы для плунжерных насосов, толкателей;

– АД серии 4А – с повышенным скольжением $s = (0,1 - 0,16)$. Эти АД имеют пониженный η и $\frac{M_n}{M_n} \approx 1,8 \div 2,1$; $\frac{M_{max}}{M_n} \approx 1,6 \div 2,4$; $\frac{I_n}{I_n} \approx 4 \div 6,5$. Используются для длительного режима в случае ударной (молоты, прессы, ножницы) или пульсирующей (небольшие поршневые компрессоры) нагрузки, так как они позволяют лучше использовать кинетическую энергию маховика.

Применение АД с повышенным скольжением целесообразно при кратковременных режимах работы, когда необходим большой пусковой момент (для привода задвижек и шиберов).

3.2. Схемы замещения асинхронных машин

В АМ скорость вращения поля ($\omega_0 = f/p$) и скорость вращения ротора (ω) различны. Относительная разность скоростей вращения поля и ротора называется скольжением (s)

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (3.1)$$

В АМ ротор вращается относительно магнитного поля со скоростью ($\omega_0 - \omega$). Поэтому, наводимые в роторе ЭДС имеют частоту скольжения

$$f_2 = p(\omega_0 - \omega) = p\omega_0 \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = fs. \quad (3.2)$$

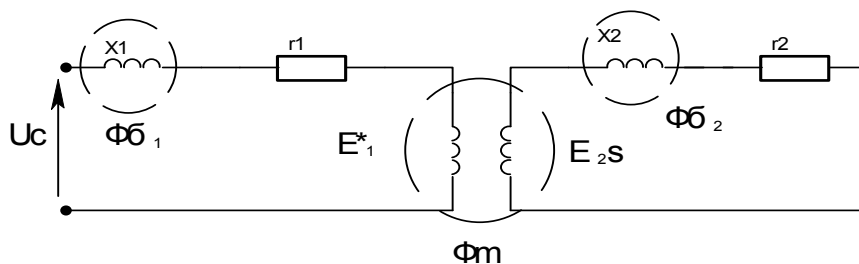


Рис. 3.1. Физическая схема связи первичной и вторичной цепи АМ

На рис. 3.1 представлена физическая схема связи первичной и вторичной цепи АМ, где

x_1, r_1 – индуктивное и активное сопротивления обмотки фазы статора;

x_2, r_2 – индуктивное и активное сопротивления фазы ротора;

$\Phi_{б1}$ – поток рассеяния статора;

$\Phi_{б2}$ – поток рассеяния ротора;

E_1 – ЭДС статора;

E_{2s} – ЭДС ротора;

Φ_m – поток взаимоиנדукций (существует в воздушном зазоре между статором и ротором), индуктирующий в обмотке ротора, при его вращении, ЭДС (E_{2s}).

Физическая схема замещения, приведенная к неподвижному ротору, представлена на рис. 3.2.

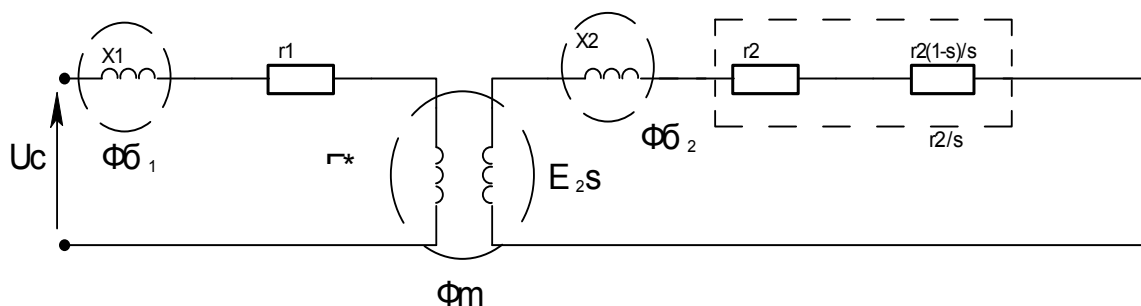


Рис. 3.2. Физическая схема замещения фазы АМ, приведенная к неподвижному ротору

Для приведения схемы к неподвижному ротору, во вторичную цепь вводится добавочное активное сопротивление $r_2(1-s)/s$.

Полная Т-образная схема замещения АМ приведена на рис. 3.3, где x_2', r_2' – индуктивное и активное сопротивления обмотки ротора приведенные к обмотке статора:

$$x_2' = k_e k_i x_2; \quad r_2' = k_e k_i r_2; \quad E_2' = k_e E_2; \quad I_2' = \frac{I_2}{k_i}, \quad (3.3)$$

где k_e, k_i – коэффициенты трансформации по ЭДС и току.

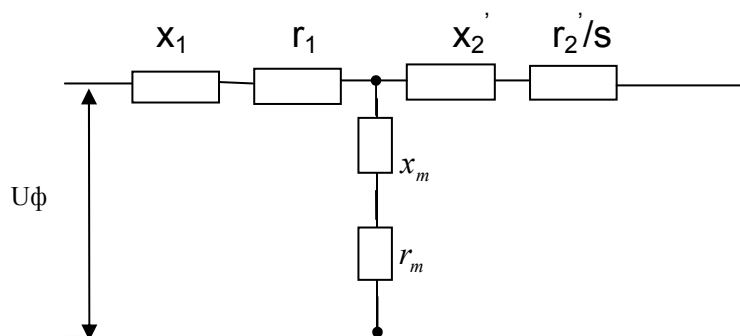


Рис. 3.3. Т-образная схема замещения АМ

На рис. 3.4 приведена полная Г-образная схема замещения АМ, где

$$C = 1 + \frac{Z_1}{Z_m}; \quad R_1 = C_1 r_1; \quad X_1 = C_1 x_1; \quad R_2' = C^2 r_2'; \quad X_2' = C^2 x_2'. \quad (3.4)$$

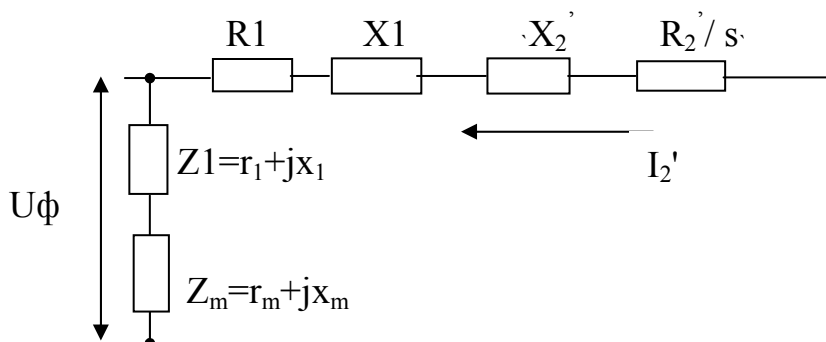


Рис. 3.4. Г – образная схема замещения АМ

3.3. Механическая характеристика асинхронной машины

Механической характеристикой называется зависимость момента M от скорости (ω) или от скольжения (s).

Характеристика, соответствующая номинальным данным ЭД, называется естественной. Если же хотя бы один из параметров отличается от номинального, характеристика называется искусственной.

Запишем выражения для момента и мощности ЭМ:

$$M = \frac{P_{\text{элм}}}{\omega_0}; \quad P_{\text{элм}} = (I_2')^2 \frac{R_2'}{s}. \quad (3.5)$$

На основании Г-образной схемы замещения получаем выражение для тока I_2' :

$$I_2' = \frac{U_\phi}{Z} = \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (3.6)$$

Подставив формулу (3.6) в выражения (3.5), получим уравнение механической характеристики АД:

$$M = \frac{3(I_2')^2 R_2'}{\omega_0 s} = \frac{3}{\omega_0} \left(\frac{U_\phi}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_1 + X_2')^2}} \right)^2 \frac{R_2'}{s} = \frac{3U_\phi^2 \frac{R_2'}{s}}{\omega_0 \left[(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} \quad (3.7)$$

Механическая характеристика представлена на рис. 3.5. Устойчивая работа АД возможна на участке характеристики, заключенной в пределах $s = 0; s = s_k$. При работе на этом участке всякое увеличение нагрузки вызовет снижение скорости вращения и будет сопровождаться увеличением крутящего момента двигателя. Когда момент двигателя станет равным моменту нагрузки, дальнейшее снижение скорости прекратится.

В теории электропривода, при питании АД от сети с неизменной частотой, используют упрощенную Г-образную схему, принимая $C = 1$ (из выражения (3.4)).

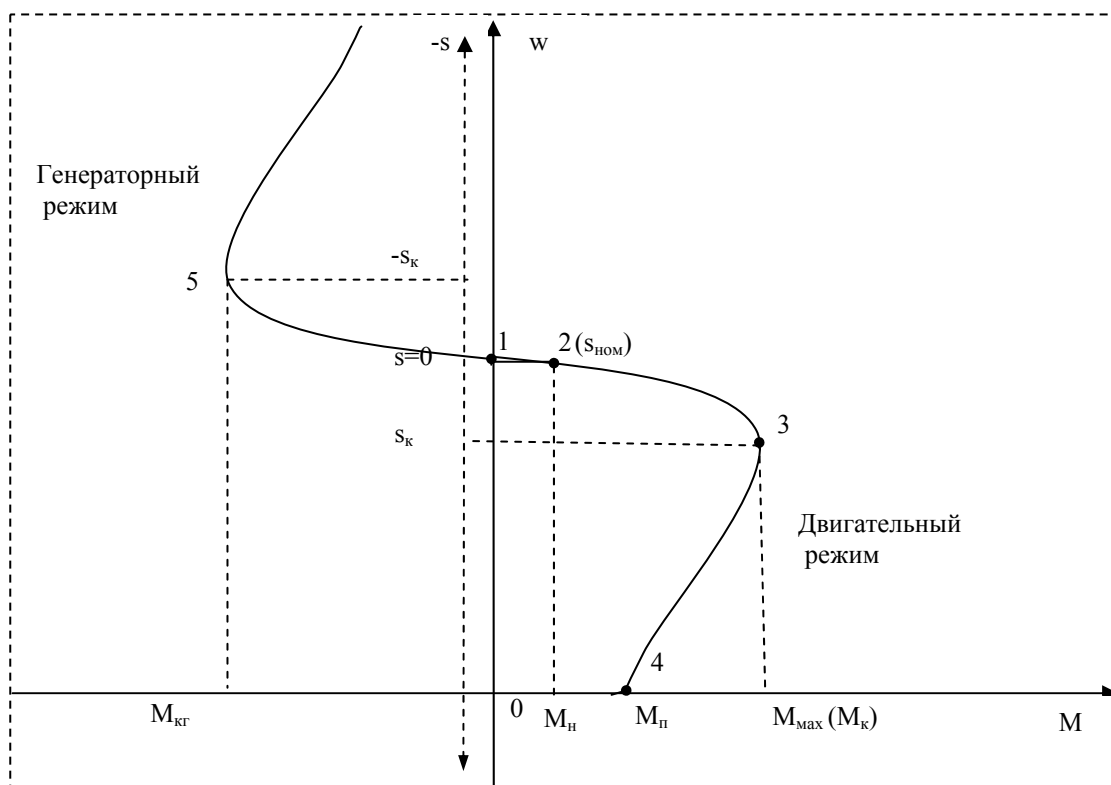


Рис. 3.5. Механическая характеристика АД

Механическая характеристика имеет два максимума: в генераторном и в двигательном режиме.

Рассмотрим основные критические точки:

1) $s = 0$; $M = 0$; $\omega = \omega_0$ – режим идеального холостого хода;

2) $s = s_{ном}$; $M = M_{ном}$ – номинальный режим работы;

3) $s = s_k$; $M = M_k$ – критическая точка двигательного режима (критический момент M_k также называют максимальным (M_{max}) или опрокидывающим);

4) $M = M_{кз} = M_n$; $s = 1$; $\omega = 0$; $I_1 = I_{кз} = I_n$ – точка короткого замыкания (момент пуска);

где $M_{кз}$, $I_{кз}$ – момент и ток короткого замыкания;

M_n , I_n – пусковые момент и ток;

5) $s = -s_k$; $M = M_{кз}$ – критическая точка генераторного режима.

Следует отметить, что критическое скольжение $|s_k|$ в двигательном и генераторном режиме одинаково, а моменты разные.

Критическое скольжение можно найти из уравнения $\frac{dM}{ds} = 0$:

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{R_1 \pm \sqrt{(X_1 + X_2')^2 + R_1^2}}. \quad (3.8)$$

Для упрощения расчетов и построения механической характеристики используют формулу Клосса (без учета активных сопротивлений статора):

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (3.9)$$

где $s_k = \pm \frac{R_2'}{X_k}$ – критическое скольжение, соответствующее критическому моменту M_k (M_{max}):

$$M_k = \pm \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 X_k}; \quad X_k = X_1 + X_2'. \quad (3.10)$$

Асинхронная машина характеризуется:

– коэффициентом перегрузочной способности $k_m = \frac{M_n}{M_{ном}} \approx 1,7 \div 2,2$;

– кратностью пускового момента $k_n = \frac{M_m}{M_{ном}} \approx 0,7 \div 1,8$;

– кратностью пускового тока $k_{ni} = \frac{I_{1n}}{I_{1н}} \approx 5,5 \div 7,0$.

3.4. Способы регулирования скорости вращения асинхронного двигателя

а) Введением добавочных сопротивлений в цепь ротора $R_2'_{\Sigma}$ (рис. 3.6). Основное достоинство – простота реализации. При этом $\omega_0 = const$, s_k увеличивается, $M_k = const$. Плавность регулирования определяется плавностью изменения дополнительного резистора. Применяется когда требуется небольшой диапазон регулирования скорости и работа на пониженных скоростях непродолжительна (ЭП подъемно-транспортных машин и механизмов).

С помощью введения $R_2'_{доб}$ также осуществляется ограничение пускового тока.

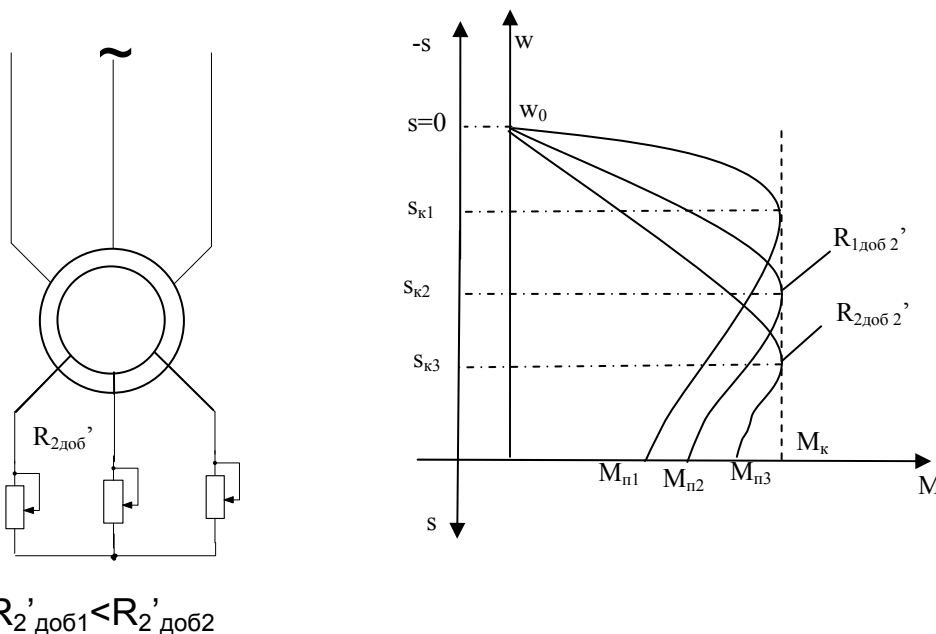


Рис. 3.6. Регулирование скорости вращения АД введением добавочного сопротивления в цепь ротора $R_2'_{доб}$

б) Введением добавочных сопротивлений в цепь статора R_1' , в основном применяется для АД с короткозамкнутым ротором (рис. 3.7). Критический момент и s_k уменьшаются с увеличением R_1 .

Применяется редко для регулирования скорости. В основном применяется для двигателей, имеющих повышенное скольжение в номинальном ре-

жиме. Диапазон регулирования скорости составляет примерно 1,15-1,2. При введении индуктивных сопротивлений в статор также уменьшается s_k и M_k , кроме того, снижается не только КПД двигателя, но и его коэффициент мощности.

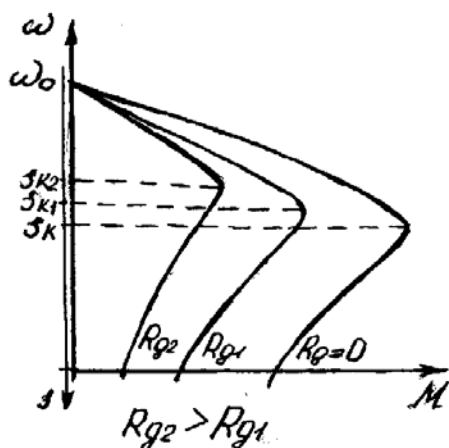


Рис. 3.7.

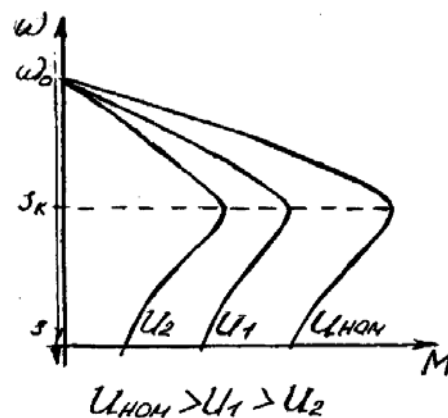


Рис. 3.8.

с) Изменением напряжения на выводах статора, при этом, частота такого напряжения постоянна и равна частоте сети переменного тока.

Критическое скольжение s_k и скорость ω_0 не зависят от напряжения и остаются неизменными при его регулировании, изменяется только критический момент АД (рис. 3.8).

Способ малоприменим для целей регулирования скорости, так как при уменьшении напряжения резко уменьшается M_k ($M_{kp} \approx U^2$). АД очень чувствителен к перенапряжениям и колебаниям напряжения сети, в связи с чем изменение U используется лишь для регулирования момента АД и его тока. При снижении напряжения до $0,7 U_n$ критический момент достигает $0,49 M_n$.

Практически понижение напряжения сказывается ещё больше при пуске АД из-за большого пускового тока. Поэтому для крупных АД (или длинных линиях питания), мощности которых соизмеримы с мощностью трансформаторных подстанций, необходимо выполнять специальные расчеты, подтверждающие возможность нормального пуска АД и работы с пониженным U . Установлен специальный ГОСТ 13109-87 на качество электроэнергии, который предусматривает послеаварийное изменение напряжения в промышленной сети в пределах $U \approx \pm 10\% U_n$. Особенно опасно снижение U для электроприводов, которые по условиям эксплуатации должны запускаться под нагрузкой (приводы транспортеров, грузоподъемных устройств). Например, при пуске без нагрузки статический момент транспортера не превышает $M_c = (0,2 - 0,3) M_n$; а с нагрузкой $M_c \approx M_n$.

d) Изменением частоты. Наиболее перспективный и широко используемый способ регулирования скорости АД. Регулирование скорости изменением частоты является бесступенчатым. Это регулирование является также более экономным.

Частотное управление основывается на законе частотного регулирования (закон Костенко) $\frac{U_1}{U_n} = \frac{f_1}{f_n} \sqrt{\frac{M_1}{M_n}}$. При этом управляя двигателем при ненасыщенной магнитной системе можно сохранить практически неизменными $\cos \varphi, \eta$.

Принцип реализации частотного управления основан на соотношении

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p},$$

где f_1 – частота источника питания;

p – число пар полюсов;

Изменяя частоту тока статора можно плавно регулировать скорость вращения ротора в широких пределах.

Из всего многообразия зависимостей $M_c(\omega)$ рассмотрим три основных типа статических нагрузок:

d1) при постоянном моменте нагрузки $M_c = const; \frac{U_1}{U_n} = \frac{f_1}{f_n}; \Rightarrow \frac{U_i}{f_i} = const$

(согласно закону Костенко), т.е., в этом случае, напряжение на статоре изменяется пропорционально его частоте. Для частоты ниже номинальной ($f_1 < f_n$) критический момент АД постоянен, что обеспечивает неизменную перегрузочную способность двигателя.

При частоте f_1 свыше f_n , когда по техническим условиям напряжение статора не может быть повышено сверх номинального ($U = const = U_n, f_1 > f_n$), критический момент M_k снижается (рис. 3.9).

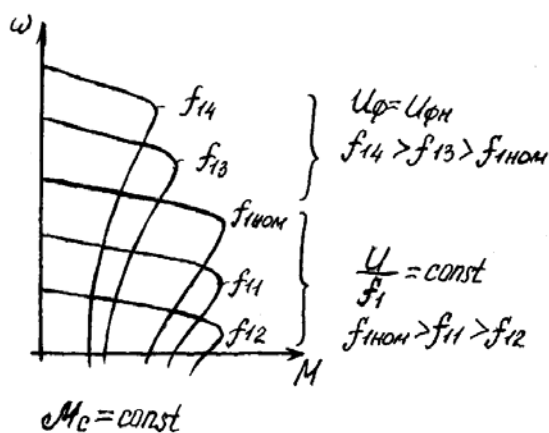


Рис. 3.9.

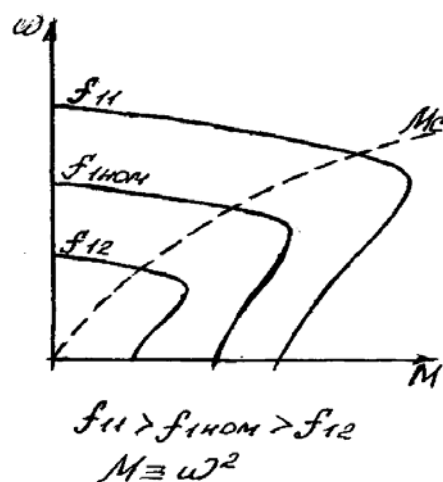


Рис. 3.10.

d2) для вентиляторного характера момента (частотное управление осуществляется при квадратичном статическом моменте)

$$\frac{M}{M_n} = \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \Rightarrow M = M_n \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2, \text{ тогда необходимо, чтобы } \frac{U_n}{f_n^2} = const.$$

В этом случае механические характеристики имеют вид (рис.3.10).

d3) для постоянной мощности

$$P_c = M_c \omega = const; \quad \frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const.$$

При управлении АД с поддержанием постоянства мощности, критический момент изменяется обратно пропорционально частоте (рис. 3.11).

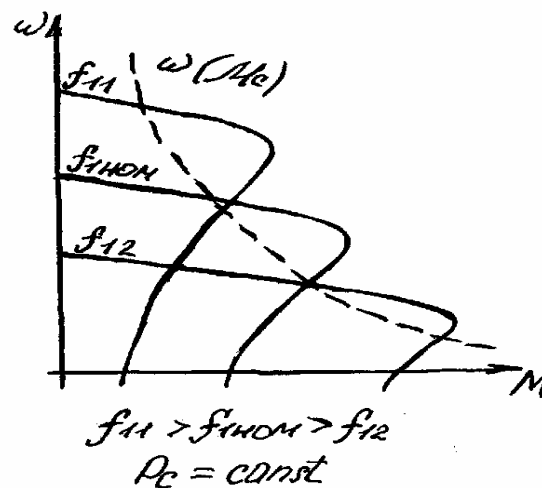


Рис. 3.11.

е) Изменение скорости вращения АМ изменением числа пар полюсов (применяется в основном для регулирования скорости многоскоростных АД с короткозамкнутым ротором).

Многие механизмы, выполняющие простые технологические операции, не требуют плавного регулирования скорости. К их числу относятся грузовые и пассажирские лифты, деревообрабатывающие станки, центробежные сепараторы. Для них достаточно иметь привод с 2,3 ступенями скорости. Так как при изменении числа пар полюсов на статоре необходимо изменить число пар полюсов на роторе, то используется только короткозамкнутый ротор.

е1) Выпускаются АД с уложенными на статоре несколькими обмотками (не связанными друг с другом), имеющими разное число пар полюсов p_1 и p_2 :

$$\omega_{01} = \frac{2\pi f_1}{p_1}; \quad \omega_{02} = \frac{2\pi f_2}{p_2}.$$

е2) Выпускаются АД у которых изменение пар полюсов вращающегося магнитного поля достигается за счет изменения схемы соединения статорной обмотки. Для чего каждая фаза статора разделена на две одинаковые части – полуобмотки (рис. 3.12).

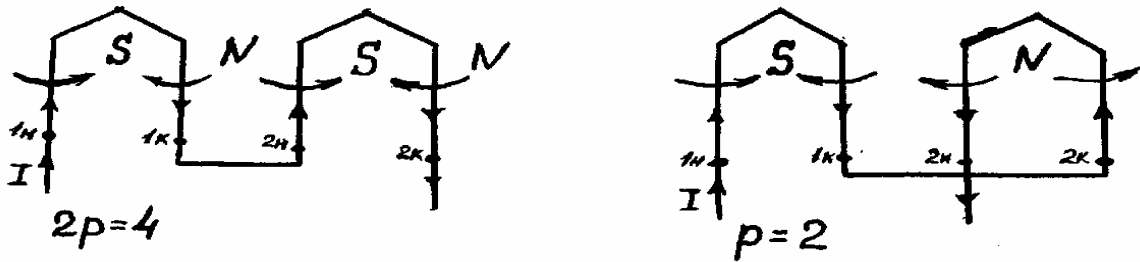


Рис. 3.12. Изменение пар полюсов за счет изменения схемы соединения статорной обмотки

е3) Наиболее часто применяются переключения обмотки статора: треугольник – двойная звезда рис. 3.13 ($p_1 > p_2$) и звезда – двойная звезда рис. 3.14.

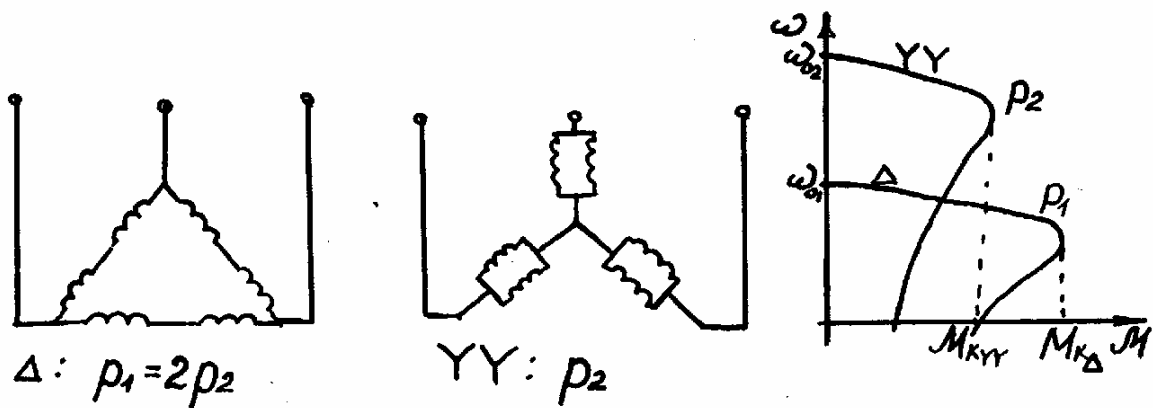


Рис. 3.13. Схема переключения обмотки статора треугольник - двойная звезда

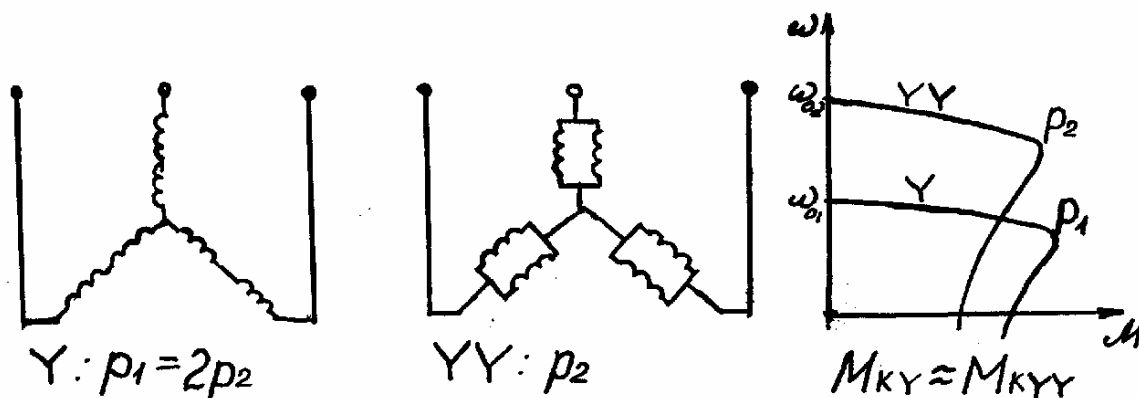


Рис. 3.14. Схема переключения обмотки статора звезда - двойная звезда

3.5. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя в кузнечно-штамповочных машинах

Для многих кузнечно-штамповочных машин (КШМ) применяются АД более простые и надежные, т.к. у большинства процессов обработки давлением не требуется изменять скорость в процессе деформации.

КШМ часто снабжают вспомогательными устройствами для автоматической подачи и удаления заготовок, для чего необходим ЭП с регулированием скорости вращения:

1) для АД с фазным ротором – включают добавочное сопротивление в цепь ротора. При этом уменьшается жесткость характеристики. Ввиду уменьшения КПД при включении $R_{2\text{доб}}$, этот способ применяется при длительном снижении скорости на (10-20)%, или при большем, но кратковременном снижении скорости;

2) значительное распространение получил способ регулирования скорости путем изменения числа пар полюсов:

- а) на статоре имеется несколько разных обмоток;
- в) существует ряд схем переключения проводников обмотки статора, при которых первая обмотка может создавать различное число полюсов;
- с) трехфазовые обмотки могут быть включены по-разному: треугольник, звезда, двойная звезда.

В частности, многоскоростные АД применяются для прессов и автоматов.

3.6. Способы пуска асинхронных двигателей

При пуске АД с короткозамкнутым ротором пусковой ток $I_{\text{п}}$ достигает $(4 \div 8)I_{\text{н}}$. Толчок пускового тока $I_{\text{п}}$ вызывает в сети, к которой присоединяется АД, понижение напряжения. Момент АД пропорционален квадрату напряжения ($M \cong U^2$). Если пускается АД большой мощности, напряжение сети может сильно снизиться и другие потребители (работающие в это время с перегрузкой) могут остановиться. Поэтому пуск АД без применения средств, ограничивающих $I_{\text{п}}$ допускается лишь в случае, если номинальная мощность АД не превышает 25% мощности трансформаторов, питающих сеть цеха. Если от этого же трансформатора питается осветительная нагрузка, то $P_{\text{наД}}$ не должна превосходить 5% от мощности трансформаторов.

Т.к. пусковой ток обычно кратковременный, он не представляет опасности для АД в тепловом отношении если пуски не очень часты и длительность разгона не слишком велика. При частых пусках (порядка нескольких сотен в час) или при большой длительности пуска АД могут перегреваться. Поэтому иногда приходится применять меры для уменьшения $I_{\text{п}}$:

- 1) уменьшение напряжения, подводимого к статору, но при этом происходит уменьшение пускового момента $M_{\text{н}}$ ($M \cong U^2$);
- 2) введение реостатов и дросселей в цепь статора.

Для обеспечения большей плавности изменения ускорения двигателя при пуске, когда невозможно или нежелательно использовать многоступенчатые индуктивные (реакторы, дроссели) и активные сопротивления. Более благоприятные характеристики можно получить при параллельном включении реакторов и резисторов. При этом чтобы уменьшить пусковой ток в k раз необходимо уменьшить напряжение питающее статор в k раз, что вызовет уменьшение $M_{\text{н}}$ примерно в k^2 раз. Кроме того, применение реостатов сопровождается потерями мощности в нем.

Применение дросселей дает значительно меньшие потери мощности, но уменьшает $\cos \varphi$ установки. Применение таких схем целесообразно для двигателей большой мощности при тяжелых условиях эксплуатации, когда использование сложной пусковой аппаратуры понижает надежность ЭП. В последнее время даже мощные машины с ФР вытесняются из традиционных сфер их применения частотно- управляемыми короткозамкнутыми двигателями, которые имеют меньшие потери, более надежны и экономичны.

- 3) использование автотрансформатора.

При уменьшении напряжения, подводимого к ЭД, в \sqrt{k} раз, пусковой момент снижается в k раз. В этом случае кратность уменьшения пускового тока и момента будут одинаковыми. Недостаток – стоимость. Этот метод применяется при значительных мощностях АД. При пуске АД питается пониженным напряжением, а при $\omega = \omega_n$, автотрансформатор отключается и АД получает питание непосредственно от сети.

4) переключение со звезды на треугольник.

Если при нормальной работе обмотка статора ЭД включена по схеме треугольник, то переключение с треугольника на звезду обмоток статора уменьшает пусковые токи и моменты в 3 раза. Такое уменьшение момента не всегда приемлемо.

Для увеличения начального пускового момента для привода главного движения КШМ применяют АД с фазным ротором. Пуск осуществляется с помощью реостата в цепи ротора. При этом пусковой ток уменьшается до $(1.5 \div 2.5)I_n$.

Величина M_n имеет большое значение для ЭД вспомогательных перемещений. Эти ЭД пускают в ход под значительной нагрузкой, обусловленной силами трения неподвижного механизма. Часто пуск осуществляется ступенями.

3.7. Тормозные режимы асинхронного двигателя

Тормозные режимы для многих ЭП с АД имеют более важное значение, чем режимы пуска в отношении предъявляемых к ним требованиям надежности и безотказности. Часто требуется точная остановка в заданном положении или торможении привода в течение определённого времени. Для АД используют следующие режимы торможения:

1) режим генераторного торможения с отдачей энергии в сеть (рекуперативное торможение).

При увеличении скорости ротора выше скорости вращения магнитного потока, АД переходит в режим генератора. Этот вид торможения применяется в подъемных транспортных механизмах – спуск грузов с установившейся скоростью, а также применяется в двигателях с переключением пар полюсов, – когда двигатель, работая с меньшим числом пар полюсов и большей скоростью n_1 , переключили на большее число пар полюсов $n_2 = \frac{f}{p_2}$. В этом

случае осуществляется генераторное торможение до установившейся скорости – n_2 .

2) противовключение. Осуществляется сменой чередования фаз обмотки статора.

В этом случае ротор вращается в сторону, противоположную направлению вращения поля статора. Когда скорость АД достигает нулевого значения, необходимо отключить её от сети для избежания реверса. Этот режим торможения часто используется в подъемно-транспортных установках. Недостатком тормозных характеристик противовключения является их большая крутизна и значительные потери энергии, которая полностью превращается в теплоту, рассеиваемую во вторичной цепи двигателя. Вследствие большой крутизны механических характеристик возможны большие колебания скорости привода при незначительных изменениях нагрузки.

3) динамическое торможение.

Осуществляется путем отключения статора АД от сети и подачей на две фазы статора постоянного тока от постороннего источника.

При этом АД работает как синхронный генератор, вырабатывающий электроэнергию, которая обращается в тепло в цепи ротора. Этот вид торможения применяется в подъемно-транспортных и в станочных приводах.

4) торможение конденсаторное

АД отключают от сети. На обмотку статора подключаются конденсаторы. При достижении ротором определенной скорости (с учетом которой рассчитаны конденсаторы) наступает самовозбуждение и машина переходит в режим генератора. В этом случае не требуется внешнего источника электроэнергии.

Для осуществления торможения при различных скоростях необходим определенный набор конденсаторных батарей. В последнее время этот вид торможения все чаще применяется в станочных приводах.

Все тормозные режимы применяются для АМ с короткозамкнутым ротором и фазным ротором.

В связи с использованием мощных силовых полупроводниковых приборов появились новые схемы реализации типовых тормозных режимов асинхронных приводов.

Повышение эффективности торможения можно достичь применением комбинированных способов его реализации. Следует отметить, что большинство комбинированных способов торможения являются полностью управляемыми. Это еще больше увеличивает их эффективность.

Наиболее эффективными являются: противовключение и конденсаторно-динамическое торможение. Конденсаторно-динамическое торможение имеет много схемных решений и рекомендуется для приводов с большим моментом инерции (J), например превышающий двукратный момент инерции ЭД.

Для отдельных приводов применяется двух ступенчатое торможение (противовключение – динамическое торможение) и трех ступенчатое торможение: конденсаторное торможение, динамическое и магнитное торможение.

Следует отметить, что комбинированные способы торможения оказываются эффективными для получения полной остановки привода.

4. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА (ДПТ)

Электрические машины по типу питания делятся на машины переменного и постоянного тока.

В зависимости от способа включения обмотки возбуждения (ОВ) ДПТ можно разделить на 3 группы:

ДПТ независимого возбуждения – ДПТ НВ;

ДПТ последовательного возбуждения – ДПТ ПВ;

ДПТ смешанного возбуждения – ДПТ СВ.

Широкое распространение ДПТ, несмотря на их более высокую стоимость и сложность эксплуатации по сравнению с асинхронными, объяснялось в первую очередь простыми и надежными способами регулирования частоты вращения, большими пусковыми моментами и перегрузочной способностью, чем у двигателей переменного тока. Наибольшее распространение ДПТ получили в приводах, требующих глубокого регулирования частоты вращения.

Двигатель постоянного тока классического исполнения состоит из неподвижной части – статора и подвижной части – ротора. На статоре находятся магниты с обмоткой возбуждения (ОВ), создающие основной магнитный поток машины. Часть машины, которая создает основной магнитный поток, называется индуктором. В данном случае индуктором является статор. На роторе (якоре) намотана обмотка, которая называется якорной.

Электрические схемы включения ДПТ, уравнения механических характеристик и их вид, а также способы регулирования скорости вращения и тормозные режимы ДПТ сведены в табл. 4.1.

Сравнительные характеристики двигателей постоянного тока

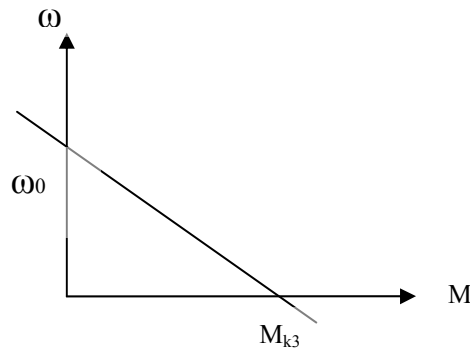
1) ДПТ НВ	2) ДПТ СВ	3) ДПТ ПВ
Схема включения		
4.1. Уравнение механической характеристики		
<p>1) $U = E + IR$ 2) $E = k\Phi\omega$ 3) $E = k\Phi\omega + IR$ 4) $\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}$ (электромеханическая характеристика) 5) $M = k\Phi I$ $\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2}$</p>	$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi} = \frac{U_c}{k\Phi I_{я}} - \frac{R_{я\Sigma}}{(k\Phi I_{я})^2} M$ $\Phi = f(I_{я})$ <p>Механическая характеристика не имеет точного аналитического выражения.</p>	$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}$ $\Phi = f(I_{я})$ <p>Механическая характеристика не имеет точного аналитического выражения. !Ток якоря является током возбуждения. Магнитный поток Φ является функцией тока якоря $I_{я}$.</p>

4.2. Естественная механическая характеристика ($R_d = 0, U = U_{ном}$)

$$\omega_0 = \frac{U_{я}}{k\Phi}$$

$$M_{кз} = k\Phi I_{я.кз}$$

$$I_{я.кз} = \frac{U_z}{R_{я\Sigma}}$$



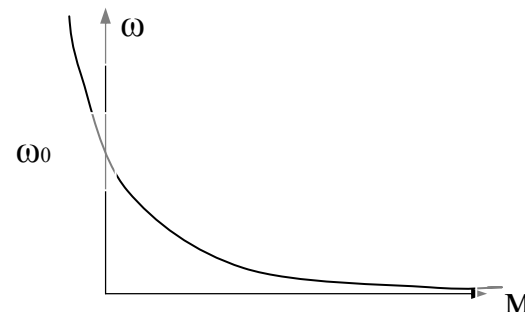
Двигатель имеет две обмотки возбуждения последовательную (ОВ_П) и независимую (ОВ_Н). Поэтому его механическая характеристика занимает промежуточное положение.

Полный магнитный поток:

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_{ОВН} + \Phi_{ОВП}$$

$$\Phi_{ОВП} = \beta * I_{я}$$

Скорость идеального холостого хода определяется действием ОВ_Н.



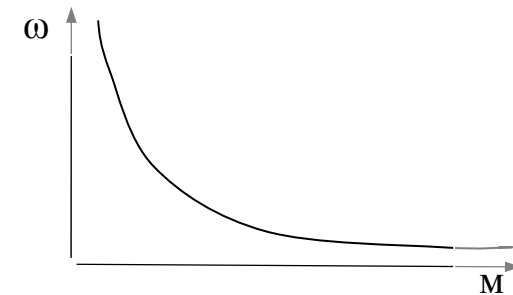
Особенность: большая крутизна в области малых значений момента.

!Режим холостого хода не допустим.

Увеличение скорости при малых нагрузках обуславливается соответствующим уменьшением магнитного потока. Построение характеристики ведут графо-аналитическим способом. Жесткость характеристики является переменной величиной, зависящей от скорости.

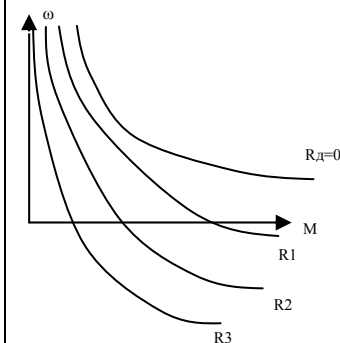
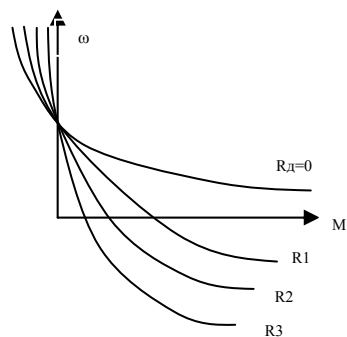
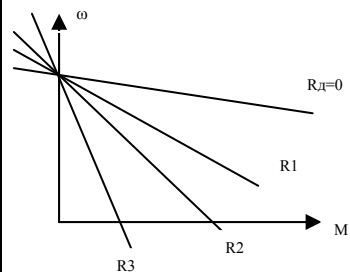
При уменьшении нагрузки ЭД, происходит уменьшение Φ и увеличение ω до $\omega = (5 \div 8) \omega_n$.

Может быть превзойден предел механической прочности бандажей и «разнос» ЭД.

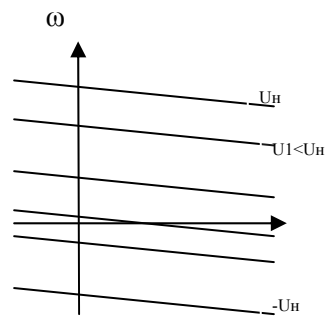


4.3. Регулирование скорости

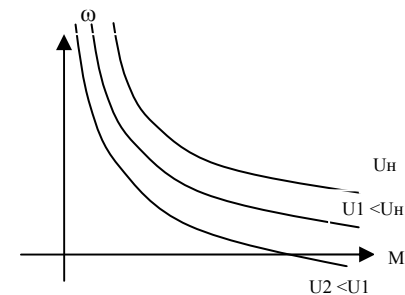
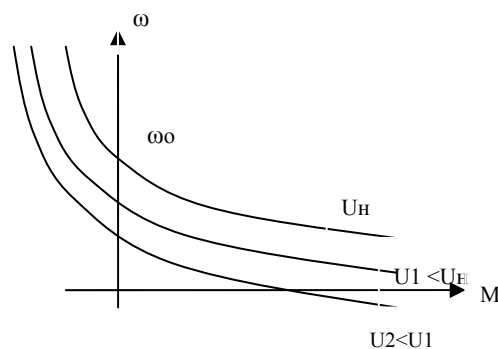
4.3.1. Регулирование скорости изменением сопротивления якорной цепи ($R_1 < R_2 < R_3$, $U = \text{const}$)



4.3.2. Регулирование скорости изменением напряжения питания ($R_d = \text{const}$, $U = \text{var}$)



Регулирование – вниз от основной скорости. У ЭД с постоянными магнитами может быть двухзонное регулирование – вверх и вниз от основной скорости.



4.3.3. Регулирование скорости изменением магнитного потока (только для ДПТ НВ)

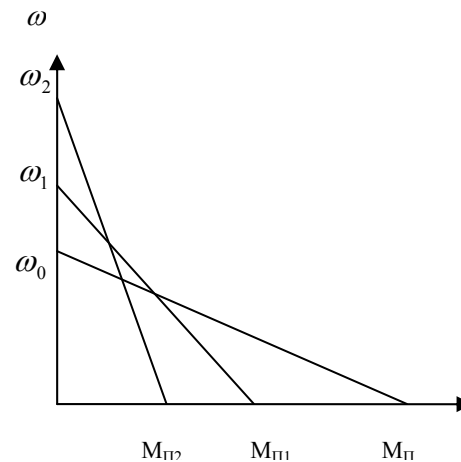
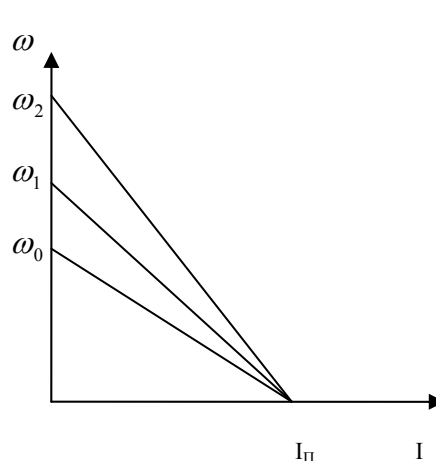
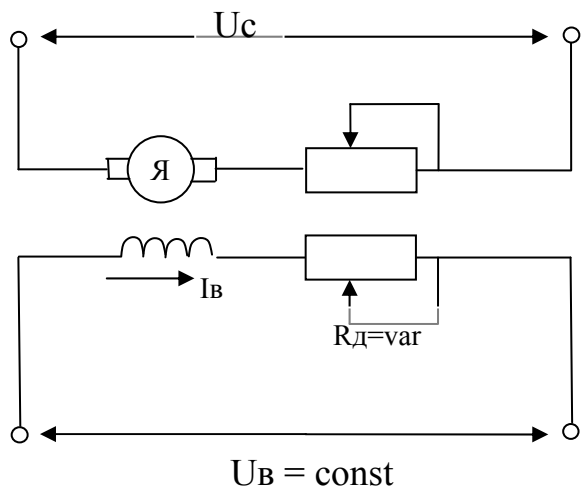
При изменении магнитного потока Φ (I_B) изменяется значение угловой скорости $\omega_0 = U/k\Phi$.

Момент короткого замыкания M к.з. зависит от величины Φ : $M_{к.з.} = kI_{к.з.}\Phi$.

Ток короткого замыкания I к.з. не зависит от потока $I_{к.з.} = U/R_{я\Sigma}$.

Уменьшение потока возбуждения ($\Phi_{возб}$) и верхний предел скорости определяется условиями безыскровой коммутации. Двигатели нормального исполнения можно регулировать только на 20-30% выше номинальной скорости. Для двигателя специального исполнения, предназначенных для регулирования скорости, она может повышаться в 2-3 раза (иногда в 8 раз).

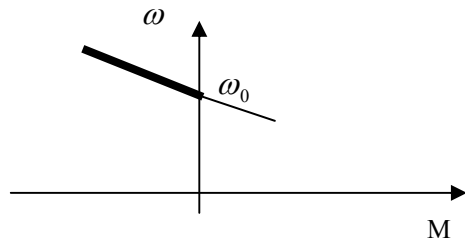
Регулирование экономично при постоянной мощности. Существенных потерь энергии нет, так как $I_{возб}$ составляет всего 2-3% общего тока.



$$\Phi_2 < \Phi_1 < \Phi_H$$

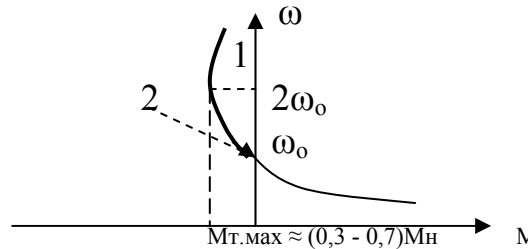
4.4. Тормозные режимы

4.4.1. Рекуперативное торможение (с отдачей энергии в сеть)

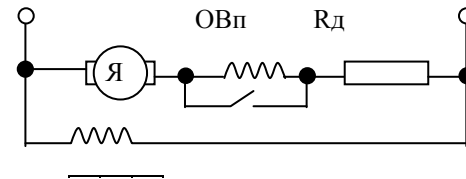


Рекуперативное торможение происходит только в том случае, когда скорость вращения ротора (ω) превышает скорость ω_0 .

1) Торможение при включенных двух ОВ.



2) Торможение при отключенной последовательной ОВ (ОВп).



(ОВп либо закорачивают, либо выключают.)

При этом осуществляется торможение с независимым возбуждением при неполном патоке возбуждения ЭД. Механические характеристики в этом случае линейны и имеют вид пунктирной линии.

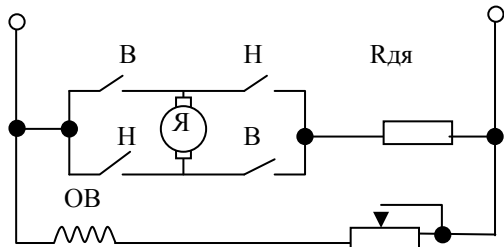
Рекуперативное торможение не возможно, так как ЭДС не может быть выше приложенного напряжения сети.

4.4.2. Торможение противовключением

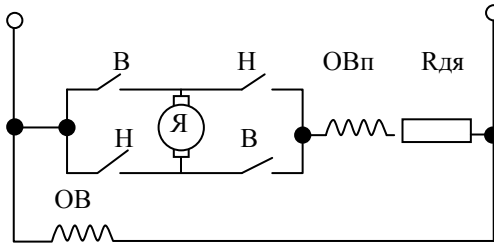
(применяется особенно часто в реверсивных электроприводах)

Для останова ЭД должен быть отключен от сети в момент достижения скорости нулевого значения, иначе скорость ЭД начнет увеличиваться в обратном направлении

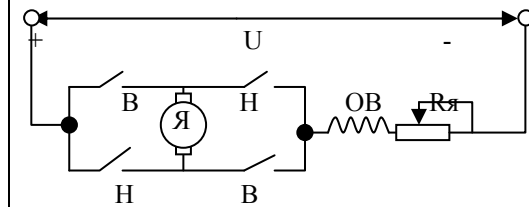
Торможение происходит когда при вращающемся ЭД изменяется полярность напряжения на зажимах его якоря или ОВ, что осуществляется переключением контакторов В (вперед), Н (назад). (В цепь якоря вводится добавочное сопротивление)



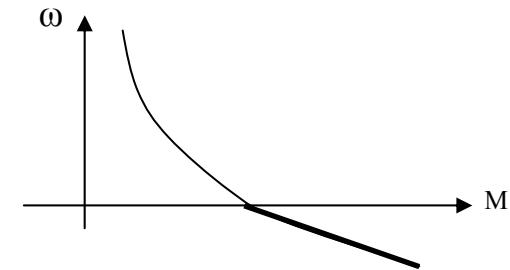
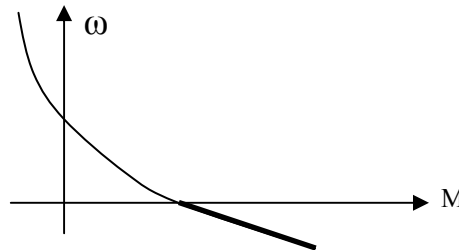
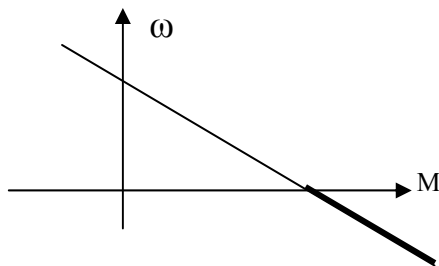
Торможение осуществляется также как и для ДПТ НВ, т.е. в цепь якоря с целью ограничения тока вводится добавочное сопротивление и изменяется полярность напряжения на зажимах якоря в соответствии со схемой:



Основной режим торможения. В цепь вводится дополнительный резистор для ограничения тока. Торможение возможно: При изменении полярности напряжения, подводимого к якорю. При этом направление I_{α} меняется, $I_{\text{ов}}$ не меняется.

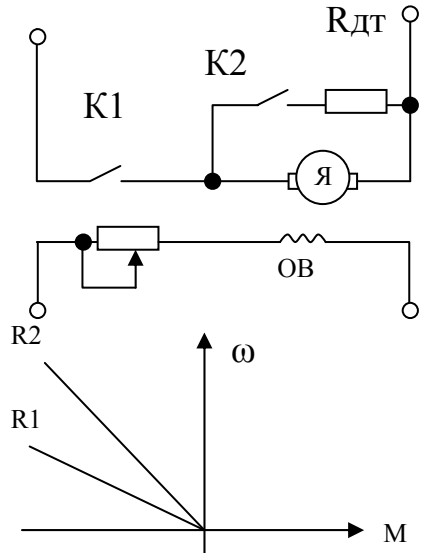


Также торможение противовключением происходит, если движущий момент нагрузки становится больше $M_{\text{кз}}$ двигателя. В этом случае нагрузка двигателя при противовключении должна быть ограничена допустимым током в якорной цепи.



4.4.3. Динамическое торможение

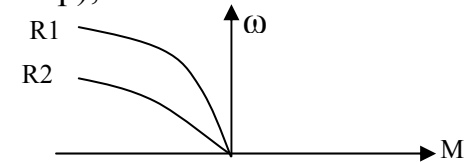
Якорь отключается от сети и замыкается на резистор $R_{дт}$. ОВ остается присоединенной к сети.



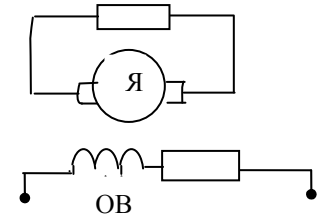
Для ДПТ СВ применяется главным образом торможение с независимым возбуждением. Характеристики в этом случае такие же, как и у ДПТ НВ.

Существует два способа динамического торможения:

а) с самовозбуждением (Якорь и ОВ отключаются от сети и замыкаются на резистор);



в) с независимым возбуждением (применяется чаще). ОВ подключается к сети через резистор, ограничивающий ток до номинального значения.



4.5. Основные области применения

ДПТ НВ в основном применяются

- для регулируемых электроприводов.
- для мощных приводов гусеничного перемещения экскаваторов.

ДПТ СВ применяют в подъемно-транспортном, металлургическом оборудовании и других установках, где возможны значительные кратковременные перегрузки ЭП и частые тормозные режимы, так же используются в троллейбусах.

ДПТ ПВ удовлетворительно работают при больших снижениях напряжения. По сравнению с ДПТ НВ, ДПТ ПВ:

- 1) при перегрузках механизмов развивают большие моменты при одинаковых перегрузках по току;
- 2) имеют большую надежность благодаря повышенному сечению ОВ.

Используют, в основном, в подъемно-транспортном оборудовании, широко применяется в электротяге: трамваях, средствах внутризаводского транспорта, рудных и угольных самоходных вагонах.

Нельзя применять для привода механизмов, у которых возможен режим холостого хода с малыми потерями.

Нельзя применять ременную, клиноременную и цепную передачи.

При нагрузке ниже 15-20% от номинальной, работа ЭД на естественной характеристике практически недопустима. Выпускают крановые и металлургические ЭД серии Д, для которых $M_{max} = (2,7-5) M_n$. Вероятность безотказной работы 0,98.

5. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ КШМ

5.1. Требования к электрооборудованию кузнечно-штамповочных машин

Электрооборудование КШМ должно обеспечивать:

- выполнение технологической операции;
- безопасность и удобство работы;
- требуемую производительность труда при высоком качестве продукции;
- высокую надежность в эксплуатации.

Электрооборудование устанавливается в соответствии с положениями по ТБ и ПУЭ.

Многие КШМ должны работать в нескольких режимах. Например, электрооборудование кривошипных прессов должно обеспечивать 3 режима работы:

- 1) непрерывные ходы при автоматической подаче или при ручной подаче при штамповке из полосы);
- 2) одиночные ходы (с управлением от кнопок или электропедали);
- 3) режим наладки.

Переключения пресса с одного режима на другой осуществляется со специально оборудованного пульта управления. На больших КШМ могут быть установлены несколько пультов управления. Отключаться пресс должен с любого пульта.

Механические и гидравлические прессы должны иметь световую сигнализацию, показывающую, на какой из режимов работы переключена система управления и что цепь управления находится под напряжением.

При групповой работе для каждого штамповщика необходимо обеспечить двурукое управление, допускающее возможное включение пресса на рабочий ход при одновременном нажатии двух кнопок. Исключается одновременное использование кнопки и педали. Напряжение цепей управления не должно превышать 127 В. Педали, кнопки управления в режиме одиночных ходов должны включаться в сеть напряжением не выше 36 В.

Основное электрооборудование, используемое в КШП показано на рис. 5.1.

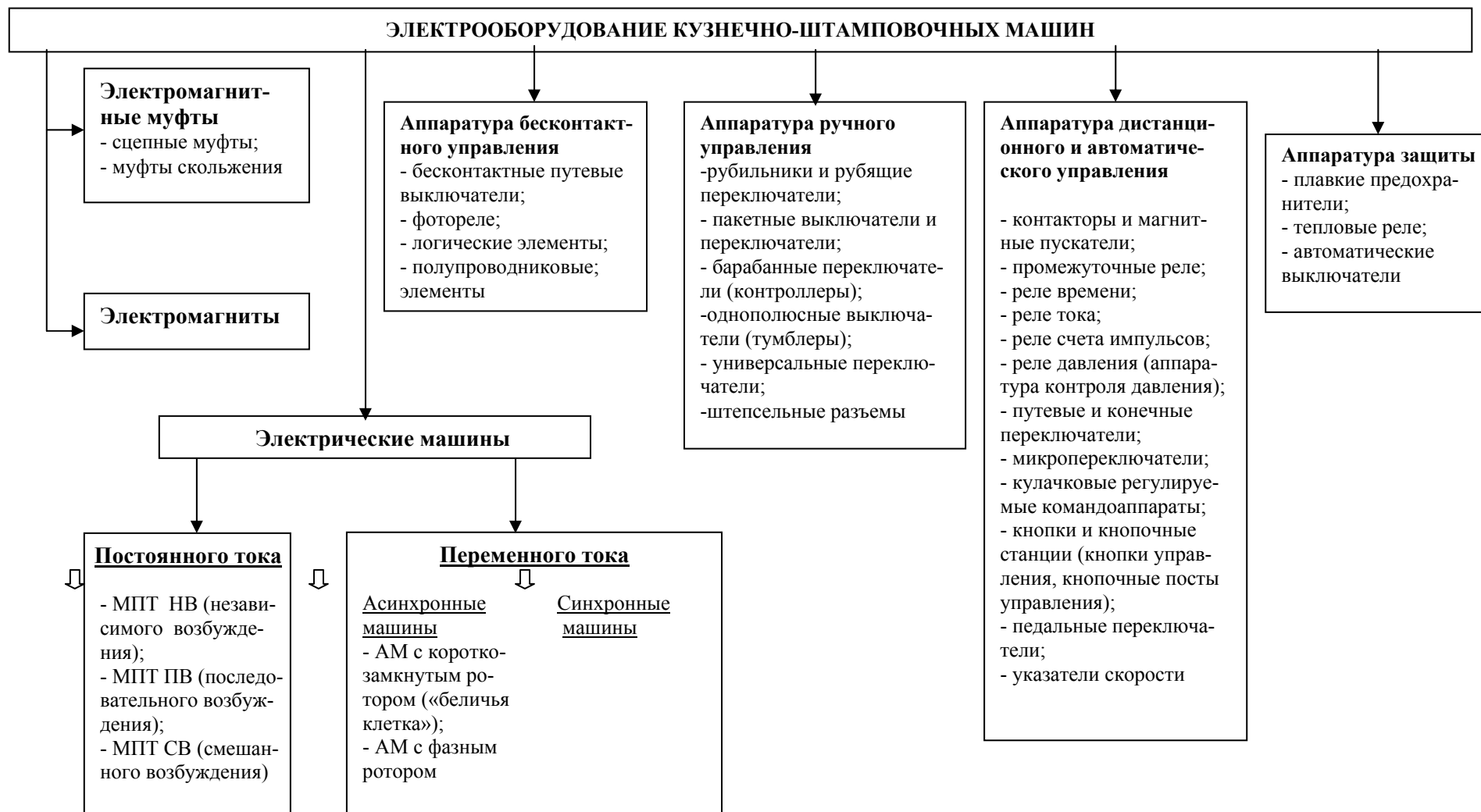


Рис. 5.1. Электрооборудование кузнечно-штамповочных машин

5.2. Электропривод кузнечно-штамповочных машин

Типовая КШМ состоит из трех главных механизмов: двигателя, передаточного механизма, исполнительного механизма.

Двигатель, воспринимая электрическую энергию, превращает ее в кинетическую энергию передаточного и исполнительного механизмов или потенциальную энергию рабочего тела, создавая тем самым определенный уровень энергии в самой машине.

Трансформация кинетической или потенциальной энергии в механическую работу пластичной деформации происходит при движении рабочих органов (ползуна, коромысла, траверсы, бабы, валков, роликов и т.п.) исполнительных механизмов.

ЭП КШМ можно разделить на следующие группы:

- 1) главный привод механических машин, снабженный маховиком;
- 2) главный безмаховиковый ЭП механических и гидравлических машин;
- 3) привод насосов и компрессоров, используемый в насосных станциях и установках группового питания прессов;
- 4) привод вспомогательных механизмов механических и гидравлических КШМ.

Современные КШМ оснащаются преимущественно индивидуальным ЭП. Это относится как к механическим КШМ, так и к гидравлическим прессам с насосным приводом, к молотам с пневматическим компрессорным приводом. Исключения составляют некоторые гидравлические прессы, использующие рабочую жидкость насосно-аккумуляторных станций и паровоздушные молоты, питающиеся централизованно от заводских станций, при чем в ряде случаев индивидуальный ЭП КШМ может быть и многодвигательным.

Индивидуальный ЭП – при котором каждый исполнительный орган рабочей машины приводится в движение своим отдельным электродвигателем. Этот вид ЭП основной, так как при этом упрощается кинематическая передача от ЭД к исполнительному органу рабочей машины, легко осуществляется автоматизация технологического процесса, улучшаются условия обслуживания рабочей машины.

Групповой ЭП – при котором от одного ЭД приводится в движение несколько исполнительных органов одной или нескольких рабочих машин. Этот вид ЭП имеет разветвленную кинематическую цепь (трансмиссию).

Многодвигательный ЭП – в котором рабочий орган одной машины приводится в движение несколькими ЭД. Когда КШМ имеет ряд подвижных узлов, перемещаемых во время работы, применяют отдельные ЭД для перемещения каждого узла (например, при необходимости обеспечить движение рабочего органа по разным координатам, что обеспечивается одиночными ЭД в совокупности).

По виду движения различают ЭП вращательного и поступательного, однонаправленного и реверсивного движения, а так же ЭП возвратно-поступательного движения. Эти движения могут иметь как непрерывный, так и дискретный характер.

На кривошипных прессах и автоматах применяется главный привод с регулированием скорости вращения. Преимущественно применяются следующие регулируемые ЭП:

1) многоскоростные АД с мощностью до 100 кВт для ступенчатого регулирования скорости вращения в диапазоне от 1:2 до 1:4;

2) ЭП постоянного тока с тиристорным управлением для бесступенчатого регулирования скорости в диапазоне от 1:2 до 1:4 с постоянной мощностью, и в диапазоне 1:10 с постоянным моментом;

3) ЭП переменного тока с тиристорным управлением для бесступенчатого регулирования скорости в диапазоне 1:10 с постоянным моментом.

5.3. Электрические машины, применяемые в КШМ

Каждая КШМ должна обеспечить производство изделий в необходимом количестве и требуемого качества при наименьшей стоимости изделия. Для обеспечения этих требований свойства ЭД должны быть надлежащим образом согласованы со свойствами КШМ. Кроме того, ЭД должен иметь конструкцию, допускающую его длительную эксплуатацию в условиях КШ производства (например, в цеху горячей штамповки).

У наиболее распространенных кривошипных прессов нужная скорость пластической деформации обеспечивается кинематической цепью самой машины. От ЭД кривошипных машин в этом случае требуется лишь вращение приводного вала машины с примерно постоянной скоростью, чтобы обеспечить надлежащую продуктивность машины.

Аналогичные требования предъявляются и гидравлическими прессами, где от главного ЭД требуется лишь вращение насоса с примерно постоянной скоростью.

Вспомогательные приводы КШМ должны обеспечивать перемещение подвижных узлов машины с заданной скоростью.

В большинстве КШМ для главного привода используются трехфазные АД различных модификаций и исполнений. Наиболее дешевые, надежные, экономичные, сохраняющие примерно постоянную скорость вращения при изменении нагрузки в широких пределах является АД с КЗР. Эти ЭД являются самыми распространенными в КШМ. При мощности ЭП до 75 кВт (для привода насосов – до 200 кВт) применяют АД с КЗР различных исполнений (например, кривошипные прессы обычно приводятся в движение асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором).

При мощности свыше 75 кВт предпочтительнее использование АД с ФР.

Синхронные двигатели (СД) используются редко, так как для работы с маховиком они не пригодны. При мощности ЭД свыше 200 кВт, в тяжелых КШМ без маховика применяют синхронные двигатели, обеспечивающие постоянную скорость вращения при изменении статического момента в широких пределах. СД обычно используются в приводах насосов, компрессоров для гидравлических прессов и насосных станций.

АД являются машинами дешевыми, простыми, надежными и удобными в эксплуатации. Поэтому, когда для привода КШМ применяют ЭД иного типа, необходимость его применения должно быть достаточно обоснована технически и экономически.

5.4. Особенности работы электропривода КШМ

Прессы, штамповочные и кузнечно-ковочные машины относятся к категории машин, у которых периоды кратковременной нагрузки (пиков) чередуются с более продолжительными периодами пауз. **Характерной особенностью работы механических КШМ (прессов, автоматов, горизонтально-ковочных машин, ножниц) является резкопиковый характер нагрузки.**

Пик нагрузки может превышать среднее значение момента нагрузки и критический момент ЭД в десятки раз, но длительность пика нагрузки обычно очень мала (часто сотые доли секунды), так как основная работа производится лишь за часть поворота кривошипного вала. В электроприводе этих машин искусственно увеличивают маховой момент ЭП путем установления специального маховика, что дает возможность выбирать мощность ЭД по условиям нагрева, а возникающие пики нагрузки выравнять за счет кинетической энергии, запасенной маховиком в период уменьшения нагрузки и холостого хода. Отдача энергии маховиком происходит в результате уменьшения скорости системы (эта энергия зависит от момента инерции привода и изменения скорости).

У кривошипной КШМ с маховиком ползун движется вверх и вниз с переменной скоростью, зависящей от угла поворота кривошипного вала. По этой причине соответственно часть приведенного момента инерции машины является переменной величиной. По сравнению с полной величиной приведенного момента инерции, обусловленной в основном маховиком, переменная часть является незначительной. Поэтому в расчетах привода кривошипных КШМ приведенный момент инерции приближенно считается постоянной величиной.

Момент (M), развиваемый ЭД, зависит от скорости (ω) его вращения. Момент сил сопротивления кривошипных КШМ является функцией угла поворота кривошипного вала. При $M = M_c$ и $\frac{d\omega}{dt} = 0$ – возникает установившийся режим работы, при $M \neq M_c$ и $\frac{d\omega}{dt} \neq 0$ – переходной режим. **ЭД главного привода кривошипных КШМ работают в условиях непрерывно изменяющейся нагрузки.** Поэтому эти ЭД все время находятся в условиях переходного процесса.

Одним из важных параметров приводных ЭД КШМ является их скольжение, определяющее возможность использования маховых масс.

В зависимости от характера нагрузки, графика и параметров привода находят значение скольжения, которое дает наивыгоднейшее соотношение системы маховик – ЭД. Для обеспечения этих условий в КШО широко **используются АД с КЗР с повышенным скольжением – до 12-17%**. Для ЭП мощностью свыше 75 кВт скольжение увеличивают за счет использования АД с ФР и постоянно включенной ступенью резисторов.

Вид графика нагрузки в сильной степени зависит от рода выполняемой операции (рис. 5.2). Систематические резкие колебания нагрузки пресса неблагоприятно отражаются на приводном ЭД и на питающей его сети: требуется ЭД повышенной мощности, способный преодолевать пики нагрузки, т.е. относительно дорогой и плохо используемый. При этом толчки его нагрузки вызывают колебания напряжения в сети, сказывающиеся на работе остальных потребителей, присоединенных к сети. Поэтому **обычно прибегают к установке на прессе маховика, являющимся аккумулятором механической энергии, дающим выравнивание графика нагрузки.**

При отсутствии маховика необходимо было бы устанавливать более мощный ЭД, который значительную часть цикла работал бы с недогрузкой, и, следовательно, с ухудшенными энергетическими показателями.

Применение маховика для выравнивания нагрузки ЭД целесообразно еще и потому, что при неравномерной нагрузке увеличиваются потери на нагревание обмоток ЭД и затрудняют осуществление защиты ЭД от перегрузок. Толчки нагрузки вызывают броски тока и, следовательно, уменьшают напряжение сети, что плохо отражается на работе других потребителей.

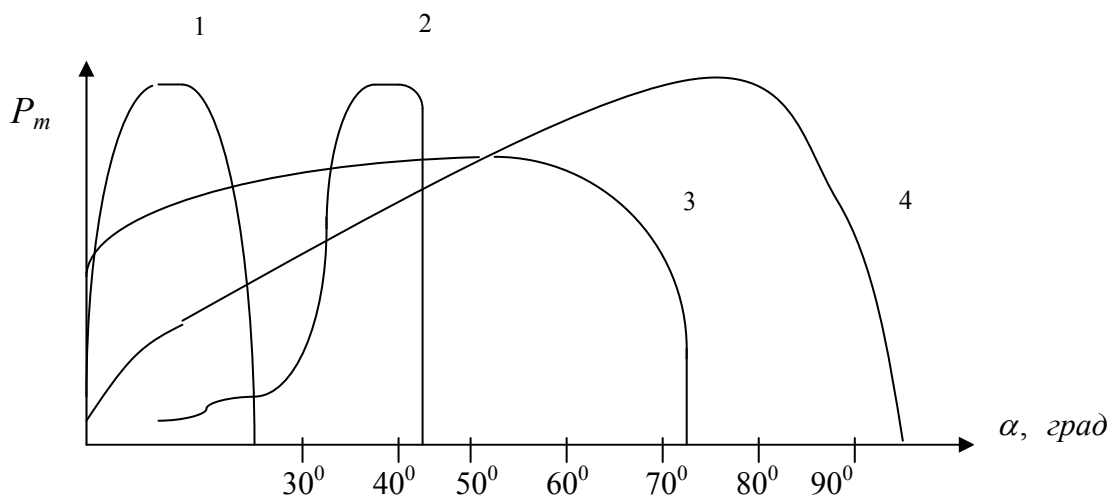


Рис. 5.2. Графики усилий на ползуне прессы при различных операциях:
 P_m – усилие на ползуне; 1 – вырубка из листовой стали толщиной 5мм;
 2 – вырубка из листовой стали толщиной 12мм; 3 – гибка полосы 65×16×10;
 4 – вытяжка стаканчика глубиной 45мм

При наличии маховика во время увеличения нагрузки, скорость системы начинает уменьшаться и маховик отдает запасенную в нем ранее кинетическую энергию и помогает ЭД преодолеть нагрузку, благодаря чему ЭП должен развивать меньший вращательный момент. Это дает возможность выбирать ЭД меньшей мощности, имеющий меньший критический момент, чем это необходимо в ЭП без маховика. При спадании нагрузки ЭД разгоняет маховик. Таким образом нагрузка ЭД становится более равномерной и ЭД при совершении той же работы имеет меньшие потери.

Чем больше маховой момент маховика, тем больше сглаживается нагрузка ЭД. Но с увеличением веса маховика несколько увеличивается мощность, расходуемая ЭД при холостом ходе, и увеличивает вес и размер маховика.

Существует множество решений выбора мощности ЭД и маховика. Для эффективного использования маховых масс необходимо, чтобы механическая характеристика ЭД была в достаточной степени наклонной (мягкой).

Процесс пуска приводов КШМ носит затяжной характер, так как момент инерции маховика очень велик. Для большей части КШМ, момент инерции маховика, приведенный к валу ЭД в 20-70 раз больше момента инерции ротора ЭД. При таком пуске внутри ЭД выделяется много тепла, что может привести к его перегреву и выходу из строя.

Кроме того, возможен и повторный пуск машины при нагретом ЭД, что ведет к дополнительному перегреву ЭД.

Средствами для снижения величины момента ЭД (для смягчения его графика) является:

- применение ЭД с возможно более высоким числом оборотов в минуту;
- увеличение маховых масс ЭП;
- выбор ЭД с повышенным номинальным скольжением.

5.5. Применение асинхронных двигателей повышенного скольжения для ударной нагрузки

АД повышенного скольжения с КЗР занимают особое место в области ЭП. Благодаря своим характеристикам, эти ЭД применяют во всех ЭП, отличающихся преобладанием неустановившихся режимов работы, т.е. работающих с частыми пусками в ход, реверсами или торможениями, с резкопеременными графиками нагрузки.

ЭД повышенного скольжения имеют номинальное скольжение s_H порядка 8-12%, а в отдельных случаях и до 17%, т.е. обладают существенно наклонной (мягкой) механической характеристикой. Кроме того, они отличаются относительно высоким пусковым моментом. Вследствие этого ЭД повышенного скольжения, значительно уменьшая свою скорость при ударах нагрузки, позволяют хорошо использовать маховик, который отдает при этом накопленный в нем запас кинетической энергии. АД с повышенным скольжением является наиболее подходящим типом ЭД для привода механизмов с ударной нагрузкой – молотов, прессов, кузнечно-ковочных машин.

Кратность пускового момента у АД повышенного скольжения составляет $k_M = \frac{M_H}{M_N} = 2,5 \div 3,5$, а кратность пускового тока $k_i = \frac{I_H}{I_N} = 3,75 \div 4,5$. КПД у АД повышенного скольжения на 5-10% ниже, чем у АД нормального исполнения.

Когда ЭД применяется для привода КШМ с маховиком, доставляющим энергию во время рабочего хода машины, они в большинстве случаев должны иметь резко выраженную наклонную характеристику, т.е. с относительно большой разницей скоростей при холостом ходе и полной нагрузке. Это необходимо для того, чтобы при ударе нагрузки маховик освобождал в полной мере накопленную им кинетическую энергию.

Необходимо стремиться получить от маховика максимально возможное количество энергии, при этом надо исходить из принципа максимального использования маховых масс и оптимальной механической характеристики ЭД. В результате этого уменьшаются потери холостого хода ЭД и увеличивается его эксплуатационный (средний за цикл работы) КПД, сглаживается кривая потребления тока (электроэнергии) из сети и понижается пик нагрузки, приходящейся на ЭД во время рабочего хода.

Маховики устанавливаются не на всех прессах, но наличие мягкой характеристики (т.е. повышенного скольжения) у АД почти всегда является преимуществом. При рабочем ходе скорость ЭД падает, а рост его крутящего момента происходит не так резко, как у АД с нормально жесткой характеристикой. Благодаря этому и ускорение ползуна происходит не так резко, что оказывает амортизирующее действие на весь ЭП в целом.

Однако для многих быстроходных и высокопроизводительных прессов малой мощности, снабженных небольшими маховиками, нет смысла применять АД повышенного скольжения, т.к. продолжительности периодов удара и холостого хода оказываются слишком короткими, здесь маховик успевает получить и соответственно отдать лишь незначительное количество энергии при ударе.

При малой механической нагрузке пресса, работающего с большой частотой операций, могут создаваться более тяжелые условия для ЭП, чем при большой нагрузке.

Аналогичные условия работы имеют место у прессов глубокой вытяжки. Здесь ЭД приходится преодолевать пик нагрузки за половину оборота (хода) пресса, поэтому маховик может не успеть зарядиться кинетической энергией к следующему ходу.

АД повышенного скольжения, принимаемый взамен АД нормального исполнения, имеют меньшую номинальную мощность, а поэтому и меньшие потери холостого хода. В том случае, когда периоды холостого хода занимают большую часть всех циклов работы, применение АД повышенного скольжения дает в этом режиме очевидную экономию. Средняя скорость АД повышенного скольжения всегда несколько ниже средней скорости АД нормального исполнения с тяжелой характеристикой и это обстоятельство необходимо учитывать при выборе передаточного числа от ЭД к механизму, чтобы обеспечить необходимую его производительность.

5.6. Согласование параметров маховика и электродвигателя

Для эффективного использования маховых масс необходимо, чтобы механическая характеристика ЭД была в достаточной степени наклонной (мягкой).

Часто величина маховика ограничивается заданными габаритами пресса. Выбор мощности ЭД зависит в основном от величины маховика, наклона механической характеристики (от номинального скольжения) и от продолжительности цикла.

Существуют прессы с таким режимом, у которых маховик не может обеспечить выравнивание графика нагрузки и разгрузку приводного ЭД. В таких случаях нагрузка ложится на ЭД. У некоторых видов – почти вся нагрузка покрывается за счет кинетической энергии маховика, а средняя нагрузка ЭД мала.

У прессов различных типов: кривошипных, фрикционных и прессов с зубчатой рейкой процесс работы ЭД и конструктивное исполнение ЭП несколько отличаются друг от друга.

При конструировании прессов и тому подобных машин при определении размеров маховика исходят в среднем из максимального падения скорости при ударе нагрузки в 15-20%. От выбранного наклона механической характеристики ЭД зависит распределение всей работы удара между ЭД и маховыми массами. В качестве ЭД с мягкой (значительно наклонной) механической характеристикой, применяют АД с фазным ротором, у которых требуемая степень мягкости характеристики может быть достигнута путем включения добавочных внешних сопротивлений к контактным кольцам. Еще чаще для этой же цели применяют АД с короткозамкнутым ротором повышенного скольжения, у которых $s_H = 7 \div 17\%$.

АД с ФР используют когда:

– требуемая длительная мощность ЭД превышает 75кВт (предел, до которого изготавливают АД КЗР повышенного скольжения);

- условия пуска тяжелы и АД с КЗР не проходит по пусковому моменту;
- необходимое по расчету оптимальное номинальное скольжение ЭД оказывается более высоким, чем то, на которое изготавливают АД с КЗР повышенного скольжения.

Дополнительным преимуществом АД с ФР в том, что величину внешнего сопротивления можно регулировать в процессе эксплуатации, устанавливая тем самым всякий раз соответствующее оптимальное скольжение применительно к заданному режиму работы прессе или другой машины.

В отдельных случаях (для высокопроизводительных прессов малой мощности, отличающихся большой частотой рабочих ходов), следует использовать АД с нормальным скольжением (обычной жесткой характеристикой).

При небольшой продолжительности удара нагрузки ЭД успевают выполнить лишь относительно небольшое количество работы: большая часть должна быть доставлена маховыми массами ЭП.

Снижение скорости во время удара должно быть таково, чтобы маховые массы отдали достаточное количество работы, необходимой для производственной операции, и чтобы т.о. АД не оказался опасно перегруженным при пониженной скорости вращения – это условие обычно принимается в основу выбора номинального скольжения АД. В тоже время ЭД должен быть способен развить достаточный момент для восстановления скорости и накопления энергии маховиком перед следующим ударом.

Внезапный наброс или пик нагрузки в условиях, когда маховик не успел отдать всего запаса кинетической энергии, создает резкий механический толчок, передающийся электродвигателю и элементам привода. При правильно выбранном скольжении (наклоне) механической характеристики АД механический удар поглощается маховиком.

Общего решения для определения оптимальных величин номинальной мощности ЭД, его скольжения и махового момента маховика не существует. Экономическое значение снижения средней скорости, влекущее за собой снижение производительности механизма, связано со стоимостью выпускаемого изделия. При снижении средней скорости для компенсации изменения передаточного числа, необходимо учитывать то, что при изменении передаточного числа изменяются значения моментов, приведенных к валу ЭД.

Из-за относительно больших ступеней в шкале мощности ЭД при расчете привода с маховиком, целесообразно начинать с выбора мощности ЭД и после этого (имея данные ЭД) определять необходимый маховой момент маховика, задаваясь изменением скорости ЭД приблизительно в пределах от $\omega_{xx} = \omega_0(1 - 0,1s_H)$ до $\omega_{min} = \omega_0(1 - s_K)$. Среднее значение скорости будет вычисляться следующим образом:

$$\omega_{cp} = \frac{\omega_{xx} + \omega_{min}}{2} = \omega_0(1 - 0,05s_H - 0,5s_K). \quad (5.1)$$

Относительное изменение скорости определяются коэффициентом неравномерности

$$j = \frac{\omega_{xx} - \omega_{\min}}{\omega_{cp}} = \frac{s_k - 0,1s_H}{1 - 0,005s_H - 0,5s_k} \approx \frac{s_k}{1 - 0,5s_k}, \quad (5.2)$$

$$\omega_{xx} = \omega_0(1 - s_H),$$

$$\omega_{\min} = \omega_0(1 - s_K).$$

При падении скорости вращающихся масс происходит отдача части или всей накопленной кинетической энергии, при повышении скорости – ее накопление. Запасы кинетической энергии при некоторой скорости ω' составляют $A' = \frac{1}{2}J(\omega')^2$. Если, например, скорость ЭД снижается с ω_1 до ω_2 , относительное количество кинетической энергии, отдаваемое на вал маховыми массами составит:

$$\Delta A = \frac{J\omega_1^2 - J\omega_2^2}{J\omega_1^2} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1^2}. \quad (5.3)$$

Полученные результаты исследования величины запасаемой (отдаваемой) кинетической энергии маховых масс в зависимости от скорости вращения показали, что накопление и отдача кинетической энергии происходят в начальной части процесса гораздо интенсивнее, чем в конечной. Например, при снижении скорости на первые 10% (от 100 до 90%), маховые массы отдают 19% запаса энергии, а при снижении на последние 10% (от 10 до 0%) – только 1% энергии. Когда скорость снижается наполовину, маховые массы успевают отдать 75% своего запаса энергии. Поэтому на практике стараются не допускать падения скорости маховика более чем на 20-25% из-за происходящего после этого значительного понижения эффективности маховика.

Исходя из работы маховых масс определяют падение скорости ЭП:

$$n_2 = \sqrt{n_1^2 - \frac{7200(A - A_2)}{GD^2}}, \quad (5.4)$$

$$J = \frac{GD^2}{4g} \approx \frac{GD^2}{40},$$

$$GD^2 \approx 40J,$$

где: J – момент инерции всех вращающихся частей системы;

GD^2 – маховой момент всех вращающихся частей системы, приведенные к валу ЭД;

$A = A_1 + A_2$ – работа при ударе нагрузки;

A_1 – работа выполняемая маховыми массами при ударе нагрузки

$$(A_1 = J \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2});$$

A_2 – работа ЭД за время удара ($A_2 = \int M d\varphi$).

В случае кратковременного пика, когда ЭД практически не успевает совершить никакой работы и последняя выполняется за счет кинетической энергии маховика, можно считать $A_2 = 0$, тогда

$$n_2 = \sqrt{n_1^2 - \frac{7200A}{GD^2}}. \quad (5.5)$$

Выбранный ЭД проверяют по условиям пуска и на нагревание методом среднеквадратичного тока.

6. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Четкую последовательность этапов проектирования ЭП определить практически невозможно. Как правило, приходится принимать ориентировочные решения, на основе которых производятся последующие расчеты, а затем вновь возвращаться к первоначально принятому решению и его уточнять и корректировать.

Выбор ЭД, работающих в системах АЭП, производится по следующим основным параметрам:

- 1) роду тока;
- 2) номинальному напряжению;
- 3) номинальной мощности и скорости;
- 4) виду естественной механической характеристики;
- 5) пусковым и тормозным качествам;
- 6) особенностям регулирования скорости в двигательном и тормозном режимах работы.

Для ЭП следует выбирать наиболее простой ЭД по устройству и управлению, надежный в эксплуатации, имеющий наименьшую массу, габариты, стоимость. Вместе с тем ЭД должен полностью удовлетворять требованиям технологического процесса и соответствовать условиям окружающей среды.

Наиболее простыми в отношении устройства и управления, надежности в эксплуатации, имеющими наименьшую массу, габариты и стоимость при определенной мощности являются АМ с КЗР (общий недостаток этих ЭМ – низкий $\cos \varphi$ при работе с недогрузкой).

По сравнению с ДПТ, питание АД осуществляется непосредственно от сети переменного трехфазного тока, т.е. для них не требуются дополнительные преобразовательные устройства (выпрямители).

АД с КЗР используются в промышленности, сельском хозяйстве, на горных разработках, транспорте. Чаще всего они применяются при высокой частоте включений, когда не требуется регулирование скорости или возможно ступенчатое ее регулирование.

Перспективными, широко применяемыми в настоящее время являются установки с глубоким регулированием скорости АД с КЗР при частотном управлении.

В установках, где требуется регулирование скорости в небольших пределах, необходимы плавный пуск, хорошие тормозные качества, ограничение токов в переходных процессах – применяется АД с ФР (потери энергии за время переходных процессов в обмотках статора и ротора АД с ФР меньше, чем аналогич-

ные потери в АД с КЗР). АД с ФР используются для приводов механизмов, технологический процесс которых связан с частыми пусками и торможениями. Недостатком АД с ФР является то, что при обычной схеме включения нельзя получить жестких механических характеристик при пониженных скоростях.

Для механизмов средней и большой мощности (300-500 кВт – до 1 Мвт) где не требуется регулирование скорости – предпочтительнее использование синхронных двигателей (СД). СД имеют жесткую механическую характеристику, высокую перегрузочную способность, высокие энергетические показатели, возможность компенсации реактивной мощности.

Для механизмов, где предъявляются высокие требования в отношении регулирования скорости, качества переходных процессов, а также при напряженных режимах с частыми пусками и остановками ЭП, применяются ДПТ (для них необходимы выпрямительные устройства).

Так как общепринятой является трехфазная система тока, лучше использовать трехфазные ЭД, но иногда на предприятии существуют уже готовые сети постоянного тока. Следует учитывать, что стоимость 1 кВт·ч постоянного тока выше стоимости 1 кВт·ч переменного тока, стоимость ЭД постоянного тока выше стоимости ЭД переменного тока. Для КШО обычно не требуется регулирование скорости и для их привода обычно применяют трехфазный ток. Напряжение электроустановок стандартизировано:

напряжение трехфазного тока – 127, 220, 380, 500 В, 3 кВ, 6 кВ, 10 кВ;

напряжение постоянного тока – 110, 220, 400, 440 В.

Для питания ЭД (АД, СД) большой мощности (свыше 75 кВт) иногда применяют напряжение 3, 6, 10 кВ, что позволяет уменьшить мощность трансформатора, питающего установку. Высоковольтные ЭД должны устанавливаться в отдельных помещениях. В КШО высоковольтные ЭД могут применяться для привода мощных компрессоров и насосов.

Электродвигатели строятся на стандартное напряжение. Один и тот же ЭД можно включить в сети с двумя различными напряжениями, отличающимися друг от друга в $\sqrt{3}$ раз, например на 127 и 220 В, на 220 и 360 В. При этом на меньшее из этих двух напряжений статор ЭД включается треугольником, а на большее – звездой. Ток в фазных обмотках будет при таком включении в обоих случаях один и тот же.

ДПТ в основном изготавливаются на напряжение 110, 220, 440 В. Для высоких мощностей изготавливают ДПТ на напряжение 660-900 В.

Когда ЭП проектируется для механизмов действующего предприятия, ЭД следует выбирать по напряжению, которое существует на предприятии.

Выбор номинальной скорости ЭД в случае применения редуктора производится по известному передаточному отношению и заданной скорости производственного механизма. Особое внимание следует уделять выбору номинальной скорости в случае напряженного режима работы, т.к. от этих величин зависит продолжительность переходных процессов.

При одинаковой мощности размеры, вес, стоимость ЭД будет тем меньше, чем выше частота вращения. Быстроходные АД имеют более высокий $\cos \varphi$.

При больших мощностях целесообразно применять тихоходные ЭД, и, насколько возможно, упрощать кинематическую цепь, так как стоимость ее с увеличением передаваемой мощности резко возрастает. Механические передачи КШМ мелкосерийного и индивидуального производства являются устройствами более дорогими, чем даже тихоходные ЭД, изготавливаемые в порядке массового и крупносерийного производства.

В целях лучшего использования маховика для ряда кривошипных КШМ требуется определенная степень снижения скорости вращения ЭД при увеличении нагрузки. Этим требованиям удовлетворяет АД с КЗР с повышенным скольжением, а также АД с ФР и реостатом в цепи ротора. ЭД и рабочие органы КШМ связывает ряд механических передач. Они должны при определенной скорости вращения ЭД обеспечить нужную скорость обработки или вспомогательного перемещения подвижного узла КШМ. Часто с помощью механических передач скорость ЭД приходится уменьшать. Таким образом, при заданной скорости обработки можно применить ЭД с разными скоростями вращения, если использовать разные механические передачи.

При выборе скорости вращения ЭД, которая должна быть подобрана так, чтобы общая стоимость ЭД и кинематической цепи была наименьшей, необходимо технико-экономическое обоснование.

Чем выше номинальная скорость вращения ЭД при одинаковой мощности, тем меньше его габариты, но при этом часто усложняется механическая передача, связывающая вал ЭД с РО машины. В таких случаях необходимо экономическое сравнение нескольких вариантов.

6.1. Выбор мощности электродвигателя

Выбор мощности ЭД является одним из основных этапов проектирования ЭП. От правильного выбора ЭД зависят технико-экономические показатели работы системы рабочая машина – ЭП, а также высокая производительность, надежность, точность работы этой системы.

Основное требование при выборе ЭД – соответствие его мощности условиям технологического процесса рабочей машины. ЭД недостаточной мощности может привести к нарушению заданного цикла, снижению производительности рабочей машины:

- происходит повышенный нагрев;
- ускорение старения изоляции, выход ЭД из строя.

При применении ЭД завышенной мощности

- повышается стоимость ЭП;
- увеличиваются потери электроэнергии за счет уменьшения КПД ЭД;
- для асинхронного ЭП снижается $\cos\varphi$, что приводит к дополнительным потерям энергии;
- увеличиваются габариты и момент инерции, соответственно увеличивается время переходных процессов (при тех же условиях его использования).

Кроме этого, необходимо правильно выбрать ЭД по конструктивному исполнению:

- по степени защиты от окружающей среды (открытые – не имеют защитных приспособлений, препятствующих соприкосновению с токоведущими и вращающимися частями; защищенные – имеют защитные приспособления в виде решеток, коробов, сеток; закрытые- герметичные, не имеющие специальных отверстий для обмена воздухом между ЭД и окружающей средой; взрывозащищенные- снабжаются специальным кожухом, который может противостоять без повреждений взрыву внутри ЭД);

- по климатическому исполнению (для умеренного, тропического, холодного климата);

- по способу охлаждения (самовентилируемые, с естественным охлаждением, с независимой или принудительной вентиляцией).

От правильного выбора двигателя по исполнению существенно зависит надежность его работы. Необоснованный выбор (закрытый вместо защищенного) – увеличивает капитальные затраты. Выбор ЭД по способу охлаждения особенно важен для регулирования ЭП, т.к. неправильный выбор может привести к значительному завышению установленной мощности ЭД, уменьшению КПД, уменьшению $\cos\varphi$.

Определяющими при выборе мощности ЭД являются нагрев его обмоток и возможные мгновенные перегрузки. В процессе работы ЭД в его обмотках и магнитной системе возникают потери энергии, что приводит к увеличению температуры нагрева ЭД.

Наименее теплостойкой частью ЭД является изоляция проводников обмоток. При повышении температуры нагрева выше допустимой происходит ускорение старения изоляции и выход ее из строя. Предельно допустимая температура определяется физико-химическими свойствами материалов. Согласно ГОСТ 8865-87 электроизоляционные материалы по теплостойкости разделяются на классы и для каждого из них определены предельно допустимые температуры нагрева. В настоящее время в электрических машинах в основном применяется изоляция классов E (120°C), B (130°C), F (155°C), C (свыше 155°C).

Работа с большим током во время пика нагрузки должна быть компенсирована (в тепловом отношении) временем работы с малой нагрузкой. Возможность использования такого режима работы должна быть проверена расчетом ЭД на нагрев.

Т.о. для выбора мощности ЭД необходимы тепловые расчеты, показывающие температуру ЭД при его работе – она должна быть меньше максимально допустимой температуры и в то же время двигатель не должен быть недогружен. Эти расчеты могут быть выполнены только для конкретного ЭД, для которого известны все параметры (η , J и т.д.).

Выбрав ЭД по мощности, зная его тип можно определить максимальный (M_{\max}), номинальный (M_N), пусковой ($M_{\text{пуск}}$) моменты ЭД. Выбранный ЭД должен удовлетворять следующим условиям:

- $M_{\text{пуск}}$ должен быть достаточен для осуществления заданных условий разгона;
- M_{\max} должен быть достаточен для бесперебойной работы механизма при толчках нагрузки;
- нагрев ЭД не должен превосходить допустимых пределов.

Основной материал для проектирования ЭД – **нагрузочные диаграммы**.

Типичными для механических прессов являются однопиковые и двухпиковые графики нагрузки. Однопиковые графики – при наличии жесткой муфты сцепления или при автоматических ходах. Пик нагрузки получается в момент совершения операции. Двухпиковые графики нагрузки получаются при наличии фрикционной муфты: первый пик нагрузки обусловлен разгоном дополнительных маховых масс в результате включения муфты, второй – выполнением рабочей операции, причем, пик нагрузки при включении муфты может быть больше пика нагрузки во время рабочей операции, особенно если пресс недогружен.

Для обоснованного выбора ЭД необходимо знать нагрузочные диаграммы рабочего механизма и построенные на их основании диаграммы самого ЭД.

Нагрузочные диаграммы исполнительного механизма представляют собой зависимость статического момента (или мощности) нагрузки от времени или пути, пройденного валом механизма или его рабочим органом. Эти диаграммы строятся на основании расчетов, исходя из данных производственного процесса, а также кинематических связей и свойств механизма.

На основании нагрузочной диаграммы механизма должен быть предварительно выбран ЭД, после чего могут быть построены нагрузочные диаграммы самого ЭД, так как они зависят от мощности и характеристик самого ЭД. Только по этим диаграммам можно сделать окончательное заключение о соответствии выбранной мощности заданному режиму работы исполнительного механизма как по условиям нагрева, так и по перегрузочной способности. Таким образом, ЭД выбирают методом постепенного приближения.

При длительной, малоизменяющейся нагрузке, ЭД определяется условиями его нагрева. При пиковой нагрузке ЭД выбирается как по условиям нагрева, так и по величине максимального момента. Иногда при выборе ЭД решающим является вопрос о потерях в ЭД при переходных режимах (при пуске, реверсе, тормозе), количество которых доходит до нескольких сот в час. Во всех случаях ЭД проверяется по пусковому моменту. Максимальный момент ДПТ ограничивается условиями коммутации и составляет для ДПТ параллельного возбуждения $(1,8-2,5)M_H$; для ДПТ СВ – $3,5M_H$; ДПТ ПВ – до $4M_H$, для АД $\sim (1,7-2,3)M_H$.

Главные ЭД КШ в основном работают в режиме длительной нагрузки. В кратковременном режиме работают вспомогательные ЭД, например ЭД для установки величины хода ползуна. В повторно-кратковременном режиме работают двигатели подвижных столов. По характеру нагрузки делятся на постоянные, переменные и ударные (когда M_{MAX} намного больше M_{MIN} , но имеет малую длительность). Для КШО характерны переменные и ударные нагрузки.

Выбор мощности ЭД обуславливается характером изменения статической нагрузки на его валу, а также протеканием переходных процессов. Задача выбора ЭД в ряде случаев осложняется тем, что нагрузка на его валу в процессе работы не остается постоянной, а изменяется во времени, вместе с чем изменяются потери и нагрев.

Так как мощность ЭД, его номинальное, максимальное скольжение и маховой момент маховика взаимно связаны, при одном и том же графике нагрузки возможен ряд решений.

Из-за большого разнообразия возможных условий работы и необходимости учета как технологических, так и конструктивных, экономических вопросов, стоимости изделий – в реальных условиях довольно часто существует недогрузка

прессов. Поэтому, в случае, когда можно ожидать недогрузки пресса, которая может быть результатом как плохого использования ходов пресса, так и изменения производственной операции, правильным будет стремление ограничиться ЭД меньшей мощности за счет увеличения электромеханической постоянной времени привода $T_{эмех}$, так как при работе с недогрузкой энергетические показатели ЭД меньшей мощности будут выше (так как загрузка ЭД будет относительно большой). [Электромеханическая постоянная времени до известной степени характеризует механическую инерционность ЭД и служит, в некоторой мере, показателем продолжительности механических переходных процессов привода при нарушении его установившегося состояния и переходе к новому установившемуся режиму].

В тех случаях, когда возможна временная недогрузка, может оказаться целесообразным, при значительной мощности ЭД, применение АД с ФР, несмотря на большую стоимость. При полной нагрузке можно включать в цепь ротора добавочные сопротивления, обеспечивающие снижение скорости на 15-25%, и, следовательно, большее участие маховика в преодолении нагрузки. При недогрузке механизма добавочное сопротивление уменьшается.

Иногда для улучшения $\cos\varphi$ при недогрузке АД целесообразно временно питать пониженным напряжением или применять АД с секционированной обмоткой статора (переключение пар полюсов).

Таким образом, можно ограничиться ЭД меньшей мощности, который при нагрузке механизма будет работать с более высокими энергетическими показателями, но следует учитывать, что энергетические показатели АД с КЗР при номинальном режиме выше, чем у АД с ФР (например, АД $P_n = 20$ кВт с ФР при $n = 1000$ об/мин. имеет $\eta = 85\%$, $\cos\varphi = 0,81$, а АД с КЗР $P = 20$ кВт при $n = 1000$ об/мин имеет $\eta = 88,5\%$, $\cos\varphi = 0,84$).

В случае, когда нет основания ожидать изменений режима работы механизма (например, при работе его в автоматической линии, при автоматизации подачи) – применять АД с ФР не следует.

Практически следует выбирать АД возможно меньшей мощности, хотя это и приводит к увеличению махового момента маховика или к увеличению неравномерности хода.

В некоторых случаях размеры маховика определяются конструктивными соображениями, тогда необходимо соответственно выбирать мощность и скольжение АД, считая параметры маховика известными.

Характеристики производственных механизмов позволяют оценить, какую нагрузку будет нести ЭД в установившемся режиме при различных скоростях.

Нагрузка на валу ЭП изменяется не только в связи с регулированием скорости механизма, но и вследствие изменения режима работы механизма. Изменение момента нагрузки и угловой скорости во времени характерно для значительного числа механизмов (механизмов циклического действия). Это изменение статического момента и скорости в зависимости от времени обычно представляют в виде графиков.

Зависимость статического момента, приведенного к валу ЭД, от времени называется нагрузочной диаграммой ЭП. Зависимость скорости исполнительного органа механизма (приведенной к валу ЭД) от времени $\omega = f(t)$ – диаграммой скорости ЭП (тахограммой).

Различают нагрузочную диаграмму механизма и ЭП. Нагрузочная диаграмма механизма представляет собой зависимость $M_c = f'(t)$. Обычно изменение момента нагрузки задано в зависимости угла поворота кривошипного вала, то есть в виде зависимости $M = f(\alpha)$. Эту зависимость различными методами приводят к зависимости $M_c = f'(t)$, причем статический момент приводится к валу ЭД.

Для ЭД эта зависимость более сложная, она определяется не только статическими режимами работы, но и переходными процессами ЭП: $M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}$.

Переходные процессы ($\frac{d\omega}{dt} \neq 0$) оказывают значительное влияние на момент, развиваемый ЭД (включение ЭД в сеть, отключение; наброс, сброс нагрузки). Построение нагрузочной диаграммы ЭП является обязательным этапом расчета мощности ЭД и дает возможность выявить действительные условия работы исполнительного механизма при выбранном типе привода. Нагрузочная диаграмма ЭП, как правило, не похожа на нагрузочную диаграмму рабочей машины.

Нагрузочная диаграмма ЭП характеризует зависимость вращающего момента, тока или мощности, развиваемой ЭД от времени. Она используется для оценки перегрузочной способности ЭП и сопоставления ее с допустимой кратковременной нагрузкой для данного типа ЭД, а также для проверки мощности предварительно выбранного ЭД по нагреву.

Статические нагрузки определяются на основании технологических данных, характеризующих работу производственного механизма, динамические нагрузки оцениваются инерционными моментами, которые развиваются ЭП. Следует отметить, что только нагрузочная диаграмма привода определяет действительный характер движения системы.

Выбор мощности ЭД обычно производится в следующей последовательности:

- 1) расчет мощности и предварительный выбор ЭД;
- 2) проверка выбранного ЭД по условиям пуска и перегрузке;
- 3) проверка выбранного ЭД по нагреву.

Своеобразие условий работы КШМ очень затрудняет проектирование их ЭП, из-за чего не существует общепринятого и достаточно обоснованного метода расчета. Существует множество различных методов расчета с соответствующими упрощениями и допущениями.

6.2. Этапы выбора электродвигателя

1. Ориентировочно определяется номинальный момент ЭД по нагрузочной диаграмме механизма. При этом учитывается предыдущий опыт проектирования ЭП рассматриваемого типа. В некоторых случаях можно определить расчетный номинальный момент по соотношению $M_{НОМ} \geq k_3 M_{СЭ}$, где $k_3 = (1,1 - 1,3)$ коэффициент запаса, учитывающий динамические режимы ЭД; $M_{СЭ}$ – эквивалентный момент нагрузки. Если статический момент M_C изменяется во времени и нагрузочная диаграмма имеет несколько участков, то $M_{СЭ}$ определяется обычно как среднеквадратичная величина

2.

$$M_{СЭ} = \sqrt{\frac{1}{t_u} \sum_{i=1}^n M_{ci}^2 \cdot t_i},$$

где M_{ci} , t_i – момент и длительность i -того участка нагрузочной диаграммы.

3. Определяется номинальная скорость ЭД $\omega_{ном} > \omega_{уст}$.
4. Определяется номинальная расчетная мощность ЭД:

$$P_{НОМ} = M_{НОМ} \omega_{ном} \geq k_3 M_{СЭ} \omega_{уст}.$$

5. Из каталога выбирается ЭД ближайшей большей мощности и скорости, имеющий конструктивное исполнение, соответствующее условиям работы данной рабочей машины.

6. Осуществляется проверка выбранного ЭД по перегрузочной способности. Для этого строится нагрузочная диаграмма ЭД с помощью уравнения механического движения ЭП:

$$M = M_C + J \frac{d\omega}{dt} = M_C + M_{дин}.$$

$M_{дин}$ определяется суммарным приведенным моментом инерции J и заданными ускорениями на участках разгона и замедления тахограммы.

7. Для проверки выбранного ЭД по перегрузочной способности сопоставляется максимально допустимый момент ЭД (M_{max}) с максимальным моментом M , взятым по нагрузочной диаграмме ЭД: $M_{max} > M$. Для ДПТ обычного исполнения $M_{max} = M_{дон} = (1,5 \div 2,5)M_{ном}$. Для АД с фазным ротором этот момент приблизительно равен M_k .

8. При выборе АД с КЗР, ЭД должен быть проверен по условиям пуска, для чего сопоставляют его $M_{п}$ с моментом нагрузки при пуске $M_{с.п.}$: $M_{п} \geq M_{с.п.}$.

9. Осуществляется проверка по нагреву.

ЛИТЕРАТУРА

1. Банкетов, А.Н. Кузнечно-штамповочное оборудование / А.Н. Банкетов. – М.: Машиностроение, 1970. – 415 с.
2. Гейлер, Л.Б. Электрооборудование и электроавтоматика кузнечно-прессовых машин / Л.Б. Гейлер, И.В. Харизоменов. – М.: Машгиз, 1960. – 225с.
3. Глаголев, Г.М. Электрооборудование кузнечно-прессовых цехов / Г.М. Глаголев. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 305 с.
4. Костенко, М.П. Электрические машины / М.П. Костенко, Л.П. Пиотровский; под ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – Л.: Энергия, 1973. – 500 с.
5. Москаленко, В.В. Автоматизированный электропривод / В.В. Москаленко. – М.: «Высшая школа», 1986. – 460 с.
6. Справочник по электрическим машинам / под ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 605 с.
7. Стокалов, В.Е. Электрооборудование кузнечно-прессовых машин – справочник / В.Е. Стокалов, Г.С. Усышкин, В.М. Степанов. – М.: Машиностроение, 1970. – 375 с.
8. Харизоменов, И.В. Электрооборудование кузнечно-штамповочных машин / И.В. Харизоменов. – М.: «Высшая школа», 1970. – 185с.
9. Чиликин, М.П. Основы автоматизированного электропривода / М.П. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.М. Шинянский. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.