

# **1. ВВЕДЕНИЕ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

## **1.1. Цели и задачи курса**

В XX веке основным источником механической энергии становится более совершенный (по сравнению с паровым) электрический двигатель. Благодаря более высокому КПД, меньшим массогабаритным показателям, большим возможностям в области реализации управления электродвигатель в качестве приводного устройства получил широчайшее распространение. В настоящее время более 85% всех приводов с мире – электрические.

Целью учебного курса является знакомство студентов с возможностями и функциями электропривода, его электромеханическими свойствами, принципами регулирования и вопросами выбора мощности электродвигателей.

Целью дисциплины «Электропривод» является изучение общих физических закономерностей электропривода, особенностей взаимодействия элементов электромеханической системы, характера статических и динамических процессов в разомкнутых и замкнутых системах. В результате изучения курса обучающийся должен научиться объяснять характер процессов и зависимостей, уметь анализировать влияние изменений параметров, настроек системы и внешних воздействий на работу привода и механизма, строить механические и электромеханические характеристики различных двигателей и электропривода в целом.

## **1.2. Состав курса и его место в системе обучения**

В курсе рассматриваются следующие основные вопросы.

- 1) *Общие сведения.* Даны основные определения автоматизированного электропривода, этапы развития, классификация и области применения.
- 2) *Механика электропривода.* Приведение моментов и сил сопротивления, виды моментов сопротивления, механические характеристики производственных механизмов. Уравнение движения электропривода, установившийся и переходные режимы работы привода.
- 3) *Электромеханические свойства электропривода постоянного тока (ЭППТ).* Классификация двигателей по способу возбуждения, МХ и ЭМХ ДПТ с НВ, естественные и искусственные характеристики электродвигателя, двигательные и тормозные режимы ДПТ с НВ.
- 4) *Электромеханические свойства электропривода переменного тока.* Синхронный и асинхронный электродвигатели. Механические характеристики. естественные и искусственные характеристики электродвигателя, двигательные и тормозные режимы АД.
- 5) *Регулирование угловой скорости электропривода.* Понятие «регулирование» и показатели качества регулирования. Регулирование скорости ДПТ и АД.
- 6) *Основы выбора мощности электродвигателей.* Нагреве и охлаждении двигателей. Классификация режимов работы двигателя по нагреву. Методы проверки двигателей по нагреву.

### 1.3. Этапы развития, структура, понятие и основные элементы АЭП

С помощью автоматизированного электропривода осуществляются необходимые перемещения в металлорежущих станках, различных перерабатывающих машинах, транспортных средствах, в подъемных установках и т.д. Главным потребителем производимой электроэнергии является электропривод (ЭП).

Различают 3 этапа развития электропривода:

Первый этап: *групповой* ЭП – 1 двигатель передает механическую энергию нескольким агрегатам. Не очень совершенен – не может регулировать скорость каждого привода отдельно. Регулирование скорости возможно с помощью механической передачи.

Второй этап: *индивидуальный* ЭП – каждая рабочая машина имеет свой электродвигатель, привод также и управляет системой.

Третий этап: *многодвигательный* ЭП – когда вместо одного двигателя для движения рабочего органа применяют несколько двигателей.

**Электроприводом** (часто автоматизированным) называется электромеханическое устройство, предназначенное для приведения в движение рабочих органов машин и управления их технологическими процессами, состоящий из передаточного устройства, электродвигателя, преобразовательного и управляющего устройств.

Особенность АЭП состоит в том, что переработка информации, необходимая для управления потоками энергии, осуществляется автоматически. Благодаря применению АЭП человек освобождается не только от тяжелого физического труда, но с него снимаются также функции соответствующей переработки информации.

Выделяют три основных элемента:

- 1) *механическая часть* привода, включающая передаточный механизм и исполнительный механизм (он же РО). Предназначена для передачи механической энергии к исполнительному органу рабочей машины и для изменения вида и скорости движения и усилия (момента вращения).
- 2) *электродвигательное устройство* (ЭМП), предназначенное для преобразования электрической энергии в механическую или механическую в электрическую.

3) система управления (управляющее устройство), состоящая из силовой преобразовательной части, управляющего устройства, задающего устройства и датчиков обратных связей. Интеллектуальная часть электропривода.

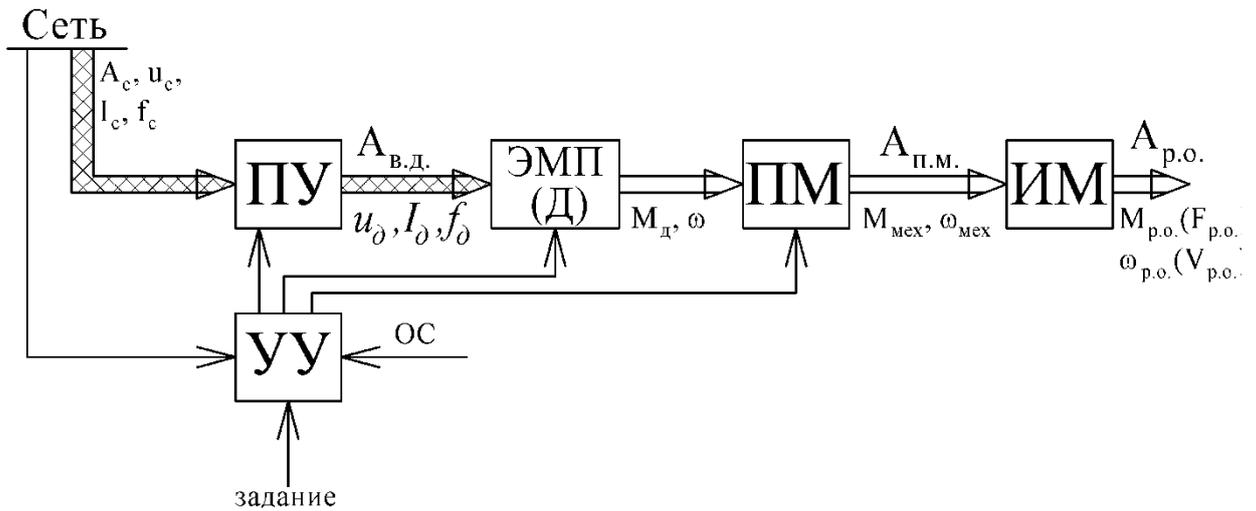


Рис. 1.1. Структурная схема автоматизированного электропривода

## 1.4. Классификация типов электроприводов

### 1.4.1. По роду тока

Электропривод постоянного и переменного тока. В настоящее время наблюдается тенденция перехода к приводу переменного тока (асинхронному). Связано это с рядом факторов: меньшая стоимость вследствие простоты конструкции, возможность получения лучшей динамики. Основной недостаток – большая сложность математического описания и законов управления.

### 1.4.2. По способу распределения механической энергии

1) *Групповой* ЭП обеспечивает движение исполнительных органов нескольких рабочих машин или нескольких исполнительных органов одной рабочей машины. Передача механической энергии от одного двигателя к нескольким рабочим машинам и её распределение между ними производится с помощью одной или нескольких трансмиссий. В настоящее время практически не применяется ввиду технического несовершенства. Уступил место индивидуальному и взаимосвязанному приводам.

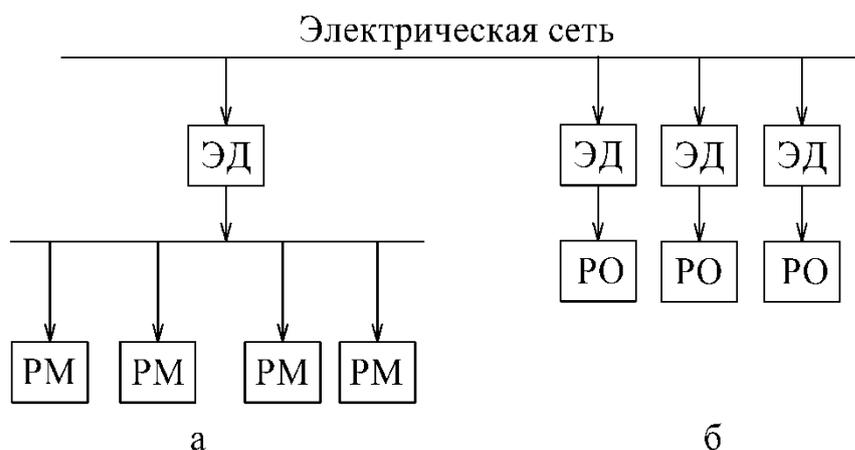


Рис. 1.2. Структурные схемы группового (а) и индивидуального (б) электропривода

2) *Индивидуальный* привод по сравнению с групповым обладает рядом преимуществ: производственные помещения не загромождаются тяжелыми трансмиссиями и передаточными устройствами; улучшаются условия работы и повышается производительность труда вследствие облегчения управления отдельными механизмами. Индивидуальный электропривод отличается более лучшими энергетическими показателями. Значительно упрощаются механические передачи, повышается точность работы

привода. При использовании индивидуального ЭП создаются наиболее благоприятные условия для автоматизации работы машин и технологических процессов. Такой ЭП широко применяется в сложных металлорежущих станках, прокатных станах, экскаваторах, подъемно-транспортных машинах, роботах и др.

3) *Взаимосвязанный* ЭП имеет два или несколько электрически или механически связанных между собой двигателей. Примером взаимосвязанного ЭП может служить привод цепного конвейера большой протяженности. Исполнительным органом такого конвейера служит цепь, приводимая в движение несколькими двигателями, установленными по длине конвейера. Взаимосвязанный ЭП широко применяется в транспортных установках, бумагоделательных машинах, текстильных агрегатах, прокатных станах металлургического производства и т.д. Одной из разновидностей взаимосвязанного ЭП является многодвигательный привод – это электропривод, в котором несколько двигателей работают на общий вал.

По виду движения различают реверсивный и нереверсивный ЭП поступательного либо вращательного движения.

#### *1.4.3. По степени управляемости*

- 1) *нерегулируемый* – для приведения в действие исполнительного органа рабочей машины с одной скоростью, параметры привода меняются только в результате возмущающих воздействий;
- 2) *регулируемый* - скорость рабочего органа может изменяться в указанных пределах, параметры привода могут меняться под воздействием управляющего устройства;
- 3) *программно - управляемый* – скорость вращения изменяется согласно некоторой программе;
- 4) *следящий* – автоматически отрабатывающий перемещение исполнительного органа рабочей машины с определённой точностью в соответствии с произвольно меняющимся задающим сигналом;
- 5) *адаптивный* – автоматически избирающий структуру или параметры системы управления при изменении условий работы машины с целью выработки оптимального режима.

#### *1.4.4. По роду передаточного устройства*

1) Редукторный, в котором электродвигатель передает вращательное движение рабочему органу машины через редуктор

2) Безредукторный – передача движения осуществляется непосредственно к рабочему органу, либо через передаточное устройство, не содержащее редуктор.

#### *1.4.5. По уровню автоматизации*

1) Неавтоматизированный. Управление осуществляется вручную. Применяется в установках малой мощности, бытовой и медицинской технике.

2) Автоматизированный. Регулирование параметров происходит автоматически, управляющие команды задаются вручную.

3) Автоматический. Управляющие воздействия вырабатываются автоматически, без участия оператора.

## **1.5. Область применения и тенденции развития автоматизированного электропривода производственных механизмов**

Индивидуальный автоматизированный электропривод получил широкое распространение в самых различных областях жизни – от промышленного производства до сферы быта. Широта применения определяется большим диапазоном мощностей и большими возможностями по автоматизации и управлению, а также энергоэффективности электропривода. ЭП обеспечивает большие возможности по регулированию потока энергии. Находят применение современные системы программного управления технологическими процессами, устройства, оптимизирующие по каким либо критериям работу электропривода и механизма, развивается использование принципов адаптивного автоматического управления.

Первой особенностью развития электропривода является расширение области применения регулируемого электропривода, главным образом за счет количественного и качественного роста регулируемых электроприводов переменного тока благодаря достигнутым в настоящее время успехам в области полупроводниковой техники.

Второй особенностью развития современного привода является интенсивное повышение технологических требований к динамическим и точностным показателям электропривода, расширение и усложнение его функций, связанных с управлением технологическими процессами, и соответствующее возрастание сложности систем управления электроприводами. Широко внедряется микропроцессорное управление.

В качестве третьей особенности развития можно выделить тенденцию к созданию унифицированных блочных устройств.

Тенденция к упрощению кинематических цепей механизмов ведет к созданию и применению безредукторного привода. Для этих целей применяют тихоходные двигатели с частотой вращения 8-120 об/мин. Несмотря на большие габариты, как правило, применение безредукторного привода оправдывается лучшими энергетическими показателями, большей надежностью и быстродействием. Также в этом направлении идет развитие линейных двигателей, позволяющих максимально упростить кинематику и создать

максимальные удобства для оптимального конструирования машин в поступательным движением рабочих органов.

Ввиду того, что более половины вырабатываемой энергии потребляется электроприводом, к электроприводу предъявляются требования по преобразованию энергии из электрической в механическую с минимальными потерями.

## 2. МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### 2.1. Приведенное механическое звено

Механическая часть электромеханической системы включает в себя все связанные движущие массы: двигателя, передаточного устройства и исполнительного механизма машины. К ротору двигателя при скорости  $\omega$  приложен электромагнитный момент  $M$ , под действием которого механическая часть приводится в движение. Непосредственное представление о движущихся массах установки и механических связях между ними даёт кинематическая схема электропривода.

Примерная кинематическая схема электропривода с вращательным движением исполнительного органа представлена на рис. 2.1. Иногда рабочий орган механизма совершает поступательное движение (кран, лифт, строгальный станок, шлифовальный, долбежный и др.).

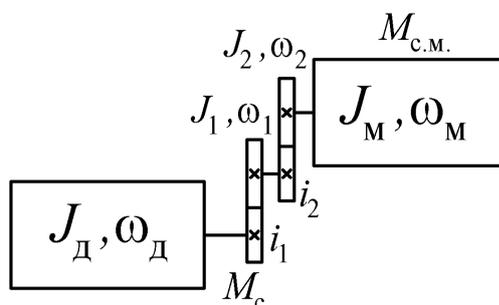


Рис. 2.1. Кинематическая схема связи двигателя с исполнительным механизмом

Каждый из элементов реальной кинематической цепи обладает упругостью, т.е. деформируется под нагрузкой, а в соединениях элементов имеются воздушные зазоры. Если учитывать все факторы, то расчетная схема будет очень сложной и расчет такой схемы выполняется на ЭВМ. Однако основные закономерности движения таких систем определяются наибольшими массами и зазорами и наименьшими жесткостями связей системы, что позволяет свести расчетную схему механической части привода к двухмассовой (иногда одномассовой) механической системе с эквивалентными упругими связями и с суммарным зазором, приведенным к угловой скорости вала двигателя.

Для составления расчетных схем механической части электропривода необходимо приведение всех параметров

элементов кинематической цепи к одной расчетной скорости. Обычно наиболее удобным является приведение их к скорости двигателя. Условием соответствия приведенной расчетной схемы реальной механической системе является выполнение закона сохранения энергии, то есть должны выполняться условия

$$(W_{ki})_{\text{пр}} = J_{\text{пр}i} \omega_1^2 / 2 = J_i \omega_i^2 / 2;$$

$$(W_{kj})_{\text{пр}} = J_{\text{пр}j} \omega_1^2 / 2 = m_j v_j^2 / 2.$$

Откуда можно найти формулы приведения

$$J_{\text{пр}i} = J_i / i_i^2;$$

$$J_{\text{пр}j} = m_j \rho_{1j}^2.$$

Расчетную схему механической части привода в общем случае можно свести к одному обобщенному жесткому механическому звену, имеющему эквивалентную массу с моментом инерции  $J$ , на которую воздействует электромагнитный момент двигателя  $M$ , и суммарный приведенный к валу двигателя момент сопротивления (статической момент)  $M_c$ , включающий все механические потери в системе, в том числе механические потери в двигателе.

Момент сопротивления механизма, возникающий на валу рабочей машины, состоит из двух слагаемых, соответствующих полезной работе и работе трения. Полезная работа, совершаемая производственным механизмом, связана с выполнением соответствующей технологической операции. Работа трения, совершаемая в производственном механизме, учитывается обычно КПД механических связей. Момент трения всегда направлен против движущего момента привода.

## 2.2. Приведение моментов и сил сопротивления, инерционных масс и моментов инерции

### 2.2.1. Активные и реактивные моменты сопротивления.

В общем случае статический момент

$$M_c = \Delta M_\Sigma + M_{c\Sigma},$$

где  $\Delta M_\Sigma$  – суммарные потери в приводе;  $M_{c\Sigma}$  – суммарный статический момент.

Обычно первая составляющая имеет сравнительно малую величину. Поэтому рассмотрим вторую составляющую статического момента, оказывающего наибольшее влияние на привод.

Для электропривода имеет значение, как зависит статический момент нагрузки от скорости. Такую зависимость описывает механическая характеристика механизма, то есть зависимость статического момента нагрузки от скорости  $M_c = f(\omega)$  или  $\omega = f(M_c)$ .

По характеру взаимодействия с электроприводом все силы и моменты делятся на две большие группы: активные и реактивные.

*Активными* силами и моментами называются силы и моменты, создаваемые внешними по отношению к двигателю источниками механической энергии и не зависящие от работы двигателя. Например, силы тяжести, ветровые нагрузки. Активный статический момент не меняет своего знака при изменении направления вращения.

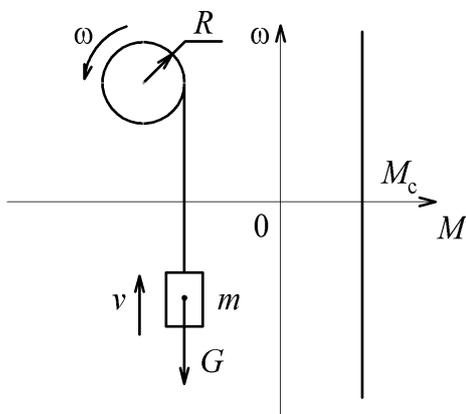


Рис. 2.2. Механическая характеристика активного момента

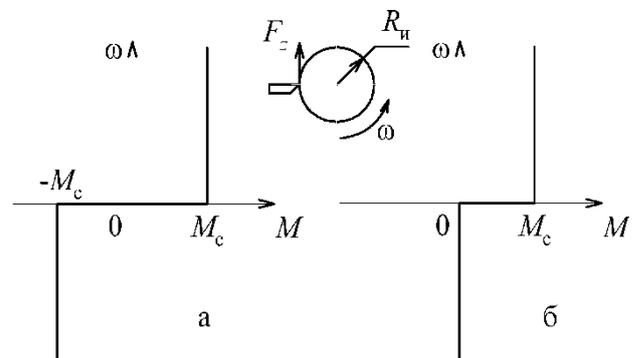


Рис. 2.3. Механическая характеристика реактивного момента

На рис.2.2. приведенный момент силы тяжести груза  $G$ :

$$M_c = GR = mgR,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $m$  – масса груза.

*Реактивными* силами и моментами называются силы и моменты, возникающие как реакция на момент, создаваемый двигателем и направлены против направления вращения двигателя. Все реактивные силы и моменты зависят от скорости. По характеру этой зависимости ( $M_c = f(\omega)$ ) различают нагрузки типа сухого трения, типа вязкого трения и вентиляторного типа.

Силы и моменты сухого трения неизменны по модулю, но скачком изменяют направление в зависимости от знака скорости

$$M_c = |M_c| \text{sign } \omega.$$

Характеристика момента сухого трения показана на рис. 2.3, а.

Реактивные нагрузки, возникающие при различных технологических процессах обработки, могут иметь одно направление, скачком изменяя своё значение до нуля при изменении знака скорости. Примером может служить зависимость (рис. 2.3, б) момента резания от скорости при обработке изделия резцом. Значение статического момента при этом пропорционально усилию резания  $F_z$ :

$$M_c = F_z R_n,$$

где  $R_n$  – радиус изделия.

Силы и моменты вязкого трения линейно зависят от скорости (рис. 2.4, а):

$$M_c = \beta_{\text{в.т.}} \omega,$$

где  $\beta_{\text{в.т.}}$  – коэффициент пропорциональности.

Обычно момент вязкого трения составляет 8-10% от момента сухого трения.

Третий тип часть встречающихся нагрузок – вентиляторная нагрузка. Такая нагрузка зависит от скорости в более высокой степени (рис. 2.4, б)

$$M_c = \beta_{\text{мех}} \omega^n, \quad n > 1.$$

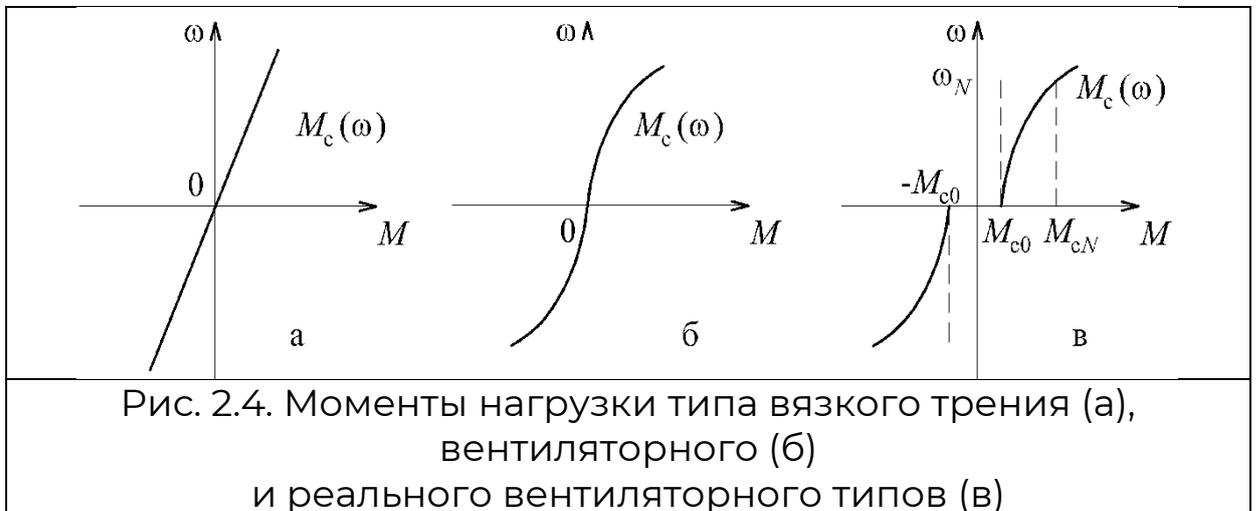
При  $n=2$  нагрузку называют чисто вентиляторной. Такой зависимостью обладают центробежные вентиляторы. Для ряда механизмов показатель степени  $n > 2$ . Такую характеристику имеют центробежные насосы, работающие на противодавление.

В реальности у механизма есть некоторый начальный момент трогания  $M_{c0}$ , составляющий 20-40% от номинального  $M_{cN}$  (рис. 2.4, в).

Существуют механизмы циклического действия, у которых момент нагрузки зависит от угла поворота:

$$M_c = M_{c.\max} \sin \varphi.$$

Рассмотренные типовые нагрузки обычно содержатся в качестве составляющих в нагрузках реальных электроприводов.



### 2.2.2. Приведение момента инерции для вращательного и поступательного движения рабочего органа

Условием соответствия приведенной расчетной схемы реальной механической системе является выполнение закона сохранения энергии. При приведении необходимо обеспечить сохранение запаса кинетической и потенциальной энергии системы, а так же элементарной работы всех действующих в системе сил и моментов на возможных перемещениях. Поэтому при приведении моментов инерции элемента системы, движущегося вращательно со скоростью  $\omega_i$  или массы, поступательно движущейся со скоростью  $v_j$  к расчетной скорости  $\omega_1$  должны выполняться условия

$$(W_{ki})_{\text{пр}} = J_{\text{пр}i} \omega_1^2 / 2 = W_{ki} = J_i \omega_i^2 / 2;$$

$$(W_{ki})_{\text{пр}} = J_{\text{пр}i} \omega_1^2 / 2 = W_{ki} = m_j v_j^2 / 2.$$

Отсюда можно получить формулы приведения моментов инерции:

$$J_{\text{пр}i} = J_i / i_{1i}^2;$$

$$J_{\text{пр}j} = m_j \rho_{1j}^2,$$

где  $i_{1i} = \omega_1 / \omega_i$  – передаточное число от вала приведения до  $i$ -го вала;  $\rho_{1j} = v_j / \omega_1$  – радиус приведения к валу со скоростью  $\omega_1$ .

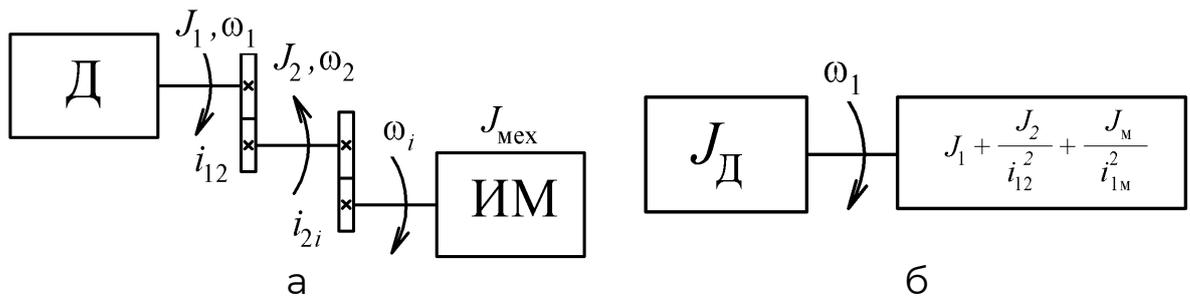


Рис. 2.5. Расчетная (а) и эквивалентная расчетная (б) схемы механической части (вращательное движение рабочего органа)

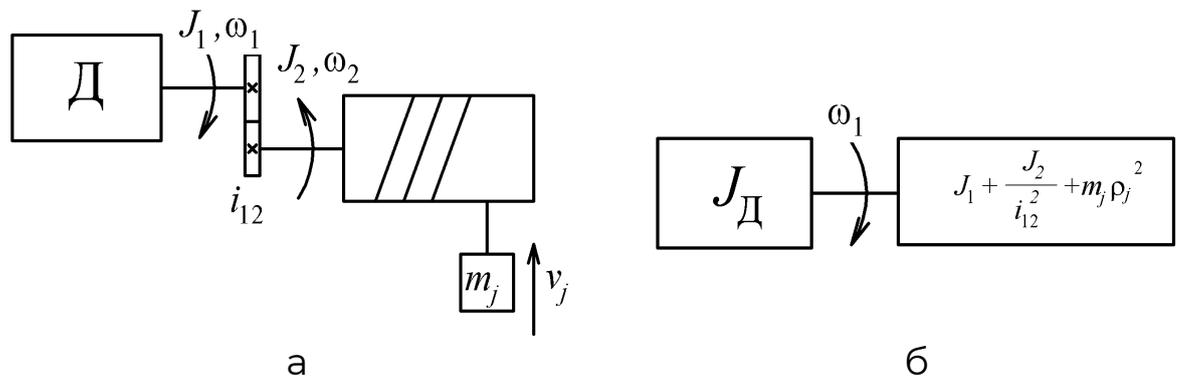


Рис. 2.6. Расчетная (а) и эквивалентная расчетная (б) схемы механической части (поступательное движение рабочего органа)

Приведенный суммарный момент инерции для механизма на рис 2.5, а вычисляется с учетом формул приведения для моментов инерции следующим образом:

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{д}} + J_1 + \frac{J_2}{i_{12}^2} + \frac{J_{\text{м}}}{i_{1\text{м}}^2}.$$

В случае поступательного движения рабочего органа исполнительного механизма:

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{д}} + J_1 + \frac{J_2}{i_{12}^2} + m_j \rho_{1j}^2,$$

где  $\rho_{1j} = \frac{v}{\omega_1} = \frac{\omega_2 r_{\delta}}{\omega_1} = \langle \omega_2 = \omega_1 / i_{12} \rangle = \frac{r_{\delta}}{i_{12}}$  - радиус приведения.

### 2.2.3. Приведение моментов сопротивления

Приведение моментов сопротивления от одной оси вращения к другой может быть произведено на основании энергетического баланса системы. Потери мощности, возникающие в промежуточных передачах, учитываются введением в расчеты соответствующего КПД -  $\eta_{\text{п}}$ .

Без учета КПД передачи приведение моментов сопротивления можно выполнить приравниванием мощностей на двигателе и рабочем органе ИМ:

$$P_1 = M_{\text{пр}i} \omega_1 \text{ и } P_M = M_{\text{с.м}} \omega_{Mi},$$

где  $M_{\text{с.м}}$  – момент сопротивления производственного механизма.

Откуда статический момент на валу двигателя

$$M_{\text{пр}i} \omega_1 = M_{\text{с.м}} \omega_{Mi}, \quad M_{\text{пр}i} = \frac{M_{\text{с.м}} \omega_{Mi}}{\omega_1} = \frac{M_{\text{с.м}}}{i_{li}}.$$

Приведение сил сопротивления производится аналогично приведению моментов. Без учета потерь в передаче приведенный к валу двигателя статический момент

$$M_{\text{пр}i} \omega_1 = F_{\text{с.м}} v_{Mj}, \quad M_{\text{пр}i} = \frac{F_{\text{с.м}} v_{Mj}}{\omega_1} = F_{\text{с.м}} \rho_{1j}.$$

#### 2.2.4. Об учете КПД передаточного механизма

Рассмотрим упрощенную схему механической части электропривода. Передаточный механизм (ПМ) обладает двумя характеристиками передаточное число  $i_{\text{мех}}$  и КПД  $\eta_{\text{мех}}$  механизма. В КПД механизма входят все КПД элементов

$$\eta_{\text{мех}} = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_i.$$

Двигатель создает механическую мощность, направленную от сети к исполнительному механизму. Уравнение баланса мощностей

$$M_c \omega_1 = \frac{M_{\text{мех}} \omega_i}{\eta_{\text{мех}}} + \Delta M \omega_1, \quad (1.1)$$

где  $\Delta M$  – момент потерь, складывающийся из момента трения в двигателе и передачах.

Величина момента потерь редко превосходит 3-5 % от номинального момента и им часто пренебрегают, считая  $\Delta M \approx 0$ .

Разделив обе части уравнения (1.1) на  $\omega_1$ , получим

$$M_c = \frac{M_{\text{мех}}}{i_{\text{мех}} \eta_{\text{мех}}} + \Delta M,$$

где  $i_{\text{мех}} = \omega_1 / \omega_i$  - общее передаточное число передаточного механизма.

Таким образом, для двигательного режима справедлива следующая формула для определения приведенного статического момента:

$$M_c = \frac{M_{\text{мех}}}{i_{\text{мех}} \eta_{\text{мех}}}.$$

Рис. 2.7, а иллюстрирует направления потока энергии и моментов.

В генераторном режиме источником момента является сам исполнительный механизм. Статическим моментом в данном случае является момент двигателя в тормозном режиме. Уравнение баланса энергий для генераторного режима

$$M_c \omega_1 = M_{\text{мех}} \omega_{\text{мех}} \eta_{\text{мех}} .$$

Выполнив процедуру деления на скорость двигателя, получаем

$$M_c = \frac{M_{\text{мех}} \eta_{\text{мех}}}{i_{\text{мех}}} .$$

При поступательном движении статический момент в двигательном режиме

$$M_c = \frac{F_{\text{мех}} \rho}{\eta_{\text{мех}}} ,$$

в генераторном режиме

$$M_c = F_{\text{мех}} \rho \eta_{\text{мех}} .$$

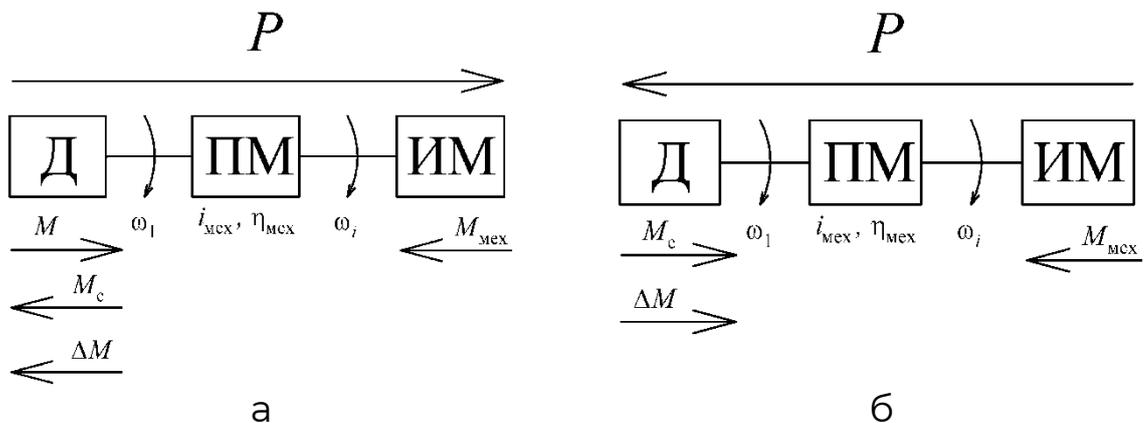


Рис. 2.7. Направления энергии и моментов для двигательного (а) и генераторного (б) режимов работы привода

### 2.3. Механические характеристики производственных механизмов и электрических двигателей. Понятие жесткости механической характеристики

Для правильного и экономичного использования электродвигателей необходимо выявить механических характеристик двигателя характеристике производственного механизма.

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

Различные производственные механизмы обладают различными механическими характеристиками. Однако можно выделить отдельные категории механизмов на основании вида механической характеристики. Общий вид характеристики

$$M_c = M_0 + (M_{c,ном} - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^x,$$

где  $M_c$  – момент сопротивления производственного механизма при скорости  $\omega$ ;  $M_0$  – момент сопротивления трения в движущихся частях механизма;  $M_{c,ном}$  – момент сопротивления при номинальной скорости  $\omega_{ном}$ ;  $x$  – показатель скорости.

1. Не зависящая от скорости механическая характеристика (прямая 1 на рис. 2.8, а). показатель степени  $x = 0$  и момент не зависит от скорости. Такой характеристикой обладают подъемные краны, лебедки, механизмы подачи металлорежущих станков, поршневые насосы при неизменной высоте подачи. Сюда же можно отнести механизмы, у которых основным моментом сопротивления является момент трения.

2. Линейно-возрастающая механическая характеристика (прямая 2 на рис. 2.8, а) В этом случае  $x = 1$  и момент сопротивления линейно зависит от скорости  $\omega$ . Главный привод некоторых станков.

3. Параболическая механическая характеристика (кривая 3 на рис. 2.8, а). Этой характеристике соответствует  $x = 2$ . Механизмы, обладающие такой зависимостью, называют механизмы с чисто-вентиляторной нагрузкой. Сюда относят центробежные насосы, гребные винты.

4. Нелинейно-спадающая механическая характеристика (кривая 4 на рис. 2.8, а). При этом  $x = -1$  и момент сопротивления  $M_c$  изменяется обратно-пропорционально

скорости, а мощность потребляемая механизмом остаётся постоянной. В эту группу относят некоторые токарные, расточные, фрезерные станки, моталки в металлургическом производстве.

Существуют механизмы и с промежуточными характеристиками.

Механической характеристикой электродвигателя называют зависимость его угловой скорости от вращающего момента  $\omega = f(M)$ . Наиболее распространённые виды характеристик двигателей представлены на рис. 2.8, б.

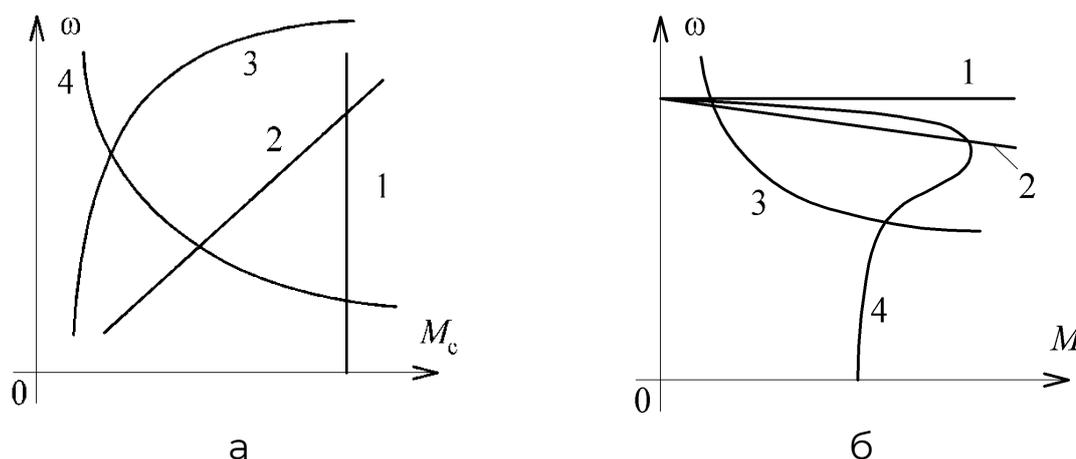


Рис. 2.8. Механические характеристики производственных механизмов (а) и электродвигателей (б)

Механическая характеристика характеризуется жесткостью. Под жесткостью понимают отношение приращения момента к приращению скорости, которое было вызвано приращением момента. Жесткость механической характеристики показывает, как (насколько) изменяется скорость двигателя (механизма) при изменении момента на валу двигателя (статического момента). В общем случае жесткость  $\beta$  вычисляется по формуле

$$\beta = \partial M / \partial \omega.$$

Для линейных механических характеристик производные могут быть заменены приращениями

$$\beta = (M_2 - M_1) / (\omega_2 - \omega_1) = \Delta M / \Delta \omega.$$

Механические характеристики двигателей в зависимости от жесткости могут быть разделены на следующие категории:

1. Абсолютно жесткая механическая характеристика ( $\beta = \infty$ ) – скорость при изменении момента остаётся неизменной.

Такой характеристикой обладают синхронные двигатели (прямая 1 на рис. 2.8, б).

2. Жесткая механическая характеристика. Скорость двигателя уменьшается не значительно при изменении момента. Такой характеристикой обладают двигатели постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ с НВ). И асинхронные двигатели (АД) в пределах рабочей характеристики (прямая 2 и кривая 3 на рис. 2.8, б).

3. Мягкая механическая характеристика – при изменении момента значительно меняется скорость (кривая 3 на рис. 2.8, б). Такой характеристикой обладают ДПТ с последовательным возбуждением, особенно в зоне малых моментов.

4. Абсолютно мягкая механическая характеристика ( $\beta=0$ ) – такая характеристика, при которой момент двигателя при изменении скорости остаётся неизменным. Такими характеристиками обладают замкнутые САР тока при работе в режиме ограничения тока якоря.

Асинхронный двигатель обладает механической характеристикой с переменной жесткостью.

## 2.4. Уравнение движения электропривода

Когда момент производственного механизма и момент двигателя совпадают, а двигатель работает на устойчивом участке механической характеристики с постоянной скоростью, имеет место *установившийся* режим работы электропривода. Однако во время работы параметры механизма могут меняться (момент инерции, момент сопротивления, изменение управляющих либо возмущающих воздействий). В этих случаях возникает режим перехода от одного установившегося состояния в другое. Такой режим называют *переходным*.

Уравнение равновесия моментов для вращательного движения

$$M - M_c = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.2)$$

где  $J_\Sigma$  – суммарный момент инерции,  $\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon$  – ускорение привода.

Уравнение (1.2) часто называют **основным уравнением движения привода**. Уравнение показывает, что развиваемый двигателем вращающий момент  $M$  уравнивается моментом сопротивления  $M_c$  на его валу и динамическим моментом  $J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}$ .

Разницу между моментом двигателя и статическим моментом называют динамическим моментом

$$M_{\text{дин}} = M - M_c.$$

Из анализа основного уравнения движения можно сделать следующие выводы:

- 1) при  $M > M_c$  имеет место ускорение привода –  $d\omega/dt > 0$ ;
- 2) при  $M < M_c$  имеет место замедление привода –  $d\omega/dt < 0$ ;
- 3) при равенстве моментов двигателя и сопротивления  $M = M_c$  привод работает в установившемся режиме работы  $d\omega/dt = 0$ .

Динамический момент появляется только во время переходных режимов, когда изменяется скорость привода. При ускорении этот момент направлен против движения, а при торможении поддерживает движение.

С энергетической точки зрения режимы работы электропривода разделяются на двигательные и тормозные, отличающиеся направлением потока энергии через

механические передачи привода. Двигательный режим обычно соответствует прямому направлению, тормозной – обратному. Характерным признаком двигательного режима является совпадение знаков скорости и момента двигателя; в тормозном режиме их знаки не совпадают.

В установившемся режиме работы имеет место *статическая устойчивость привода*, то есть такое состояние установившегося режима работы привода, при котором случайно возникающие отклонения скорости от установившегося значения привод возвратится в точку установившегося режима. При неустойчивом движении любое отклонение от установившейся скорости приведет к изменению состояния привода – возникнет переходный режим.

Привод статически устойчив, если в точке установившегося режима выполняется условие

$$\partial M / \partial \omega - \partial M_c / \partial \omega < 0$$

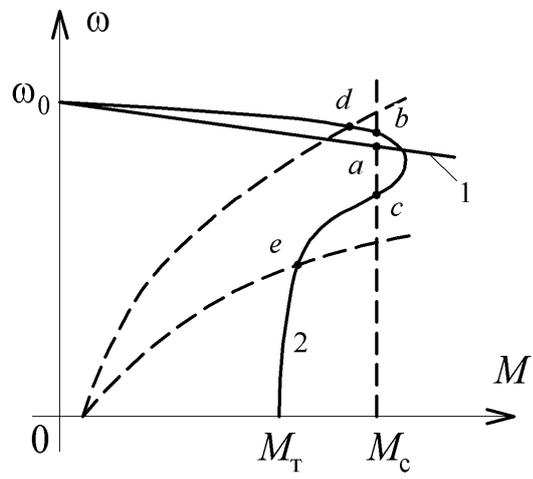
или

$$\beta - \beta_c < 0.$$

Итак, если привод статически устойчив, то при положительном приращении угловой скорости момент двигателя окажется меньше статического момента и привод вследствие этого затормозится до прежнего значения скорости. При отрицательном приращении скорости момент двигателя будет больше момента сопротивления, и привод разгонится до прежнего значения скорости.

При постоянном моменте нагрузки статическая устойчивость будет определяться только жесткостью механической характеристики двигателя, так как  $\partial M_c / \partial \omega = 0$ . Если она отрицательна, то работа в установившемся режиме устойчива (точка *a* на рис. 2.9)  $\partial M / \partial \omega - \partial M_c / \partial \omega = \partial M / \partial \omega < 0$ .

Если использовать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и нагрузить его постоянным моментом, то в точке *b* будет иметь место установившийся режим работы, так как  $\partial M / \partial \omega - \partial M_c / \partial \omega = -\beta - 0 < 0$ , а в точке *c* режим не устойчивый, так как жесткость механической характеристики двигателя положительна. При работе АД с КЗР на механизм с вентиляторной характеристикой устойчивый режим будет наблюдаться в точках *d* и *e*.



2.9. К определению статической устойчивости привода

## 2.5. Время ускорения и замедления привода

Время переходных режимов привода: пуска, торможения, перехода от одной скорости к другой влияет на производительность механизма. Определение времени переходных процессов основано на интегрировании уравнения движения привода. Разделяя переменные, получим:

$$dt = Jd\omega / (M - M_c).$$

Время переходного режима при изменении скорости от  $\omega_1$  до  $\omega_2$

$$t_{12} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J}{(M - M_c)} d\omega.$$

Если принять, что  $M, M_c, J = const$ , результатом решения интеграла будет

$$t_{12} = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{(M - M_c)}.$$

Рассчитаем время пуска привода от состояния покоя ( $\omega_1 = \omega_{нач} = 0$ ) до номинальной скорости  $\omega_{ном}$  с пусковым моментом  $M_{п}$  при наличии на валу двигателя момента сопротивления  $M_c$  (см. рис. 2.10)

$$t_{п} = J \frac{\omega_{ном} - 0}{(M_{п} - M_c)}.$$

Если требуется точно рассчитать время переходного процесса для привода с асинхронным двигателем ( $M_{п} \neq const$ ), то следует использовать формулы в интегралах.

Теоретически, полное время переходного процесса равно бесконечности. Поэтому в практических расчетах обычно считают, что процесс разбега заканчивается при скорости, равной не  $\omega_2$ , а  $\omega = 0,95\omega_2$ , тогда время процесса получается конечное.

В тех случаях, когда динамический момент имеет отрицательное значение, привод замедляется (рис. 2.11). Для этого случая уравнение движения будет иметь вид:

$$-M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Привод будет замедляться и в том случае, когда двигатель будет развивать момент, меньший статического, по абсолютному значению.

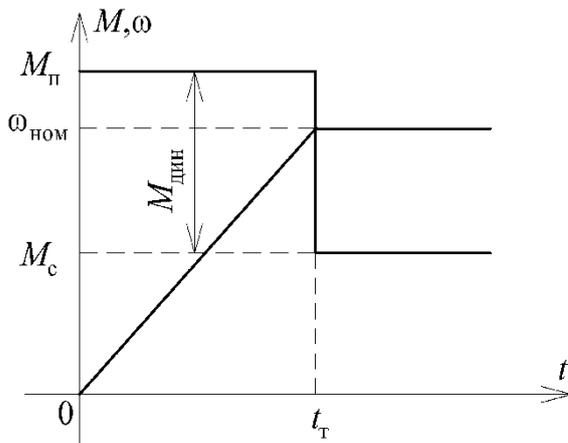


Рис. 2.10. Пусковой график привода

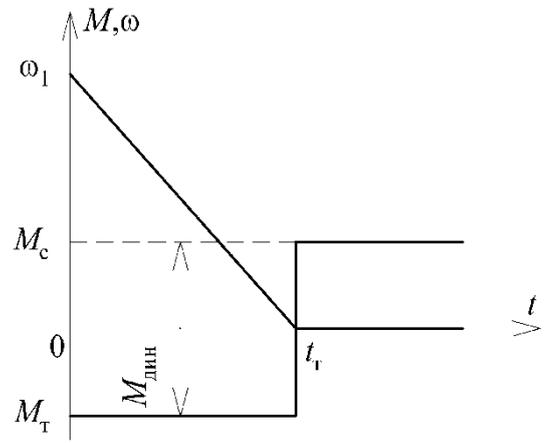


Рис. 2.11. Тормозной график привода

Время торможения привода

$$t_{\tau} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J d\omega}{-(M + M_c)} = \int_{\omega_2}^{\omega_1} \frac{J d\omega}{M + M_c}.$$

Для частного случая, при  $M, M_c, J = const$ ,

$$t_{\tau} = J \frac{\omega_1 - \omega_2}{M + M_c}.$$

Можно также посчитать оптимальное значение передаточного числа ПМ  $i_{\text{опт}}$  при заданных значениях моментов инерции двигателя и механизма  $J_d$  и  $J_c$ , а также момента сопротивления  $M_c$ .

Уравнение движения привода относительно рабочего вала механизма

$$iM - M_c = (J_c + kJ_d i^2) \frac{d\omega_c}{dt},$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий момент инерции передач.

Очевидно, что минимальное время будет при максимальном ускорении привода

$$\varepsilon = \frac{d\omega_c}{dt} = \frac{iM - M_c}{J_c + kJ_d i^2}.$$

Для нахождения оптимального передаточного числа найдем точку максимума функции  $\varepsilon = f(i)$ .

$$\frac{d\varepsilon}{di} = \frac{d}{di} \left( \frac{iM - M_c}{J_c + kJ_d i^2} \right) = 0, \quad \frac{d\varepsilon}{di} = \frac{-(kJ_d M i^2 - 2kJ_d M_c i - J_c M)}{J_c + kJ_d i^2} = 0.$$

Решая уравнение

$$-(kJ_d M i^2 - 2kJ_d M_c i - J_c M) = 0,$$

получаем передаточное число ПМ

$$i_{1,2} = \frac{M_c}{M} \pm \sqrt{\left(\frac{M_c}{M}\right)^2 + \frac{J_c}{kJ_d}}.$$

Второе решение уравнения (со знаком минус перед вторым слагаемым) дает при всех соотношениях  $i$  отрицательные значения.



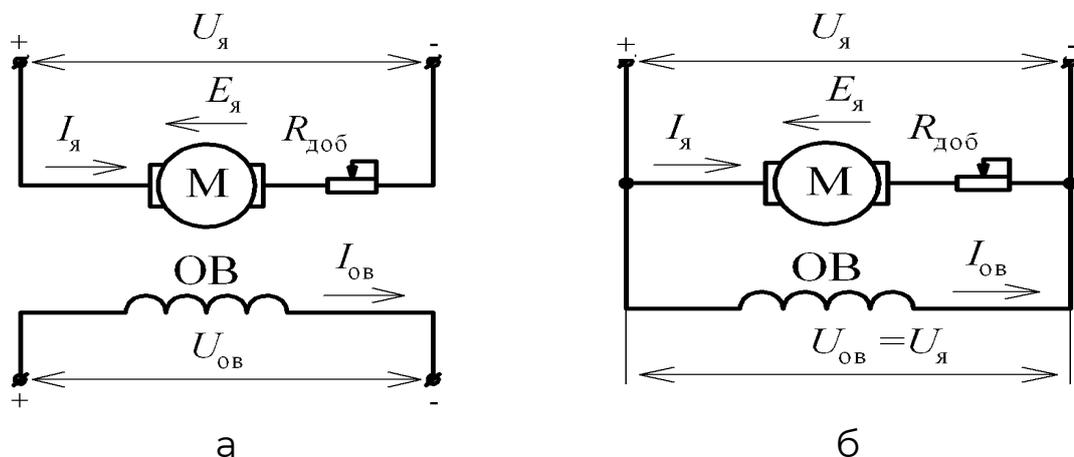
### 3. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

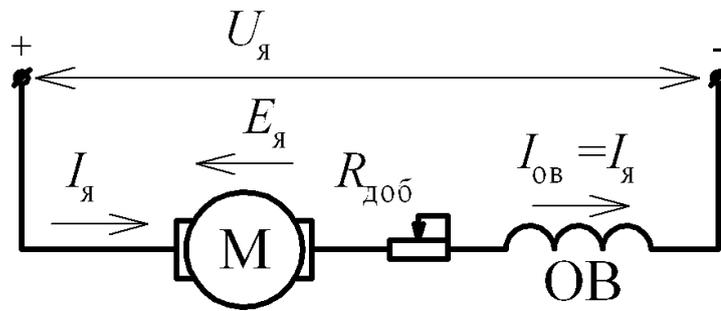
#### 3.1. Классификация электродвигателей постоянного тока (ЭПТ) по способу возбуждения

ДПТ конструктивно состоит из двух основных частей: подвижной части (якоря) и неподвижной части (статора), в которой находится обмотка возбуждения двигателя. Двигатель питается постоянным напряжением. В зависимости от способа включения обмотки возбуждения различают 4 основных типа электродвигателей.

1. ДПТ с независимым возбуждением (рис. 3.1, а). В данном случае источники питания цепи якоря двигателя и цепи обмотки возбуждения (ОВ) являются разными, иногда с разным уровнем напряжения. В связи с этим поведение тока возбуждения не зависит от цепи якоря (при пренебрежении влиянием реакции якоря), что при неизменности тока возбуждения делает характеристики двигателя линейными.

2. При параллельном способе включения обмотки возбуждения и якоря включают в одну сеть параллельно друг другу (рис. 3.1, б). При условии наличия сети бесконечной мощности напряжение на зажимах обмоток остаётся постоянным и характеристики ДПТ с ПВ аналогичны характеристикам ДПТ с НВ. Поэтому часто ограничиваются рассмотрением ДПТ с независимым возбуждением.





в

Рис. 3.1. Схемы включения двигателя с независимым (а), параллельным (б) и последовательным (в) возбуждением

3. У ДПТ с последовательным возбуждением имеется последовательная (сериесная) обмотка, которая включается последовательно с обмоткой якоря двигателя (рис. 3.1, в). Такое включение приводит к тому, что поток, создаваемый ОВ, зависит от тока двигателя, который в процессе работы и переходных процессов подвергается значительным изменениям. Данный тип двигателя обладает нелинейной механической характеристикой.

4. ДПТ со смешанным возбуждением. В этом случае двигатель имеет две обмотки возбуждения: последовательную и параллельную, и результирующий магнитный поток складывается из двух составляющих. Подключение цепи якоря выполняется так же, как на рис. 3.1, в, а обмотки возбуждения, как на рис. 3.1, а, б.

### 3.2. Механическая и электромеханическая характеристики ДПТ с НВ

Найдем формулу механической характеристики двигателя. Согласно второму закону Кирхгофа для цепи якоря получаем:

$$U_{\text{я}} = I_{\text{я}} R_{\text{я}\Sigma} + E_{\text{я}} + L_{\text{я}\Sigma} \frac{dI_{\text{я}}}{dt},$$

где  $R_{\text{я}\Sigma}$  – суммарное сопротивление якорной цепи,  $L_{\text{я}\Sigma}$  – суммарная индуктивность якорной цепи.

Подставив в уравнение соотношения для ЭДС и момента двигателя  $E = k\Phi\omega$  и  $M = k\Phi I_{\text{я}}$ , получим

$$U_{\text{я}} = \frac{M R_{\text{я}\Sigma}}{k\Phi} + k\Phi\omega + \frac{L_{\text{я}\Sigma}}{k\Phi} \frac{dM}{dt},$$

где  $k$  – конструктивный коэффициент двигателя, определяемый по формуле

$$k = pN / (2\pi a),$$

где  $p$  – число пар полюсов двигателя;  $N$  – число активных проводников в обмотке якоря,  $a$  – число пар параллельных ветвей в обмотке якоря.

Оставив в левой части скорость двигателя, получим общее выражения для механической характеристики ДПТ с НВ

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{M R_{\text{я}\Sigma}}{(k\Phi)^2} + \frac{L_{\text{я}\Sigma}}{(k\Phi)^2} \frac{dM}{dt}.$$

Если момент двигателя постоянный, то  $dM / dt = dI_{\text{я}} / dt = 0$ , и уравнение механической характеристики двигателя будет иметь следующий вид:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{M R_{\text{я}\Sigma}}{(k\Phi)^2}. \quad (3.1)$$

Или в другом виде

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega,$$

где  $\omega_0 = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi}$  – скорость идеального холостого хода.

Вид характеристики показан на рис. 3.2, а.

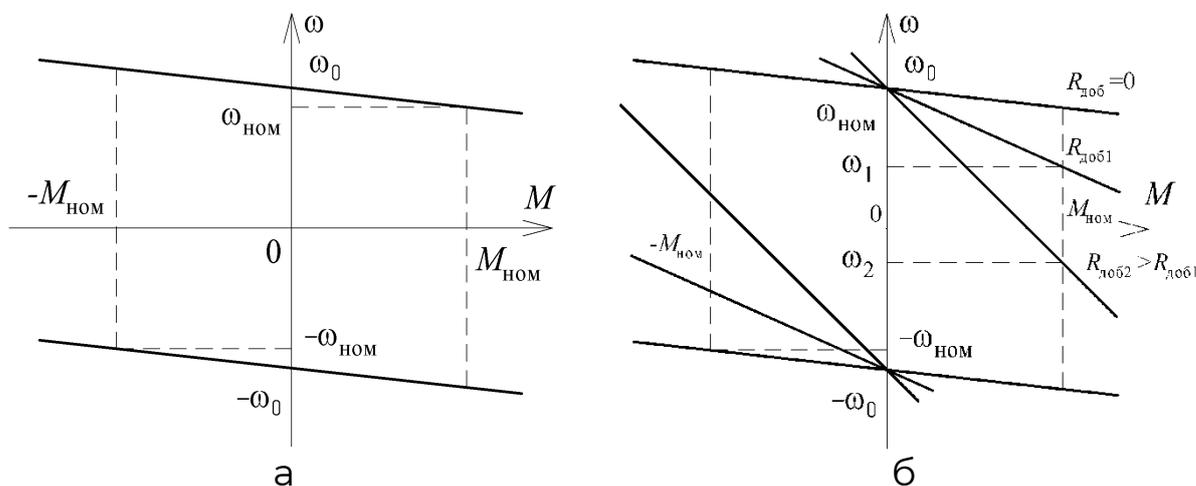


Рис. 3.2. Естественные (а) и искусственные (б) механические характеристики ДПТ с НВ

Электромеханическую механическую характеристику можно получить, подставив в механическую характеристику двигателя (3.1) выражение для момента  $M = k\Phi I$ :

$$\omega = \frac{U_{я} - IR_{я\Sigma}}{k\Phi}.$$

Рассматривая уравнение, можно заключить, что обе механические характеристики при постоянном потоке линейны. Положение каждой характеристики может быть охарактеризовано двумя точками: точкой идеального холостого хода ( $I_{я} = M = 0$ ;  $\omega = \omega_0$ ) и точкой короткого замыкания ( $I_{я} = I_{к.з.}$ ;  $M = M_{к.з.}$ ;  $\omega = 0$ ).

Найдем модуль статической жесткости характеристики, для чего решим уравнение механической характеристики относительно момента:

$$M = \frac{k\Phi U_{я}}{R_{я\Sigma}} - \frac{(k\Phi)^2 \omega}{R_{я\Sigma}}.$$

Тогда

$$\beta_{ст} = \frac{dM}{d\omega} = -\frac{(k\Phi)^2}{R_{я\Sigma}}.$$

С учетом статической жесткости уравнение механической характеристики можно записать следующим образом:

$$M = \beta(\omega_0 - \omega).$$

### 3.2.1. Построение механической характеристики ДПТ с НВ

Для построения МХ двигателя НВ достаточно знать лишь две точки, так как МХ представляют собой прямые линии. Эти две точки могут быть любыми, однако построение

характеристики удобно производить по точкам, одна из которых соответствует номинальному электромагнитному моменту двигателя и номинальной скорости ( $M = M_{\text{НОМ}}; \omega = \omega_{\text{НОМ}}$ ), а другая – скорости идеального холостого хода ( $M = 0; \omega = \omega_0$ ). Номинальная скорость двигателя определяется по паспортным данным

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{2\pi n_{\text{НОМ}}}{60}.$$

Номинальный момент вычисляется по формуле

$$M_{\text{НОМ}} = k\Phi I_{\text{НОМ}}.$$

Коэффициент  $k\Phi$  можно найти следующим образом:

$$k\Phi = \frac{(U_{\text{НОМ}} - I_{\text{НОМ}} R_{\Sigma})}{\omega_{\text{НОМ}}}.$$

В случае, когда сопротивление якоря не известно, его можно приближенно вычислить, приняв, что половина всех потерь в двигателе при номинальной нагрузке связана с потерями в меди якоря, поэтому

$$I_{\text{НОМ}}^2 R_{\text{я}} = 0,5(1 - \eta_{\text{НОМ}}) U_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}},$$

откуда

$$R_{\text{я}} = 0,5(1 - \eta_{\text{НОМ}}) U_{\text{НОМ}} / I_{\text{НОМ}}.$$

Скорость идеального холостого хода

$$\omega_{0\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{k\Phi}.$$

### 3.3. Понятие естественной и искусственной механических характеристик. Влияние параметров на вид механической характеристики ДПТ с НВ

Если характеристика получена при номинальных параметрах двигателя ( $R_{\text{доб}} = 0; U_{\text{я}} = U_{\text{ном.я}}; \Phi = \Phi_{\text{ном}}$ ), то такую характеристику называют *естественной*. Естественная механическая характеристика показана на рис 3.2, а. Она определяет его рабочую скорость и показывает, как она изменяется при изменениях нагрузки в статических режимах работы.

Уравнение естественной МХ двигателя

$$\omega_e = \frac{U_{\text{я.ном}}}{k\Phi_{\text{ном}}} - \frac{MR_{\text{я}}}{(k\Phi_{\text{ном}})^2}.$$

*Искусственные* механические характеристики получают в тех случаях, когда характеристика строится не для номинального режима работы. На рис. 3.2, б показаны искусственные механические характеристики при  $R_{\text{я.доб}} \neq 0$ . Такие характеристики называют реостатными. При возрастании сопротивления в якорной цепи жесткость механических характеристик уменьшается.

Реостатные МХ можно получить по формуле

$$\omega = \frac{U_{\text{я.ном}}}{k\Phi_{\text{ном}}} - \frac{M(R_{\text{я}} + R_{\text{доб}})}{(k\Phi_{\text{ном}})^2}.$$

Соответственно, добавочное сопротивление ограничивает ток (момент) короткого замыкания

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{U_{\text{ном}}}{(R_{\text{я}} + R_{\text{доб}})}.$$

Скорость идеального холостого хода  $\omega_0$  остаётся неизменным, так как она не зависит от сопротивления в цепи якоря.

Кроме изменения сопротивления в якорной цепи возможно также изменение магнитного потока двигателя и напряжения на якоре двигателя.

Изменение магнитного потока двигателя  $\Phi$  возможно только в сторону уменьшения ( $R_{\text{доб}} = 0; U_{\text{я}} = U_{\text{ном.я}}; \Phi = \text{var}$ ). Увеличение магнитного потока связано со значительным возрастанием тока возбуждения двигателя, что приведет к перегреву двигателя.

При изменении магнитного потока уменьшается момент короткого замыкания

$$M_{к.з.} = \frac{k\Phi U_{ном}}{R_{я}},$$

и возрастает скорость идеального холостого хода двигателя

$$\omega_0 = \frac{U_{я.ном}}{k\Phi}.$$

Механические характеристики для этого случая показаны на рис. 3.3, а.

Изменение напряжения на якоре двигателя возможно в сторону уменьшения от номинального вниз. При этом величина падения скорости  $\Delta\omega$  не изменяется

$$\Delta\omega = -\frac{M(R_{я} + R_{доб})}{(k\Phi_{ном})^2},$$

а величина скорости идеального холостого хода уменьшается пропорционально

$$\omega_0 = \frac{U_{я}}{k\Phi_{ном}}.$$

Механические характеристики для этого случая показаны на рис. 3.3, б.

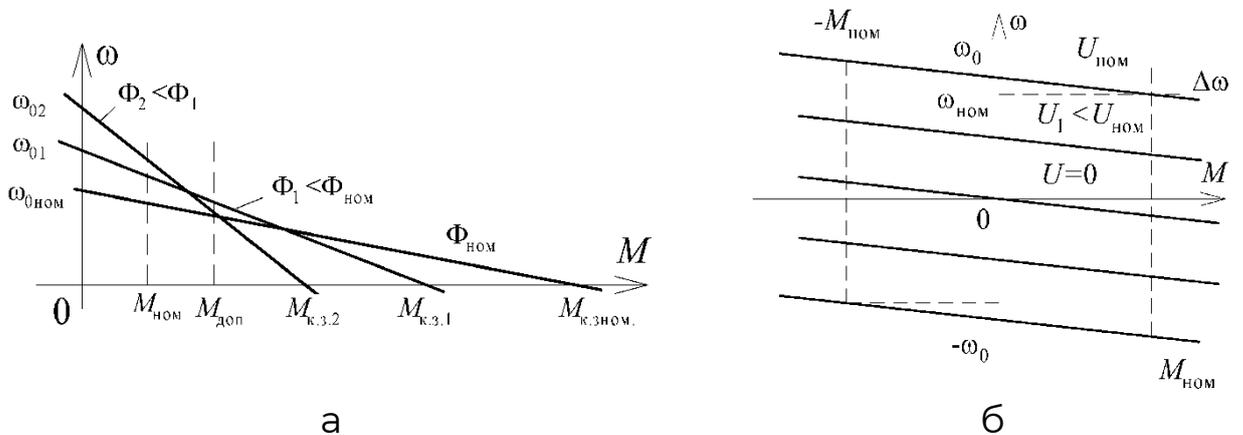


Рис. 3.3. Искусственные МХ при  $\Phi = var$  (а) и  $U = var$  (б)

### 3.4. Особенности пуска двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

При включении в сеть ДПТ в начальный момент якорь неподвижен, а, следовательно,  $E_{\text{я}} = 0$ . В этих условиях ток якоря (пусковой ток) ограничивается только электрическим сопротивлением обмоток и щеточных контактов в цепи якоря

$$I_{\text{яп}} = U / R_{\text{я}}. \quad (3.2)$$

Так как величина сопротивления якоря мала, пусковой ток двигателя может в 10-40 раз превышать номинальный ток двигателя. Такое превышение начального пускового тока недопустимо, так как ведет к перегреву обмоток, появлению слишком большого пускового момента, который оказывает на якорь и подвижную часть электропривода ударное воздействие, что может привести к механическому повреждению движущихся частей электропривода. При больших значениях тока нарушаются нормальные условия коммутации, что может привести к повреждению коллектора.

Уменьшение пускового тока, как видно из (3.2), возможно двумя способами: снижением напряжения питающей сети или повышением сопротивления якорной цепи.

При введении в цепь якоря внешнего сопротивления начальный пусковой ток будет определяться выражением

$$I_{\text{яп}} = U / (R_{\text{я}} + R_{\text{доб}}).$$

Таким образом, можно подобрать сопротивление резистора, при котором начальный пусковой ток  $I_{\text{яп}}$  не превысит допустимого значения, который обычно составляет два номинальных значения  $I_{\text{доп}} = 2I_{\text{ном}}$ . Выбранное сопротивление, правда, удовлетворит только началу пуска, так как в обмотке якоря начнет индуцироваться ЭДС двигателя при вращении, величина которой пропорциональна скорости вращения.

Чтобы поддерживать пусковой ток, а, следовательно, и пусковой момент на прежнем уровне, необходимо уменьшить сопротивление резистора. С этой целью в цепь якоря включают резистор переменного сопротивления, называемый *пусковым реостатом* со ступенчатой регулировкой сопротивления. В настоящее время ручной пуск применяется для управления крановыми двигателями, с целью создания пониженных скоростей подъема или спуска. На других механизмах, в основном, применяется автоматизированный пуск посредством контакторов, которые в процессе пуска

шунтируют элементы пускового реостата при переключении его ступеней.

Рассмотрим процесс пуска двигателя с применением пускового реостата на три ступени ( $Z=3$ ). Контроль пуска обычно выполняется в функции тока. Ток, соответствующий моменту  $M_1$  называют *током переключения*. Значения пусковых токов обычно принимают (в зависимости от механизма и применяемого двигателя) равными:

$$I_{II} = (1,3 \div 2,5)I_{НОМ}; \quad I_1 = (1,0 \div 1,3)I_{НОМ}.$$

Для двигателей краново-металлургической серии значение пусковых токов может быть увеличено. Расчет пусковых ступеней может быть выполнен графически и аналитически.

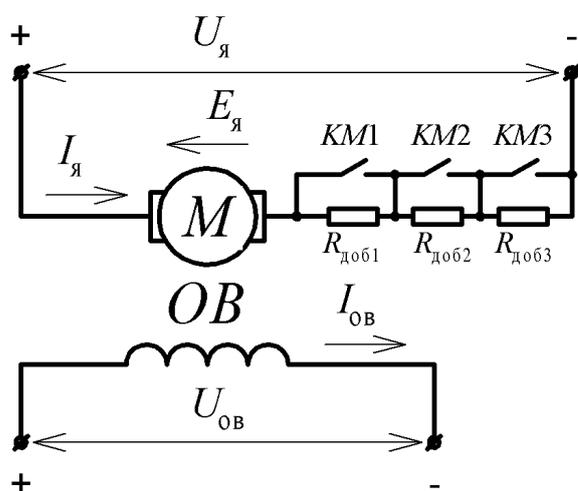


Рис. 3.4. Схема включения пусковых сопротивлений

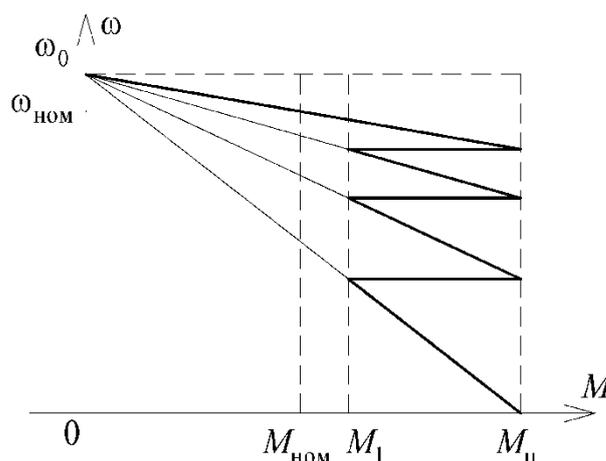


Рис. 3.5. Пусковая диаграмма ДПТ с НВ

В относительных единицах, значения сопротивления ступеней можно рассчитать по отрезкам:

$$R_1^* = de / ae, \text{ отсюда } R_1 = R_1^* R_{НОМ};$$

$$R_2^* = cd / ae, \text{ отсюда } R_2 = R_2^* R_{НОМ};$$

$$R_3^* = bc / ae, \text{ отсюда } R_3 = R_3^* R_{НОМ},$$

где номинальное сопротивление двигателя

$$R_{НОМ} = U_{НОМ} / I_{яНОМ}.$$

Суммарное сопротивление реостата

$$R_{пр} = R_1 + R_2 + R_3.$$

*Аналитический метод*

При расчете форсированного режима пуска обычно величину пускового тока принимают близкой или равной предельно-допустимому по паспортным данным, то есть

$$I_{\text{п}} = \lambda_i I_{\text{НОМ}}.$$

В этом случае задаются числом ступеней пускового реостата  $Z$  и рассчитывают величину  $\lambda$ , определяющую рациональное соотношение между токами  $I_{\text{п}}$  и  $I_1$ :

$$\lambda_1 = \sqrt[Z]{U_{\text{НОМ}} / (I_{\text{п}} R_{\text{я}})}.$$

Затем рассчитывают значение тока переключений

$$I_1 = I_{\text{п}} / \lambda.$$

Если режим пуска нормальный, то задаются величиной тока переключений, а соотношение  $\lambda$  рассчитывают из соотношения

$$\lambda_1 = \sqrt[Z+1]{U_{\text{НОМ}} / (I_1 R_{\text{я}})}.$$

После этого определяют начальный пусковой ток

$$I_{\text{п}} = I_1 / \lambda.$$

Расчет сопротивлений ступеней выполняют по формулам:

$$R_3 = R_{\text{я}}(\lambda - 1); R_2 = R_3 \lambda; R_1 = R_2 \lambda.$$

Пример расчёта приведён в [4, с.55].

### **3.5. Тормозные режимы двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Механические характеристики ДПТ с НВ в тормозных режимах**

Кроме двигательных режимов электродвигатели также могут работать в тормозных режимах. Тормозной режим характеризуется тем, что скорость вращения и момент двигателя имеют разные знаки. Быстрота и точность, с какой будут протекать переходные процессы остановки или реверса во многом определяют производительность механизма, а иногда и качество вырабатываемого продукта. Возможны три варианта электрического торможения:

- 1) рекуперативное торможение;
- 2) динамическое торможение;
- 3) торможение противовключением.

Каждый тормозной режим является генераторным, так как энергия поступает в машину с вала, преобразуется в электрическую и либо отдаётся в сеть, либо затрачивается на нагрев элементов якорной цепи, обладающих активным сопротивлением, и рассеивается в окружающую среду.

#### *3.5.1. Рекуперативное торможение*

Такой режим возникает, когда скорость двигателя больше скорости идеального холостого хода двигателя, то есть выполняется условие

$$\omega > \omega_0.$$

При этом ЭДС двигателя становится больше напряжения сети ( $E_a > U_c$ ), и ток двигателя меняет направление. При этом двигатель работает генератором и отдаёт энергию в сеть. Электромагнитный момент двигателя при этом противодействует внешнему вращающему моменту.

Данный вид торможения является наиболее экономичным, так как энергия возвращается в сеть. Применение этого способа является эффективным энергосберегающим средством. Этот режим целесообразен, когда привод работает с частыми пусками и остановками. Например, электротранспорт. При движении под уклон также возникают благоприятные условия для возникновения этого режима торможения.

Схема включения двигателя для данного режима показана на рис. 3.6, а, а характеристики представлены на рис. 3.7 (характеристика 1).

### 3.5.2. Динамическое торможение

Необходимость в таком торможении возникает, когда после отключения двигателя от сети его якорь продолжает вращаться под действием запаса кинетической энергии. Если по технологии требуется более быстрый останов двигателя, чем время остановки на выбеге, используется динамическое торможение.

При данном способе торможения якорь двигателя замыкается на тормозное сопротивление, а обмотка возбуждения остаётся подключенной в сеть для создания тормозного момента. Вырабатываемая при этом энергия переходит в тепловую и рассеивается в окружающее пространство. В этом режиме ток двигателя меняет знак, так как он начинает протекать под действием ЭДС двигателя, которая направлена всегда встречно напряжению сети

$$I_{\text{я}} = (U_{\text{я}} - E_{\text{я}}) / R_{\Sigma} = -E_{\text{я}} / (R_{\text{я}} + R_{\text{д.т.}}).$$

Величину тормозного сопротивления можно определить из формулы

$$R_{\text{д.т.}} = \frac{\omega_{\text{т.нач}}}{(1,1 \div 1,8)M_{\text{ном}}} - R_{\text{я}}.$$

При этом слишком малое значение тормозного момента ведет к затягивания процесса торможения, а слишком большой ток отрицательно сказывается на работе щеточно-коллекторного аппарата двигателя.

Схема включения двигателя для данного режима показана на рис. 3.6, б, а характеристики на рис. 3.7 (характеристика 2).

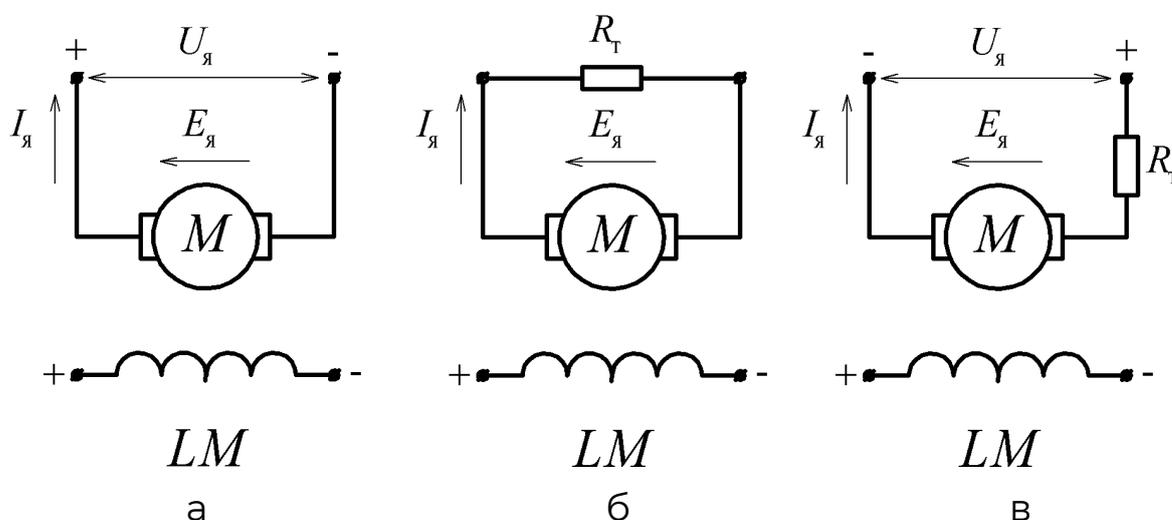


Рис. 3.6. Схемы включения двигателя в тормозных режимах работы

(а-рекуперативное, б-динамическое, в-противовключение)

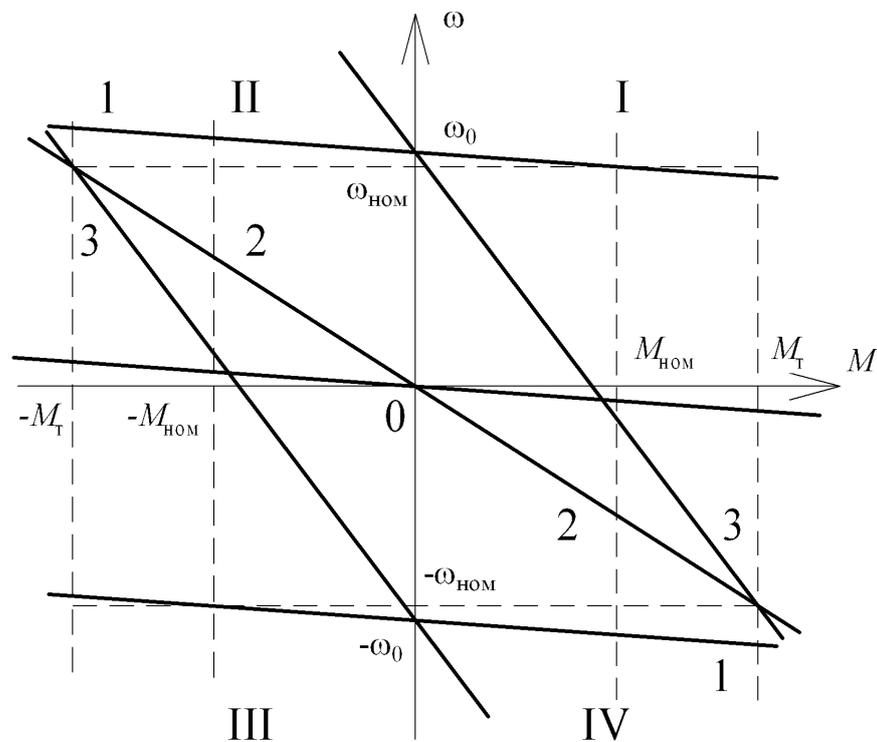


Рис. 3.7. Механические характеристики ДПТ с НВ в тормозных режимах

### 3.5.3. Торможение противовключением

Для уменьшения времени торможения или реверса иногда применяют данный режим. Реализация этого режима возможна на работающем двигателе при смене полярности питающего напряжения. В этом случае направления ЭДС двигателя и напряжения сети совпадает

$$I_{\text{я}} = (-U_{\text{я}} - E_{\text{я}}) / R_{\Sigma},$$

что без ограничения тока якоря приводит к большим величинам тока якоря, что является недопустимым.

Величина тормозного сопротивления выбирается по формуле

$$R_{\text{т.п.}} = \frac{\omega_{\text{т.нач}} + \omega_0}{(1,1 \div 1,8)M_{\text{НОМ}}} - R_{\text{я}}.$$

Торможение противовключением применяется в основном для реверса двигателя. Для точного останова двигателя данным режим не удобен, так как требуется довольно точная настройка аппаратуры для того, чтобы остановить двигатель в точке нулевой скорости. Если же двигатель не отключить от сети, то он перейдет в двигательный режим, и в дальнейшем разгонится до номинальной скорости при наличии номинального момента на валу двигателя. Для

точной остановки двигателя используется режим динамического торможения.

Схема включения двигателя для данного режима показана на рис. 3.6, в, а характеристики на рис. 3.7 (характеристика 3).

## **4. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

### **4.1. Асинхронный и синхронный электродвигатели.**

#### **Принцип работы**

Трёхфазные асинхронные двигатели составляют основу современного электропривода. От ДПТ их отличает простота конструкции, надёжность, высокие технико-экономические показатели. В настоящее время частотные преобразователи позволили сделать регулировочные свойства АД более лучшими, чем у ДПТ с НВ.

По конструкции ротора АД разделяются на двигатели и короткозамкнутым ротором (КЗР) и двигатели с фазным ротором (ФР). Наиболее простая конструкция у АД с КЗР. Ротор такого двигателя не имеет выводов, так как его обмотка выполнена в виде короткозамкнутой клетки (беличья клетка). Его обмотка выполнена в виде ряда медных или алюминиевых стержней, расположенных по периметру сердечника ротора, замкнутые в двух сторон короткозамыкающими кольцами. Простота конструкции обеспечивает им высокую надёжность, простоту обслуживания и невысокую стоимость. Схема включения АД с КЗР представлена на рис. 4.1, а.

Фазный ротор имеет трёхфазную обмотку, выполненную по типу обмотки статора (рис. 4.1, б). Одни концы катушек соединены в нулевую точку («звезда»), а другие – подключены к контактными кольцам. На кольца наложены щетки, осуществляющие скользящий контакт с обмоткой ротора. При такой конструкции возможно подсоединение к обмотке ротора пускового или регулировочного реостата, позволяющего менять электрическое сопротивление в цепи ротора. Такие двигатели более сложны в изготовлении и эксплуатации, поэтому применяются только там, где применение АД с КЗР не обеспечит требованиям в приводе механизма.

Ротор АД отстаёт от вращающегося магнитного поля статора, которое создается обмоткой статора, то есть вращение происходит асинхронно. В этих условиях вращающееся поле статора индуцирует ЭДС в обмотке роторе, под действием которого в роторе протекает ток, который взаимодействует с вращающимся магнитным полем (ВМП), создавая вращающий момент двигателя. В рабочих режимах разница частот вращения статора и ротора не велика и составляет несколько

процентов. При рассмотрении рабочих процессов АД обычно используют понятие скольжения  $s$

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}.$$

Скорость асинхронного двигателя в рабочих режимах

$$\omega = \omega_0(1 - s),$$

где синхронная частота вращения магнитного поля  $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$ ;  $f_1$  – частота питающего напряжения  $U_1$ ;  $p$  – число пар полюсов.

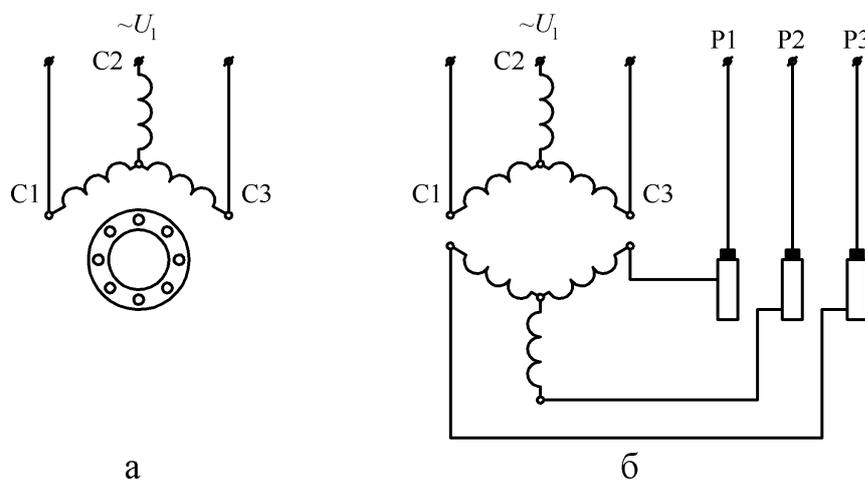


Рис. 4.1. Схема включения асинхронных двигателей с КЗР (а) и ФР (б)

Статор синхронного двигателя (СД) конструктивно не отличается от статора АД. Ротор СД имеет явнополюсную конструкцию, на полюсах которого расположена обмотка возбуждения. При включении обмотки к источнику постоянного тока в двигателе создается дополнительное магнитное поле. Таким образом, для работы синхронного двигателя кроме 3х-фазного переменного напряжения требуется также постоянное. Исключение составляют двигатели, возбуждаемые постоянными магнитами. Такие двигатели обладают абсолютно жесткой механической характеристикой: ротор двигателя вращается синхронно с вращающимся магнитным полем с частотой  $\omega_0$ .

В отличие от АД, синхронные не создают пускового момента, так как ротор двигателя по причине инерционности не может мгновенно разогнаться до синхронной скорости. Для пуска СД необходимо предварительно привести его во вращение до скорости, близкой к синхронной ( $\omega \approx 0,95\omega_0$ ). С этой целью применяют асинхронный пуск, для чего на роторе двигателя располагается пусковая обмотка, конструктивно похожая на беличью клетку.

Процесс асинхронного пуска СД протекает следующим образом (рис. 4.2).

При включении обмотки статора СД в сеть СД запускается как асинхронный. При этом обмотку возбуждения замыкают на сопротивление для ограничения величины ЭДС, которая наводится в ОВ при пуске двигателя. При достижении скорости вращения близкой к номинальной, обмотку возбуждения подключают к постоянному напряжению, и двигатель втягивается в синхронизм, то есть скорость вращения двигателя становится равной синхронной скорости.

Синхронные двигатели изготавливаются на большие мощности: от сотен до тысяч киловатт. Объясняется это тем, что при меньших мощностях их применение нецелесообразно по технико-экономическим показателям.

СД обычно имеют целевое назначение, то есть каждая серия разработана для конкретных механизмов (для шаровых мельниц - СДМЗ, для привода компрессоров - СДК, для привода насосов - ВДС и др.).

Синхронные двигатели имеют перегрузочную способность  $\lambda_M = 1,7 \div 3,0$ .

Еще одной особенностью СД является возможность работать с величиной  $\cos \varphi = 1$ , более того, при перевозбуждении синхронный двигатель начинает генерировать емкостную нагрузку. Для повышения  $\cos \varphi$  в сети используют синхронные компенсаторы, представляющие собой перевозбужденные СД специальной конструкции, работающие без нагрузки на валу.

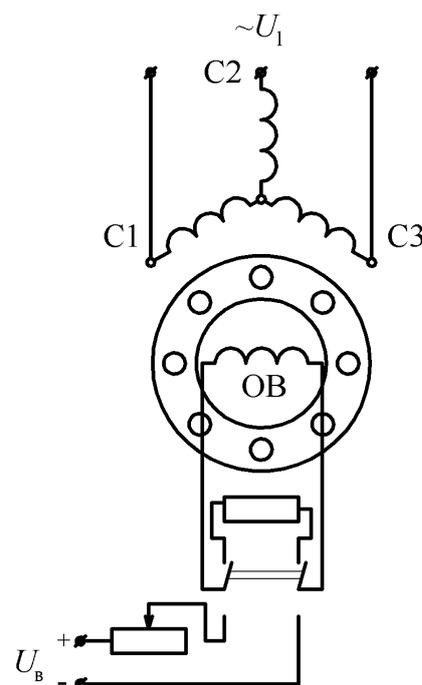


Рис. 4.2. Схема включения СД

Механические характеристики синхронного двигателя представлены на рис. 4.3 (прямая 1).

Для синхронных двигателей важное значение имеет угловая характеристика, то есть зависимость момента синхронной машины от угла  $\theta$ . Угол  $\theta$  - это угол между напряжением на статоре и ЭДС двигателя. При значениях, больших  $90$  градусов, как видно из рис. 4.4, двигатель выпадает из синхронизма, так как участок угловой характеристики при  $\theta > 90^\circ$  является неустойчивым.

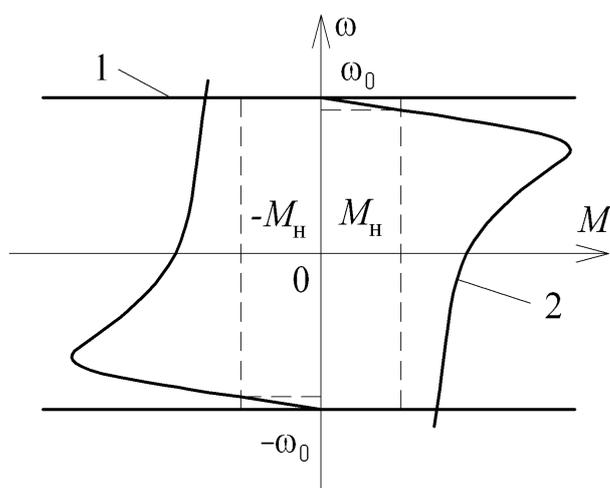


Рис. 4.3. Механические характеристики асинхронного и синхронного двигателей

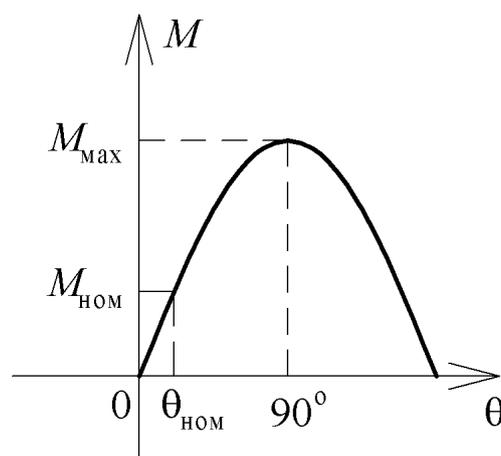


Рис. 4.4. Угловая характеристика СД

## 4.2. Механические характеристики асинхронного двигателя

Для вывода уравнения механической характеристики АД можно воспользоваться упрощенной схемой замещения двигателя, приведенной на рис. 4.5. На схеме приняты следующие обозначения:  $U_1$  - первичное фазное напряжение;  $I_1$  - фазный ток статора;  $I'_2$  - приведенный ток ротора;  $X_1$  и  $X_2$  - первичное и вторичное приведенные реактивные сопротивления рассеяния;  $R_0$  и  $X_0$  - активное и реактивное сопротивление контура намагничивания.

Уравнение механической характеристики можно получить из выражения активной электромагнитной мощности, передаваемой через воздушный зазор ротору двигателя

$$P_{12} = M\omega_0 = 3(I'_2)^2 R'_{2\Sigma} / s,$$

откуда

$$M = \frac{3(I'_2)^2 R'_{2\Sigma}}{\omega_0 s}. \quad (4.1)$$

Выражение для приведенного тока ротора  $I'_2$  можно найти из схемы замещения по первому закону Кирхгофа

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2 / s)^2 + (X_k)^2}}, \quad (4.2)$$

где  $X_k = X_1 + X'_2$  - индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Тогда, подставляя (4.2) в уравнение для момента (4.1), получим

$$M = \frac{3U_1^2 R'_{2\Sigma}}{\omega_0 s [(R_1 + R'_2 / s)^2 + (X_k)^2]}. \quad (4.3)$$

Анализ формулы (4.3) показывает, что она имеет точки экстремума; критическое скольжение, соответствующее экстремуму, может быть определено путем дифференцирования по  $s$  и последующего приравнения нулю этой производной:

$$s_k = \pm \frac{R'_{2\Sigma}}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}.$$

Подставив формулу для критического скольжения в (6), можно найти выражение для критического момента

$$M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 [R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_k^2}]}.$$

После преобразований выражение для момента (6) можно записать в форме уточнённой формулы Клосса:

$$M = \frac{2M_k(1+as_k)}{s/s_k + s_k/s + 2as_k}, \quad (4.4)$$

где  $a = R_1 / R'_{2\Sigma}$ .

Вид механической характеристики показан на рис. 4.6.

Анализ формулы (4.4) показывает, что при  $s \ll s_k$  механическая характеристика близка к линейной зависимости  $M \approx 2M_k s / s_k$ , а в области больших скольжений ( $s \gg s_k$ ) имеет гиперболический характер:  $M \approx 2M_k s_k / s$ . При  $s = s_k$  момент принимает максимальное значение, причем в двигательном режиме соответствующее значение критического момента меньше, чем в генераторном.

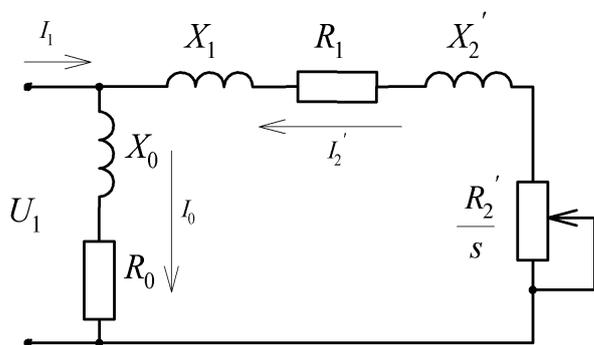


Рис. 4.5. Г-образная схема замещения АД

Характерные точки МХ АД:

- 1)  $s = 0; M = 0$ , при этом скорость двигателя равна синхронной скорости;
- 2)  $s = s_n; M = M_n$ , что соответствует номинальному режиму работы двигателя;
- 3)  $s = s_k; M = M_{к.д}$  - экстремум механической характеристики в двигательном режиме;
- 4)  $s = 1; M = M_n$  - пуск. В этот момент времени двигатель развивает пусковой момент;
- 5)  $s = -s_k; M = -M_{к.г}$  - экстремум механической характеристики в генераторном режиме.

При  $s > 1$  двигатель работает в режиме торможения противовключением, при  $s < 0$  имеет место генераторный режим работы параллельно с сетью.

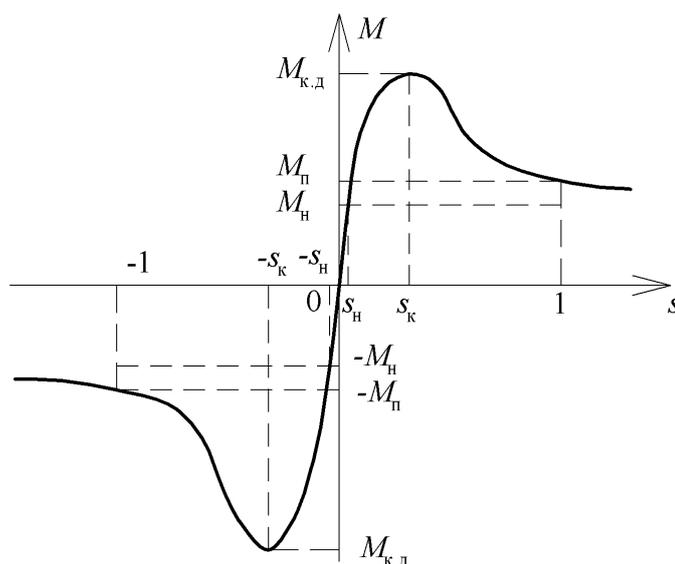


Рис. 4.6. Механическая характеристика АД

### 4.3. Влияние параметров на вид механической характеристики асинхронного двигателя. Искусственные механические характеристики

Из выражения частоты вращения асинхронного двигателя

$$\omega = 2\pi f_1(1-s)/p$$

следует, что при постоянном статическом нагрузочном моменте  $M_c$  на валу двигателя частота вращения ротора зависит от частоты питающей сети  $f_1$ , числа пар полюсов  $p$  и величины скольжения  $s$ . Кроме того в номинальных режимах работы величина ЭДС двигателя слабо отличается от величины питающего напряжения, поэтому

$$U_1 \cong E_1 = 4.44 f_1 w_1 \Phi_0. \quad (4.5)$$

#### 4.3.1. Изменение сопротивления ротора

Данный способ регулирования скорости возможен только для двигателей с фазным ротором, где имеется возможность изменения величины добавочного сопротивления ротора  $R'_{2\text{доб}}$ . При этом, как следует из выражений для критического момента и скольжения, при вариациях данного параметра будет изменяться величина скольжения, а величина критического момента остаётся неизменной. Данный способ регулирования скорости называют *реостатным*. Вид искусственных характеристик показан на рис. 4.7, а.

Величина критического момента при изменении сопротивления ротора остаётся неизменной, а величина критического скольжения изменяется.

При данном способе регулирования увеличивается значение пускового момента, двигатель не перегревается, однако суммарные потери возрастают, что снижает общий КПД.

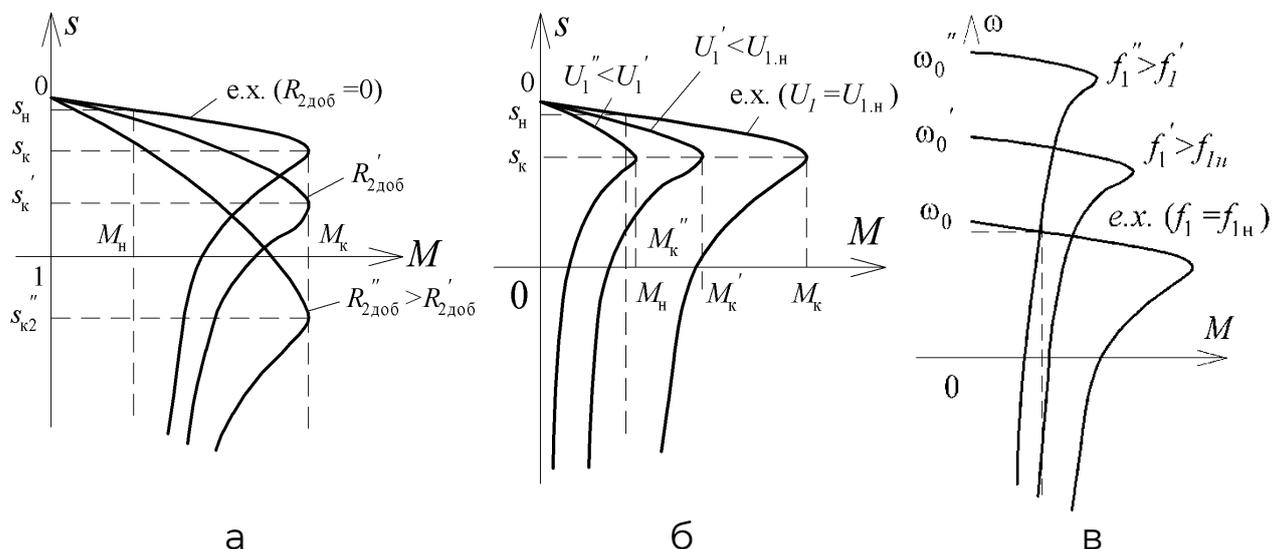


Рис. 4.7. Искусственные МХ АД при  $R'_{2\text{доб}} = \text{var}$  (а),  $U_1 = \text{var}$  (б),  $f_1 = \text{var}$  (в)

#### 4.3.2. Изменение напряжения на статоре

При данном способе изменяется величина первой гармоники напряжения статора двигателя  $U_1 = \text{var}$ . При этом, величина критического скольжения не изменяется, то есть  $s_k = \text{const}$  (рис. 4.7, б). Изменяется величина критического момента, причем существенным является тот факт, что величина момента изменяется пропорционально квадрату напряжения статора. Регулирование, при котором изменяется величина  $U_1$  называют *фазовым*. Изменение напряжения возможно только в сторону уменьшения, так как при увеличении напряжения при постоянстве частоты  $f_1$  будет возрастать величина магнитного потока. Это в свою очередь приведет к существенному росту тока намагничивания, который может достигать и превосходить номинальное значение тока двигателя вследствие явления насыщения машины.

#### 4.3.3. Изменение частоты питающей сети.

Согласно формуле, для синхронной частоты  $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$ , при изменении частоты питающего напряжения на статоре  $f_1 = \text{var}$  будет изменяться частота вращения вращающегося магнитного поля  $\omega_0$ . Из формулы (4.5) видно, что при уменьшении частоты при  $U_1 = \text{const}$  происходит возрастание магнитного потока, что приводит к насыщению машины и большому возрастанию тока намагничивания  $I_0$ . Поэтому изменение частоты возможно только выше номинальной. При увеличении  $f_1$  происходит возрастание величин индуктивных

сопротивлений  $X_k = (L_1 + L'_2)\omega_{эл} = (L_1 + L'_2)2\pi f_1$ , что в свою очередь ведет к уменьшению критического скольжения и момента (рис. 4.7, в).

Перепишем формулу для ЭДС двигателя, оставив в левой части магнитный поток

$$\Phi_0 = \frac{U_1}{4.44w_1f_1}.$$

Так как число витков обмотки  $w_1$  постоянно, становится очевидным, что для обеспечения постоянного значения магнитного потока  $\Phi_0$  необходимо поддерживать постоянным отношение  $U_1 / f_1$ , то есть необходимо обеспечить выполнение закона  $U_1 / f_1 = const$ .

#### **4.4. Тормозные режимы асинхронного двигателя.**

##### **Механические характеристики асинхронного двигателя в тормозных режимах**

###### *4.4.1. Режим рекуперативного торможения*

Данный режим возникает при превышении частоты вращения ротора относительно синхронной частоты вращения магнитного поля статора ( $\omega > \omega_0$ ). В этих условиях электромагнитный момент двигателя становится отрицательным, а вырабатываемая энергия отдаётся в сеть. Практически этот режим можно получить уменьшив синхронную частоту вращения в работающем двигателе. Из формулы для частоты вращения ВМП ( $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$ ) видно, что сделать это можно двумя способами: либо изменением числа пар полюсов в обмотке статора в сторону увеличения  $p$ , либо уменьшением частоты питающего напряжения  $f_1$ . Этот режим применяют для уменьшения частоты вращения перед полной остановкой двигателя в лифтах, либо в тех случаях, когда двигатель работает на активный момент (например, в подъемно-транспортных машинах). Схема включения и механические характеристики двигателя в режиме рекуперативного торможения представлены на рис. 4.8, а, б соответственно.

###### *4.4.2. Режим торможения противовключением*

Режим получается, когда активный статический момент больше, чем пусковой либо при изменении чередования фаз на обратное, при этом частота вращения магнитного поля изменяет направление вращения на противоположное. Данный режим позволяет получать большие моменты, благодаря чему время торможения существенно уменьшается. Если при переключении чередования фаз двигатель включить при скорости близкой к нулю, то двигатель перейдет в двигательный режим работы другого направления вращения. При таком способе торможения в двигателе возникают большие токи, поэтому данный режим применяется для двигателей с ФР и введением дополнительного сопротивления в цепь ротора для ограничения максимального тока двигателя.

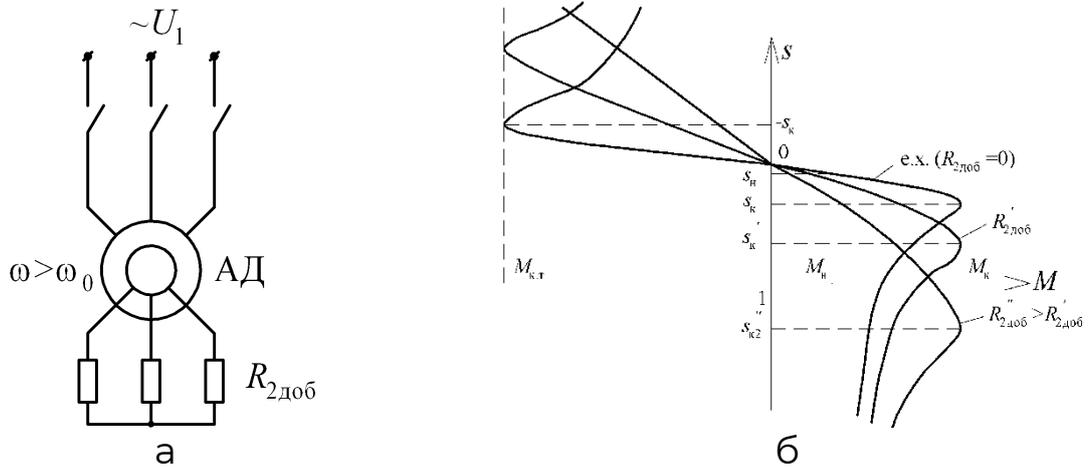


Рис. 4.8. Схема включения АД (а) и механические характеристики (б) при рекуперативном торможении

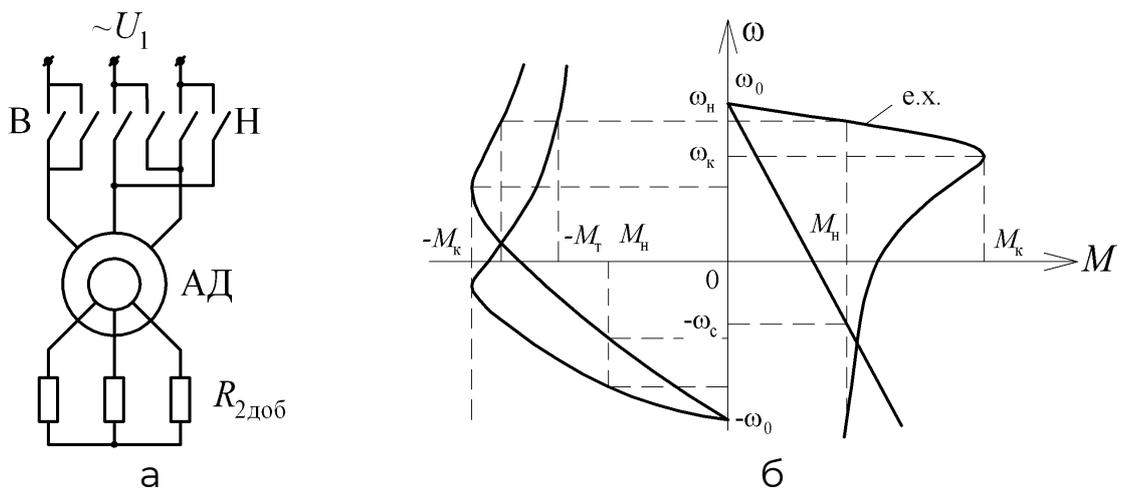


Рис. 4.9. Схема включения АД (а) и механические характеристики (б) при торможении противовключением

В асинхронном двигателе с ФР момент и ток двигателя можно регулировать введением в цепь ротора дополнительного сопротивления. При этом изменяется жесткость механических характеристик в режиме торможения. При торможении вся энергия выделяется на сопротивлении ротора и дополнительном сопротивлении, поэтому этот режим является неэкономичным.

Схема включения и механические характеристики для этого режима представлены на рис. 4.9, а, б соответственно.

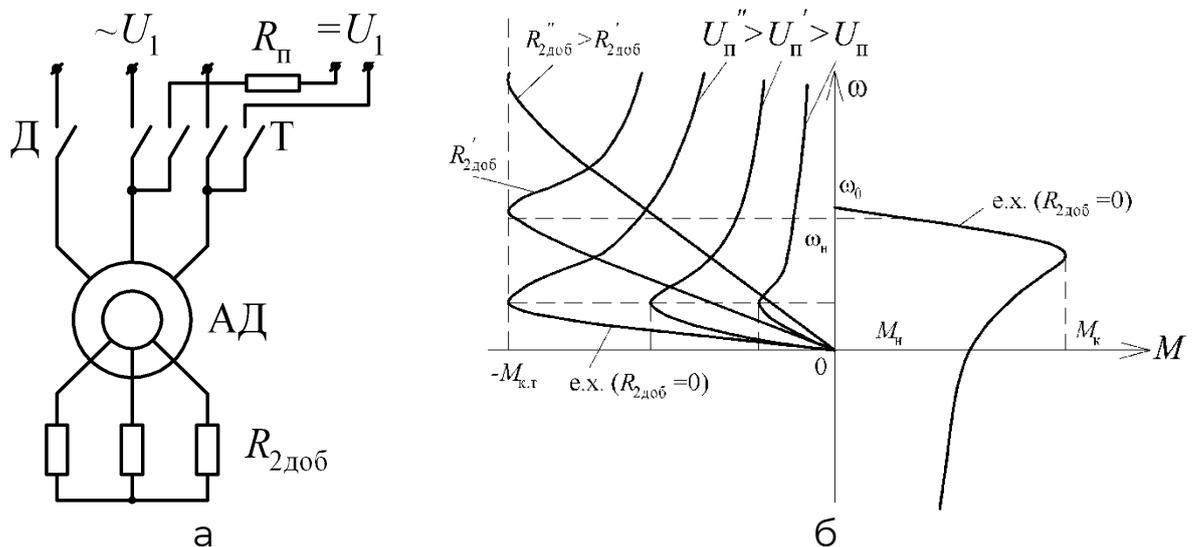


Рис. 4.10. Схема включения АД (а) и механические характеристики (б) при динамическом торможении

#### 4.4.3. Динамическое торможение

Этот вид торможения наступает в трехфазном АД при отключении его от сети переменного тока и подключении его к источнику постоянного тока. При этом постоянный ток создаст неподвижное магнитное поле статора. В этих условиях в роторе, вращающемся по инерции, наводится ЭДС, возникает ток в обмотке ротора, взаимодействие которого с магнитным полем приводит к созданию тормозного момента на валу двигателя. В процессе динамического торможения механическая энергия вращающихся масс электропривода преобразуется в электрическую энергию, которая расходуется на нагрев обмотки ротора и дополнительных резисторов, включенных в цепь ротора. При скорости близкой к нулю, ЭДС становится равной нулю, ток прекращается, и тормозной момент пропадает.

Данный режим применяют для точной остановки двигателя. Постоянный ток преодолевает лишь активное сопротивление обмотки статора, поэтому напряжение постоянного тока, подводимое к обмотке статора при динамическом торможении, должно быть ниже напряжения переменного тока, соответствующего работе двигателя, так, чтобы ток в обмотке статора не превышал номинального значения. Схема включения и механические характеристики динамического торможения показаны на рис. 4.10, а, б.

## 5. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### 5.1. Определение понятия «регулирование»

Непрерывное повышение требований к технологическим процессам (ТП) неизбежно влечет за собой повышение требований к электроприводу, который приводит в движение рабочие механизмы, участвующие в ТП. В большинстве ТП требуется регулирование потока мощности для обеспечения необходимого качества технологии. Сюда относятся металлообрабатывающие станки, прокатные станы, подъемные и транспортные механизмы, различные механизмы бумажной, угольной, текстильной промышленности. Так, в металлорежущих станках скорость электропривода должна регулироваться в зависимости от рода обрабатываемого металла, качества резца, размеров изделия. В прокатных станах для каждого профиля имеются свои наиболее благоприятные параметры работы привода.

В лифтах регулирование скорости позволяет значительно повысить комфортность перемещения пассажиров. Скорость работы дымососов в котельной также определяется внешними параметрами (влажность, зольность, условия горения, требуемая производительность).

*Регулированием* скорости называется принудительное изменение скорости электропривода в зависимости от требований технологического процесса. Понятие регулирования скорости не следует смешивать с естественным изменением скорости, возникающим в электроприводах в силу изменения нагрузки на валу работающей машины. Регулирование скорости осуществляется дополнительным воздействием на приводной двигатель.

Наиболее эффективным с точки зрения затрат и возможностей является электрическое регулирование, которое сегодня доминирует над другими типами регулирования потока мощности к рабочему органу исполнительного механизма.

Кроме регулирования скорости от электропривода в общем случае также требуется обеспечить регулирование момента (тока) и положения. Задача регулирования координат электропривода решается при проектировании систем управления электроприводом (СУЭП).

Регулирование делят обычно на две группы: в разомкнутых системах и в замкнутых системах. *Разомкнутые* системы, как правило, не требуют датчиков обратных связей и сложных управляющих устройств (например, программируемые логические контроллеры). Недостатком разомкнутого регулирования является низкая точность поддержания регулируемой координаты, что часто не может обеспечить выполнение необходимых требований технологий производства.

В связи с непрерывным совершенствованием технологии и автоматизацией рабочих мест возрастают требования к точности и качеству регулирования. Поэтому область применения разомкнутых систем сужается, уступая место замкнутым системам регулирования. Введение обратных связей по координатам обеспечивает автоматическое регулирование координат, поэтому системы регулирования электропривода принято называть системами автоматического регулирования (САР). Иногда используется более широкий термин – системы автоматического управления (САУ).

В *замкнутых* системах различают два вида регулирования: по отклонению и по возмущению. Регулирование по возмущению предполагает компенсацию влияния возмущения на регулируемую координату с помощью положительной обратной связи. В электроприводе применяется первый тип регулирования – по отклонению. Использование положительных обратных связей часто приводит к возникновению явления неустойчивости, что делает систему неработоспособной, поэтому регулирование по возмущению в электроприводе не применяется.

Реализация регулирования требует введения в ЭМС дополнительных управляющих устройств. В разомкнутой системе вводятся контакторы, реле, резисторы, реакторы и п.т.

Для осуществления автоматического регулирования предусматриваются управляемые преобразователи и регуляторы, позволяющие автоматически под воздействием обратных связей изменять параметры системы. Наиболее широко используются электромашинные и вентильные управляемые преобразователи и соответствующие системы электропривода: система генератор – двигатель (Г-Д); система тиристорный (или транзисторный) преобразователь –

двигатель (ТП-Д); система преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ-АД).

## 5.2. Показатели качества регулирования угловой скорости электроприводов

Для количественного определения предъявляемых к регулируемому электроприводу требований и для сопоставления между собой возможных способов регулирования используются обобщенные показатели регулирования. К их числу относятся точность регулирования, плавность, стабильность скорости, допустимая нагрузка при различных скоростях, динамические показатели качества и экономичность регулирования.

### 5.2.1. Точность регулирования

Точность регулирования переменной определяется возможными отклонениями её от заданного значения под действием возмущающих факторов (изменений нагрузки, колебания напряжения сети и др.). При регулировании в разомкнутой системе может быть принято среднее значение координаты при известных пределах изменения всех возмущающих воздействий. При этом оценкой точности регулирования может служить отношение наибольшего отклонения  $\Delta\omega_{\max}$  к среднему значению  $\Delta\omega_{\text{cp}}$

$$\Delta\omega_{\max}^* = \Delta\omega_{\max} / \omega_{\text{cp}} = (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / (\omega_{\max} + \omega_{\min}),$$

где  $\omega_{\max}$  и  $\omega_{\min}$  – максимальное и минимальное значение переменной при данных значениях параметра или задающего сигнала и пределов изменения возмущений.

Количественная оценка точности регулирования в замкнутых системах обычно выполняется иначе. Если по условиям работы электропривода важна точность воспроизведения значений регулируемой координаты, задаваемой на входе САР, требования к точности определяются допустимой ошибкой регулирования  $\Delta\omega_{\text{доп}}^*$ , абсолютное значение которой при единичной обратной связи можно записать так:

$$\Delta\omega_{\max}^* = |\omega^* - \omega|_{\max} \leq \omega_{\text{доп}}^*,$$

где  $\omega^*$  – задающий сигнал,  $\omega$  – текущие значения регулируемой координаты. При необходимости ошибку регулирования можно представить в относительных единицах, поделив на  $\omega^*$ .

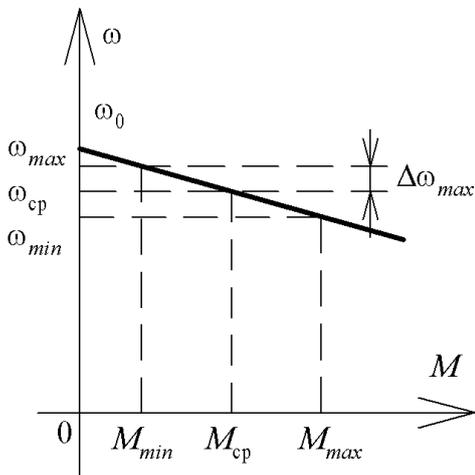


Рис. 5.1. К определению понятия точности регулирования

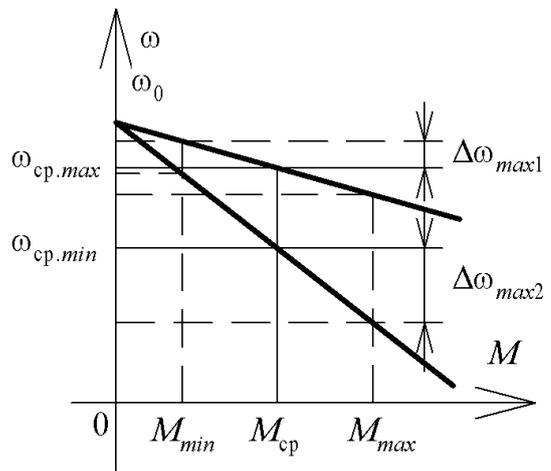


Рис. 5.2. К определению понятия диапазона регулирования

### 5.2.2. Диапазон регулирования

Диапазон регулирования угловой скорости определяется отношением возможных установившихся скоростей: максимальной  $\omega_{max}$  к минимальной  $\omega_{min}$

$$D_{\omega} = \omega_{max} / \omega_{min}.$$

При заданной точности регулирования для установленных пределов изменения момента нагрузки и других возмущений. Диапазон регулирования скорости в разомкнутых системах обычно составляет 10:1, 20:1. Использование замкнутых систем регулирования позволяет получать  $D_{\omega}$  до 30000:1.

Различные производственные механизмы требуют различных диапазонов регулирования. Например, главные привода металлорежущих станков в зависимости от назначения работают в с диапазонами  $D_{\omega} = 4 \div 1000:1$ , для механизмов подач универсальных металлорежущих станков требуется диапазон до 10000:1. Для прокатных станов средний диапазон регулирования скорости составляет 25:1.

### 5.2.3. Плавность регулирования

Плавность регулирования характеризует скачок скорости при переходе от данной скорости к ближайшей возможной. Плавность тем выше, чем меньше этот скачек. Её можно оценить коэффициентом плавности регулирования, который определяется как отношение двух соседних значений угловых скоростей при регулировании

$$\phi_{пл} = \omega_i / \omega_{i-1},$$

где  $\omega_i$  и  $\omega_{i-1}$  соответственно угловые скорости на  $i$ -той и  $(i-1)$  ступенях регулирования.

При плавном регулировании  $\phi_{\text{пл}} \rightarrow 1$ . Плавность регулирования во многих случаях определяет качество продукции. Высокая плавность регулирования достигается сегодня при использовании полупроводниковых преобразователей для ДПТ и АД.

#### 5.2.4. Экономичность регулирования

Экономичность регулирования характеризуется затратами на сооружение и эксплуатацию электропривода. Применение регулируемого электропривода связано с дополнительными первоначальными затратами и эксплуатационными расходами, которые должны окупаться повышением производительности и надежности работы установки, а также улучшением качества продукции. При сравнении различных способов регулирования ориентировочное суждение о затратах можно составить, оценивая массогабаритные показатели дополнительного оборудования, а эксплуатационные затраты по энергии – КПД, характеризующим потери энергии

$$\eta = P_2 / P_1,$$

где  $P_1$  – мощность, потребляемая из сети;  $P_2$  – мощность на валу двигателя

и значением  $\cos \varphi = P/S$ , характеризующим потребление активной мощности при регулировании.

Для регулируемых электроприводов с вентильными преобразователями, которые вносят искажения в форму потребляемого из сети тока, важным энергетическим показателем служит коэффициент мощности:

$$k_m = k_u \cos \phi_1,$$

где  $\phi_1$  – угол сдвига по фазе между первой гармоникой потребляемого тока и напряжением сети;  $k_u$  – коэффициент искажений, характеризующий отношение эффективного значения первой гармоники тока к эффективному значению реальной кривой потребляемого тока, содержащей высшие гармоники.

Для современных регулируемых приводов наиболее характерные значения указанных показателей следующие:  $\eta = 0,8 \div 0,95$ ;  $\cos \phi = 0,9 \div 1$ ;  $k_u = 0,85 \div 0,95$ . Часто для достижения наилучших значений указанных показателей применяют

специальные устройства, такие как фильтры, регулирование тока возбуждения синхронной машины, оптимизация частоты переключения вентилях, использование полупроводниковых приборов с низкими потерями на переключение.

#### 5.2.5. Стабильность угловой скорости

Данный критерий характеризуется изменением угловой скорости при заданном отклонении момента нагрузки и тесно связан с понятием жесткости механической характеристики. Чем больше жесткость механической характеристики двигателя, тем выше стабильность скорости электропривода. Самой высокой стабильностью обладают синхронные двигатели, так как у них жесткость  $M \propto \beta \rightarrow \infty$ .

#### 5.2.6. Направление регулирования скорости

Показатель определяет возможность уменьшение или увеличение её по отношению к номинальному значению зависит от способов регулирования. Для приводов постоянного тока различают одно- и двухзонное регулирование.

В первом случае регулирование осуществляется при постоянстве магнитного потока путем изменения напряжения на якоре вниз от номинального значения. Такое регулирование называют регулированием с постоянством момента ( $M = k\Phi I_a, \Phi = const$ ).

Для перевода привода во вторую зону уменьшают магнитный поток двигателя (изменяют напряжение на обмотке возбуждения ниже номинального), при этом уменьшается перегрузочная способность двигателя по моменту ( $\lambda_M \downarrow = k\Phi \downarrow \lambda_r$ ) и увеличивается скорость. Такое регулирование называют регулированием с постоянством мощности ( $P = \omega \cdot M = \frac{U_a - IR_{a\Sigma}}{k\Phi} \cdot k\Phi I = (U_a - IR_{a\Sigma}) I, \Phi = var$ ).

Характеристики двух зон регулирования ДПТ с НВ представлены на рис. 5.3.

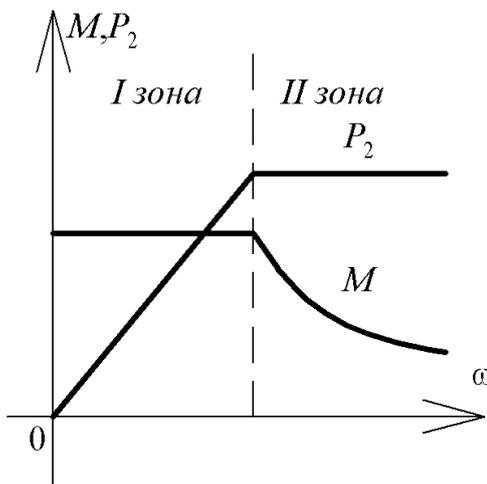


Рис. 5.3. Характеристики двух зон регулирования ДПТ с НВ

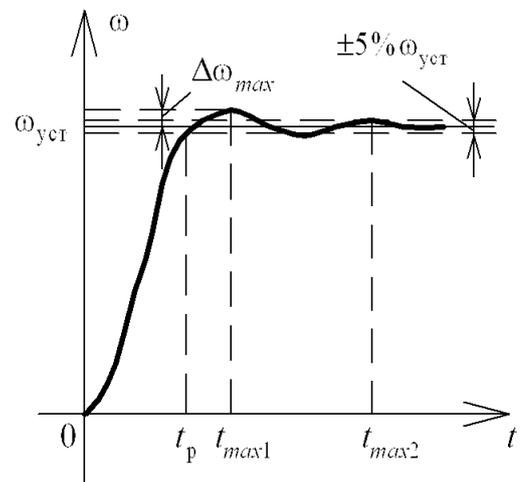


Рис. 5.4. Динамические показатели качества регулирования

### 5.2.6. Допустимая нагрузка двигателя

Под указанным показателем понимают наибольшее значение момента, который двигатель способен длительно развивать при работе на регулировочных характеристиках. Определяется нагревом двигателя и различается в зависимости от способа регулирования. Изменение статического момента от скорости в зависимости от механизма может быть различным. Принципиально путем выбора соответствующей мощности двигателя можно удовлетворить любому изменению нагрузочного момента или мощности при регулировании скорости. Однако часто оказывается, что регулирование является неэкономичным, и двигатель при разных скоростях может оказаться недогруженным.

Недогрузка двигателя ведет к ухудшению эксплуатационных показателей привода, так как при этом уменьшается КПД двигателя, а для АД падает также значение коэффициента мощности. Желательно поэтому применять такой способ регулирования, при котором двигатель был бы по возможности полностью загружен при всех угловых скоростях.

Допустимая нагрузка определяется степенью нагрева двигателя, которая в свою очередь зависит от потерь в двигателе и условий охлаждения двигателя. Таким образом, можно заключить, что для полной загрузки двигателя необходимо, чтобы ток двигателя во всех режимах работы был близок к номинальному. Для того чтобы условия охлаждения двигателя не ухудшались в регулируемых приводах используют двигатели с принудительной вентиляцией.

Конструкция таких двигателей содержит дополнительный отдельный двигатель вентилятора, который вращается с постоянной частотой, не зависимо от частоты вращения вала двигателя.

### 5.2.7. Показатели качества регулирования в динамических режимах работы электропривода

Динамические качества электропривода во многих случаях определяют производительность установки, износ механического оборудования, качество выпускаемой продукции. Поэтому качество переходных процессов имеет серьёзное значение. Качество переходного процесса можно оценить быстродействием, величиной перерегулирования и колебательностью процесса.

*Быстродействие* определяет быстроту реакции электропривода на изменения воздействий. Главным показателем быстродействия, непосредственно влияющим на производительность механизмов, является время переходного процесса или время регулирования. В автоматических системах регулирования быстродействие характеризуют показателями переходного процесса при отработке единичного скачкообразного управляющего воздействия. Обычно под временем регулирования понимают время, которое требуется привода для того, чтобы отклонение регулируемой координаты не превышало 5% от заданного значения.

*Перерегулирование* представляет собой динамическую ошибку и характеризуется максимальным отклонением  $\omega_{\max}$  от установившегося значения  $\omega_{\text{уст}}$ . Как правило, перерегулирование  $\sigma$  выражают в относительных единицах или процентах:

$$\Delta\omega_{1\max}^* = \frac{\Delta\omega_{1\max}}{\omega_{\text{уст}}} \cdot 100\% .$$

*Колебательность* электропривода является фактором, влияющим на точность, динамические нагрузки и качество технологического процесса. Её общим показателем служит значение логарифмического декремента затухания

$$\lambda = \ln \frac{A_1}{A_2} ,$$

где  $A_1, A_2$  - величина амплитуд первого и следующего за ним максимума.

На рис. 5.4. представлен вид переходного процесса и указаны величина быстродействия  $t_p$  и перерегулирование  $\sigma$ .

### **5.3. Регулирование скорости двигателя постоянного тока с независимым возбуждением**

#### *5.3.1. Преобразовательные устройства, применяемые при регулировании скорости двигателей*

Как было рассмотрено выше, регулирование скорости возможно различными способами: изменением напряжения на якоре двигателя, изменением сопротивления в цепи якоря, изменением напряжения на обмотке возбуждения двигателя. Реостатное регулирование является не экономичным и по возможности используются другие, более экономичные способы регулирования скорости.

Регулирование скорости возможно при использовании преобразовательных устройств, которые позволяют изменять параметры энергии на своем выходе. Например, преобразователи для ДПТ позволяют менять значение напряжения на выходе, преобразователи для АД, кроме того, могут изменять частоту выходного напряжения. Первоначально в качестве управляемых преобразователей (управляемых выпрямителей для ДПТ) применяли электромашинные преобразователи. Такой преобразователь состоит из механически соединённых друг с другом АД и генератора постоянного тока независимого возбуждения. В настоящее время в связи с бурным развитием полупроводниковой техники ЭМП не используются ввиду экономической нецелесообразности.

Полупроводниковые преобразователи в настоящее время принято разделять на неуправляемые выпрямители (например, для питания обмотки возбуждения двигателя в однозонных САР), управляемые выпрямители, позволяющие изменять на выходе среднее значение напряжения; непосредственные преобразователи частоты, изменяющие частоту первой гармоники; частотные преобразователи, частота и напряжение на выходе которых меняется по какому-либо закону частотного управления.

#### *5.3.2. Система генератор-двигатель*

Рассмотрим основные свойства системы генератор-двигатель (Г-Д). Принципиальная схема системы Г-Д представлена на рис. 5.5. Она состоит из приводного двигателя Д (асинхронный или синхронный двигатель), который механически связан с генератором постоянного тока Г.

Величина ЭДС генератора регулируется путем изменения напряжения на обмотке возбуждения генератора. Якоря генератора и двигателя электрически связаны друг с другом. Регулируемым параметром в данном случае выступает величина ЭДС двигателя. Для обеспечения магнитного потока в двигателе и генераторе используется возбуждатель, который представляет собой ДПТ меньшей мощности  $P_B = 0,05 \div 0,1 P_D$ . В настоящее время в качестве возбуждателей используются полупроводниковые преобразователи.

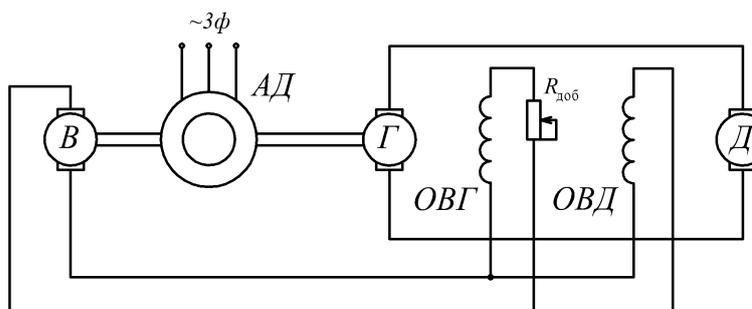


Рис. 5.5. Принципиальная схема системы Г-Д

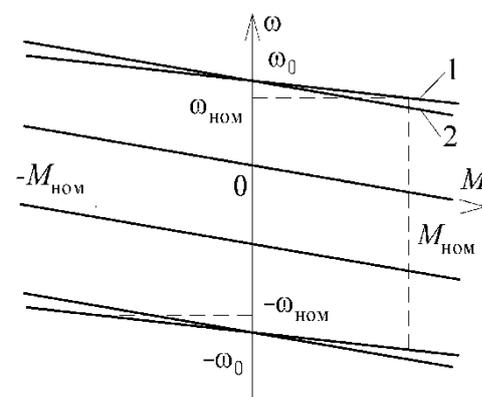


Рис. 5.6. Механические характеристики системы Г-Д

Из уравнения равновесия напряжений по второму закону Ома можно составить уравнение ЭДС

$$E_r - E = I(R_r + R_d),$$

где  $E_r$  – ЭДС генератора,  $R_r$  – сопротивления якоря генератора.

Подставив в это уравнение значения ЭДС  $E = k\Phi\omega$  и тока двигателя  $I = M/k\Phi$ , можно найти уравнение механической характеристики системы Г-Д:

$$\omega = \frac{E_r}{k\Phi} - \frac{M(R_r + R_d)}{(k\Phi)^2}.$$

Вид механических характеристик представлен на рис. 5.6. Анализируя полученное уравнение МХ для системы ГД, можно заключить, что относительное падение напряжения в этой системе в вдвое выше (прямая 2 на рис. 5.6), чем у естественной характеристики двигателя (прямая 1 на рис. 5.6). Обуславливается это наличием сопротивления генератора, которое примерно равно сопротивлению якоря двигателя, так как машины примерно одинаковой мощности.

Основным достоинством данного способа регулирования является высокая плавность регулирования скорости двигателя.

К недостаткам можно отнести следующее: в системе Г-Д происходит двукратное преобразование энергии: в приводном двигателе из электрическую в механическую, в генераторе из механической в электрическую, а также непосредственно в самом двигателе из электрической в механическую. Так как каждое устройство обладает своим КПД, становится очевидно, что в данной системе общий КПД, равный произведению КПД всех входящих в систему преобразовательных устройств  $\eta_{\Sigma} = \eta_{Ад} \eta_{Г} \eta_{Д}$ , не может иметь высокого значения.

Кроме того, при работе ЭМП возникает дополнительный шум, ухудшающий условия работы персонала, повышаются расходы на обслуживание, а сама система обладает повышенными массогабаритными показателями, так как мощность приводного двигателя и генератора должны быть немного больше мощности двигателя. Ввиду указанных недостатков в настоящее время данная система вытеснена более совершенной системой регулирования скорости, называемой тиристорный преобразователь-двигатель (ТП-Д).

### 5.3.3. Система тиристорный преобразователь-двигатель

Развитие силовой электроники позволило создать и успешно развивать статические преобразователи, преобразующие переменное напряжение в регулируемое постоянное.

Изменение величины постоянного напряжения осуществляется регулированием угла открывания вентилей в проводящей части переменного напряжения. Выпрямленное напряжение содержит постоянную  $U_d$  и переменную составляющие. Наличие пульсаций выпрямленного напряжения ухудшает условия коммутации двигателей и увеличивает потери в них, поэтому на выходе выпрямителя часто устанавливают фильтр, представляющий собой реактор, включаемый последовательно с цепью якоря и обладающий таким реактивным сопротивлением, которое позволяет обеспечить допустимый уровень пульсаций тока в якоре двигателя. Другим средством уменьшения пульсаций является использование схем повышенной пульсности, что позволяет значительно уменьшить пульсации тока выпрямленного

напряжения и тока, однако требует больших затрат на оборудование. Схема реверсивного ТП представлена на рис. 5.7.

Уравнение электромеханической характеристики для системы ТП-Д имеет следующий вид:

$$\omega = \frac{U_{d0} \cos \alpha - IR_3}{k\Phi},$$

где  $U_{d0} = \frac{m}{\pi} \sqrt{2} U \sin \frac{\pi}{m}$  – среднее значение выпрямленного напряжения при холостом ходе выпрямителя и полностью открытых тиристорах ( $\alpha=0$ );  $U$  – действующее значений переменного напряжения;  $m$  – число фаз выпрямителя;  $R_3 = X_T m / 2\pi + R_T + R_L + R_x$  – эквивалентное сопротивление якорной цепи;  $R_T, X_T$  – активное и реактивное сопротивления трансформатора;  $R_L$  – активное сопротивление сглаживающего реактора.

Механическую характеристику системы ТП-Д можно получить из электромеханической, выразив значение тока через момент двигателя,

$$\omega = \frac{U_{d0} \cos \alpha}{k\Phi} - \frac{MR_3}{(k\Phi)^2}.$$

Вид МХ представлен на рис. 5.8. Характеристики имеют меньшую жесткость по сравнению с естественной МХ за счет дополнительных сопротивлений в якорной цепи. При различных углах включения наклон характеристик остаётся неизменным.

Характеристики системы ТП-Д с отдельным управлением комплектами в зоне малых нагрузок являются нелинейными. Нелинейность характеристик приводит к наличию дополнительных звеньев в системах регулирования, призванных выполнить линеаризацию МХ системы.

При наличии двух комплектов мостов ТП появляется возможность рекуперации энергии в сеть. Более того, такие преобразователи обладают большим быстродействием. Коэффициент полезного действия ТП составляет 0,9-0,94 для мощностей порядка 50-100 кВт, что существенно превосходит КПД системы Г-Д.

Таким образом, к достоинствам системы ТП-Д можно отнести широкий диапазон регулирования скорости, жесткость МХ, высокий КПД, небольшие массогабаритные показатели и невысокие эксплуатационные расходы, высокая

надежность, более высокое быстродействие в сравнении с системой Г-Д.

Недостатком таких систем являются пульсации выпрямленного напряжения, снижение коэффициента мощности, обусловленное уменьшением угла управления тиристорами. Приблизительно считают, что  $\cos \varphi = \cos \alpha$ .

В настоящее время система ТП-Д является основным видом регулируемого электропривода постоянного тока, применяемым в широком диапазоне мощностей: от привода металлорежущих станков до привода крупных прокатных станов.

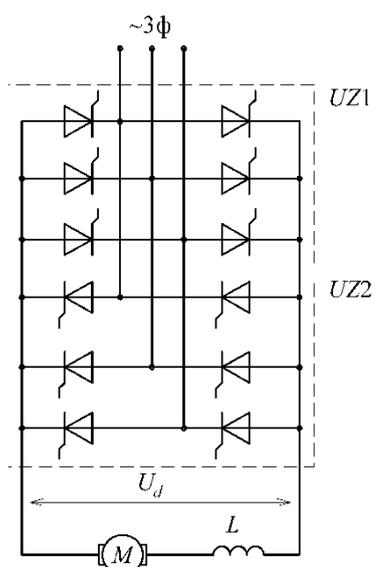


Рис. 5.7. Схема реверсивного ЭП системы ТП-Д

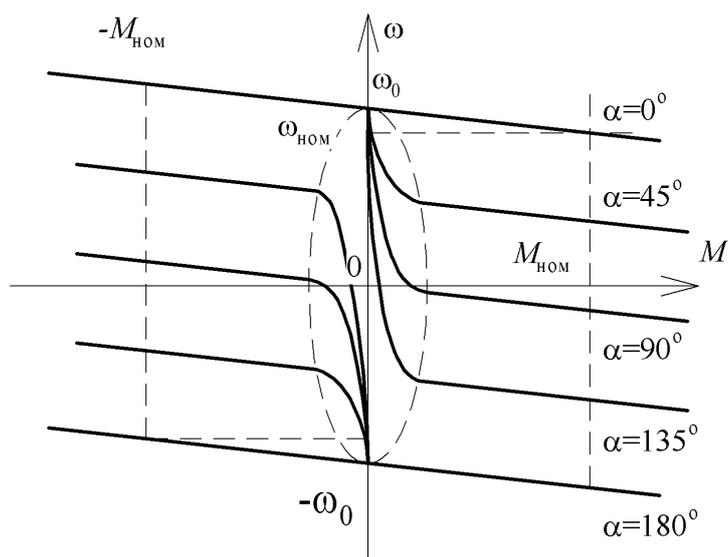


Рис. 5.8. Механические характеристики системы ТП-Д

## 5.4. Регулирование скорости асинхронного двигателя

В последние 10-25 лет установилась четкая тенденция на переход от привода постоянного тока к приводу переменного тока благодаря совершенствованию законов управления двигателями переменного тока и развитию силовой электроники.

Применение двигателей переменного тока обусловлено их простотой, дешевизной, повышенной надежностью, существенно меньшими габаритами и массой по сравнению с двигателями постоянного тока. К недостаткам регулирования скорости можно отнести высокую сложность теории машин переменного тока и алгоритмов управления, закладываемых в преобразовательные устройства.

Наибольшее распространение получили следующие способы регулирования угловой скорости асинхронного двигателя: 1) реостатное; 2) изменением напряжения на статоре; 3) переключением числа пар полюсов; 4) изменением частоты питающего напряжения и др.

### 5.4.1. Реостатное регулирование

Схема включения АД при этом способе регулирования представлена на рис. 5.9. Реостатные характеристики получаются путем введения в цепь ротора добавочного сопротивления. При этом с ростом сопротивления падает жесткость МХ.

Допустимый диапазон регулирования скорости при данном способе

$$D = (1 - s_{ном}) (\Delta\omega_p^* / \Delta M_c^* + 1).$$

Так как  $s_{ном} \ll 1$ , то приближенно

$$D = \Delta\omega_p^* / \Delta M_c^* + 1,$$

где  $\Delta\omega_p^*$  – относительная величина изменения скорости;  $\Delta M_c^*$  – относительная величина изменения момента.

Из полученной формулы видно, что при равных относительных отклонениях угловой скорости и момента нагрузки диапазон регулирования  $D = 2:1$ . При более низком допустимом отклонении угловой скорости диапазон оказывается ещё меньше.

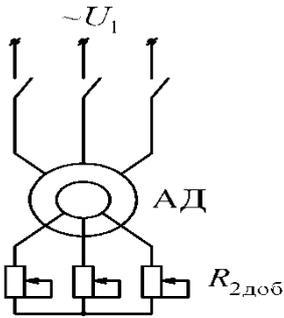


Рис. 5.9. Схема включения двигателя при реостатном способе регулирования

Потери мощности при реостатном регулировании складываются из переменных потерь, включающих потери в меди статора и ротора и во внешних резисторах роторной цепи, и постоянных – не зависящих от нагрузки. Суммарные постоянные потери в двигателе остаются примерно одинаковыми независимо от нагрузки и скорости двигателя.

Электромагнитная и механическая мощности для АД

$$P_{12} = P_{эм} = M \omega_{\text{синхр}}; \quad P_{\text{мех}} = M \omega,$$

отсюда можно определить потери в роторе

$$\Delta P_2 = P_{12} - P_{\text{мех}} = M(\omega_c - \omega) \frac{\omega_c}{\omega_c} = M \omega_c s.$$

Видно, что потери пропорциональны величине скольжения и распределяются пропорционально отношению сопротивлений ротора двигателя и добавочного сопротивления в цепи ротора, поэтому двигатель при реостатном регулировании может развивать момент, равный номинальному.

Недостатками реостатного регулирования скорости являются ступенчатое регулирование скорости и использование дополнительной аппаратуры, невысокое быстродействие и большие потери энергии при регулировании.

#### 5.4.2. Регулирование угловой скорости АД изменением напряжения на статоре

При изменении величины первой гармоники изменяется величина критического момента при постоянстве критического скольжения (рис. 2.28). Такое изменение достигается использованием тиристорного преобразователя напряжения (ТПН).

Максимальный момент при уменьшении напряжения снижается пропорционально квадрату напряжения:

$$M_{\text{к.и}} = M_{\text{к}} \left( \frac{U_{\text{и}}}{U_{\text{ном}}} \right)^2,$$

где  $M_{\text{к.и}}$  – критический момент при сниженном напряжении;  $U_{\text{и}}$  – пониженное напряжение.

Из рис. 5.11 видно, что пределы регулирования скорости весьма ограничены, даже при вентиляторной нагрузке.

Для расширения диапазона используют замкнутые по скорости САР, структурная схема которой представлена на рис. 5.10. В состав такой САР входит датчик скорости (BR) и регулятор скорости, на который поступает разность между заданным  $\omega^*$  и текущим  $\omega$  значением скоростей. На выходе регулятора скорости вырабатывается сигнал, подающийся на вход системы импульсно-фазного управления, которая вырабатывает управляющие импульсы для ТПН. Особенность такого регулирования заключается в том, что все характеристики сходятся в точке синхронной скорости  $\omega_0$ , поэтому, чем меньше скорость, тем выше скольжение и больше потери в двигателе. Механические характеристики двигателя при фазовом управлении в замкнутой САР скорости представлены на рис. 5.11.

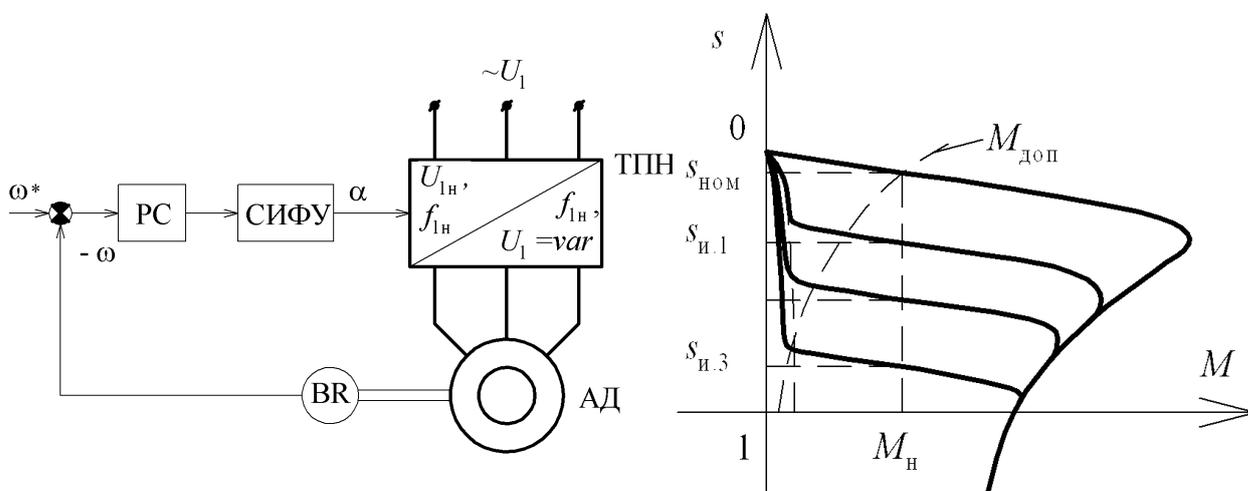


Рис. 5.10. Структурная схема замкнутой САР скорости АД при фазовом управлении

Рис. 5.11. Механические характеристики САР скорости АД при фазовом управлении

Двигатель при таком способе регулирования может работать продолжительное время при условии

$$\Delta P_2 \leq \Delta P_{2\text{ном}}.$$

Допустимый момент можно найти, приравнявая допустимые потери к номинальным

$$M_{\text{доп}} \omega_0 s = M_{\text{ном}} \omega_0 s_{\text{ном}},$$

откуда

$$M_{\text{доп}} \leq M_{\text{ном}} \frac{s_{\text{ном}}}{s}.$$

Кривая допустимого момента по нагреву представлена на рис.5.11.

Данный способ регулирования нельзя применять для механизмов, работающих в продолжительном режиме работы с постоянной нагрузкой. Эффективным оказывается использование фазового регулирования для механизмов, у которых статический момент зависит от скорости двигателя  $M_c = f(\omega)$ , например, для приводов вентиляторов, насосов, компрессоров. Этот способ также применим, когда двигатель работает на пониженных скоростях малое время относительно всего цикла работы, например, лифты. В этом случае превышение установленной мощности двигателя невелико.

Достоинством фазового управления является более низкая стоимость преобразователя (ТПН) в сравнении с преобразователем частоты (ПЧ) равной мощности, что позволяет для указанных механизмов обеспечить приемлемое качество технологического процесса без дополнительных затрат.

#### 5.4.3. Изменение числа пар полюсов

Из выражения для угловой скорости АД:

$$\omega = \omega_0(1-s) = \frac{2\pi f_1}{p}(1-s),$$

видно, что регулирование скорости можно осуществлять изменением числа пар полюсов  $p$  обмотки статора двигателя. Так как данная величина может быть только целым числом, регулирование скорости оказывается ступенчатым.

Для данного вида регулирования изготавливаются многоскоростные АД с КЗР. В пазах сердечника статора размещают либо две независимые обмотки, либо одну полюснопереключаемую.

Различают две основные схемы переключения. Схема «звезда/двойная звезда» (рис. 5.12, I-II) обеспечивает регулирование с постоянством момента. Такую схему целесообразно применять в электроприводе с постоянно действующим моментом нагрузки при изменении частоты вращения. Схема «звезда/звезда» (рис.5.12, I-III) также даёт двукратное изменение числа пар полюсов, однако регулирование происходит при постоянстве мощности, то есть при переключении на повышенную скорость момент уменьшается в два раза. Такие схемы разумно применять в приводах, где момент сопротивления обратно

пропорционален частоте вращения. Механические характеристики АД при регулировании скорости изменением числа пар полюсов представлены на рис. 5.13.

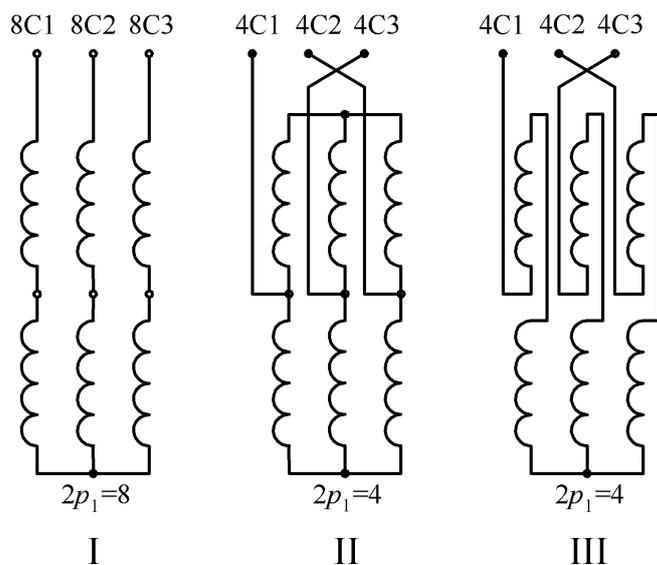


Рис. 5.12. Схемы соединения катушечных групп обмоток статора

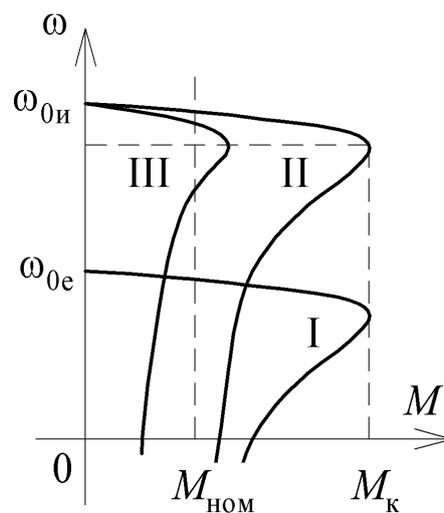


Рис. 5.13. Механические характеристики АД при переключении числа пар полюсов

Многоскоростные АД широко применялись в электроприводах, допускающих ступенчатое регулирование частоты вращения (привода лифтов, вентиляторов, станков). Достоинством такого способа является сохранение высоких экономических показателей при переходе с одной частоты вращения на другую, так как на всех ступенях переключения обмотки статора КПД и коэффициент мощности двигателя остаются практически неизменными. К недостаткам относят большую в сравнении с обычными АД сложность, завышенные габариты, большую стоимость. Кроме того, необходимость переключения обмоток статора на разное число пар полюсов требует усложнения коммутационной аппаратуры, что так же приводит к возрастанию цены электропривода в целом. В настоящее время этот способ вытесняется частотным регулированием.

#### 5.4.4. Частотное регулирование скорости асинхронного двигателя

Частотный способ регулирования скорости АД является преобладающим и основным. Чем это обуславливается? В первую очередь в настоящее время развита теория машин

переменного тока, что позволило найти оптимальные с некоторых позиций законы управления АД. Развитие промышленной электроники позволило в полной мере реализовать данные законы в «железе».

Существуют системы скалярного, векторного управления и системы прямого управления моментом. Выбор способа и принципа управления определяется совокупностью статических, динамических и энергетических требований к асинхронному электроприводу.

Принцип скалярного управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода основан на изменении частоты и текущих значений модулей переменных АД (напряжений, магнитного потока, потокосцеплений и токов цепей двигателя). Этот принцип является наиболее распространённым в связи с тем, что ему свойственна техническая простота измерения и регулирования переменных АД, а так же возможность построения разомкнутых систем управления скоростью. Основной недостаток заключается в трудности реализации желаемых законов регулирования скорости и момента АД в динамических режимах.

Принцип векторного управления связан как с изменением частоты и текущих значений переменных АД, так и с взаимной ориентацией их векторов в полярной или декартовой системе координат. Благодаря контролю положения углов переменных такой способ обеспечивает полное управление АД как в статических, так и в динамических режимах, что даёт заметное улучшение качества переходных процессов по сравнению со скалярным управлением.

Системы прямого управления моментом являются продолжением и развитием систем векторного управления. Задачей прямого управления моментом является обеспечение быстрой реакции электромагнитного момента двигателя на управляющее воздействие. В отличие от векторного управления, где изменение момента производится путем воздействия на ток статора, в системе с прямым управлением моментом управляемой величиной является потокосцепление статора.

Преобразователи частоты, предназначенные для частотно-регулируемых АД, подразделяются по типу связи с питающей сетью на непосредственные ПЧ (НПЧ) и

двухзвенные ПЧ (ДПЧ) с промежуточным звеном постоянного или переменного тока.

Момент АД пропорционален магнитному потоку  $\Phi$  и активной составляющей вторичного тока  $I'_2$  :

$$M = k\Phi I'_2 \cos \phi_2,$$

где  $k$  – конструктивная постоянная АД;  $\phi_2$  – угол сдвига между ЭДС и током ротора;

$$\cos \phi_2 = \frac{R'_2}{\sqrt{(R'_2)^2 + (X'_2)^2 s^2}}.$$

Из формулы для момента видно, что уменьшение магнитного потока, являющееся следствием увеличения частоты  $f_1$ , приведет к возрастанию  $I'_2$ , а следовательно и потерь в роторе  $\Delta P_2$  и одновременному уменьшению допустимого момента двигателя по условиям охлаждения двигателя. Уменьшение частоты при постоянстве амплитуды напряжения  $U_1$ , как было показано в п. 4.3.3, также не допустимо по условиям насыщения магнитной системы машины. Поэтому регулирование скорости двигателя изменением частоты питающего напряжения при условии постоянства момента двигателя приемлемо только при одновременном изменении амплитуды питающего напряжения, то есть выполнении закона  $U_1 / f_1 = const$ , что обеспечивает практически постоянный магнитный поток в двигателе.

Для реализации указанного закона управления между сетью и двигателем включается преобразователь частоты (ПЧ), обеспечивающий одновременное изменение частоты и амплитуды напряжения на двигателе. При пониженных скоростях у самовентилируемых двигателей уменьшается отвод тепла в окружающую среду, поэтому в таких случаях необходимо снижать допустимый момент на двигателе.

При частотном регулировании по причинам, обусловленным механической прочностью подшипников и элементами ротора, поднимать частоту выше  $(1,5 \div 2,0) f_{ном}$ . Поэтому основной способ регулирования скорости заключается в уменьшении частоты напряжения.

Для построения примерного вида механических характеристик примем, что  $R_1 \cong 0$ , тогда уравнение для критического момента можно переписать следующим образом:

$$M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 X_k} = \frac{3U_1^2}{2 \frac{2\pi f_1}{p} f_1 2\pi(L_1 + L_2')} = \frac{3U_1^2}{\frac{8\pi^2 f_1^2}{p} (L_1 + L_2')} = K_A \left( \frac{U_1}{f_1} \right)^2.$$

Из формулы видно, что критический момент при выполнении закона  $U_1/f_1 = const$  остаётся постоянным. Условие пренебрежения активного сопротивления статора корректно при высоких скоростях двигателя, когда  $U_1 \cong E_1$ . При низких скоростях падение напряжения на активном сопротивлении статора  $R_1$  становится сопоставимо с величиной напряжения на зажимах статора, что приводит к падению перегрузочной способности двигателя  $\lambda_M$ . Для того, чтобы реализовать одинаковую перегрузочную способность при частотном регулировании в области низких частот вращения используют так называемую «*IR-компенсацию*», которая заключается в том, что на малых скоростях делается добавка напряжения на статоре, компенсирующая  $\Delta U_{R1} = I_1^2 R_1$ .

Диапазон регулирования скорости в разомкнутых системах составляет  $D_\omega = 15 \div 20$ . В замкнутых системах диапазон может быть существенно расширен.

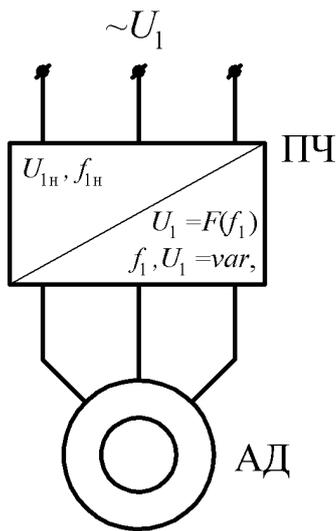


Рис. 5.14. Схема включения АД при частотном регулировании

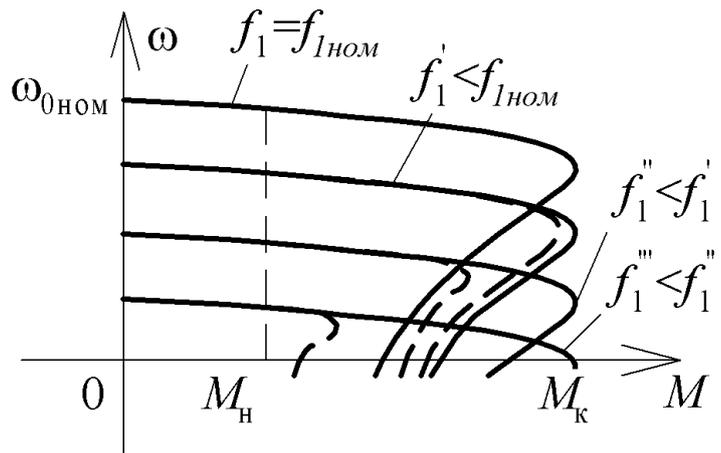


Рис. 5.15. Механические характеристики системы ПЧ-АД

Основные сложности, возникающие при реализации частотного управления заключаются в следующем:

- 1) для получения в системах ПЧ-АД свойств аналогичных (или даже превосходящих) свойства систем ТП- ДПТ необходимо получение информации о различных параметрах АД;
- 2) системы являются сильно нелинейными и для получения высококачественных систем необходимо вводить звенья, компенсирующие нелинейность объекта регулирования;
- 3) закон  $U_1 / f_1 = const$  не является оптимальным, и требуется корректировка закона, учитывающая  $M_c$  на валу двигателя;
- 4) в АД входят параметры  $X_0, X_1, X'_2$ , величина которых зависит от степени насыщения машины нелинейно. Кроме этого изменяются значения активных сопротивлений статора и ротора при изменении температуры обмоток двигателя, что также необходимо учитывать.

Несмотря на указанные сложности, современные частотные приводы успешно функционируют, обеспечивая высокое качество процесса регулирования скорости.

## **6. ОСНОВЫ ВЫБОРА МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

Основным требованием при выборе электродвигателя является его соответствие условиям технологического процесса рабочей машины. Задача выбора двигателя заключается в расчёте требуемой мощности, предварительном выборе двигателя с последующей проверкой его по условиям пуска, перегрузки и нагреву.

## 6.1. Потери энергии в электродвигателе

Для правильной оценки теплового режима двигателей важнейшим является нахождение потерь энергии, обуславливающих нагрев, на различных этапах рабочего периода. Суммарные потери в двигателе  $\Delta P_{\Sigma}$  состоят из двух составляющих: постоянных  $\Delta P_{const}$ , не зависящих от нагрузки, и переменных  $\Delta P_{var}$ , зависящих от нагрузки. В этом случае для двигателя постоянного тока

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{const} + \Delta P_{var} = \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех} + I_{я}^2 R_{я\Sigma},$$

где  $\Delta P_{ст}$  – потери в стали;  $\Delta P_{мех}$  – механические потери;  $I_{я}^2 R_{я\Sigma}$  – потери в цепи якоря.

Для асинхронного двигателя

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех} + 3(I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2'),$$

где  $3(I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2')$  – потери в обмотках статора и ротора соответственно.

Переменные потери также можно выразить через электромагнитный момент и относительную скорость (или скольжение). Для двигателей постоянного тока независимого возбуждения

$$\Delta P_{var} = P_{эм} - P_{мех} = M(\omega_0 - \omega),$$

где  $P_{эм}$  – электромагнитная мощность, потребляемая из сети;  $P_{мех}$  – механическая мощность на валу двигателя.

Для асинхронного двигателя

$$\Delta P_{var} = M \omega_0 s (1 + R_1 / R_2'),$$

где  $s$  – скольжение двигателя.

## 6.2. Нагрев и охлаждение двигателей

Процесс электромеханического преобразования энергии сопровождается одновременной потерей части энергии в самой машине, которая, преобразуясь в тепловую энергию, определяет нагрев её элементов. Мощность тепловых потерь  $\Delta P_T$  определяется разностью между потреблённой двигателем электрической энергией  $P_{эл}$  и отдаваемой механической энергией на валу двигателя  $P_{мех}$  и зависит от конкретного режима преобразования энергии. Поэтому определение функции  $\Delta P_T(t)$  является одной из задач при оценке теплового состояния машины в конкретном режиме; второй задачей является оценка температуры двигателя  $\Theta_{вд}$ .

Теория нагрева при решении задач электропривода базируется на следующих допущениях:

- двигатель рассматривается как однородное тело, имеющее бесконечную теплопроводность;
- теплоотдача во внешнюю среду пропорциональна первой степени разности температур двигателя и окружающей среды;
- температура охлаждающей среды постоянна.

При указанных допущениях уравнение баланса тепловой энергии в двигателе будет иметь следующий вид:

$$\Delta P_T(t)dt = A\tau dt + Cdt, \quad (6.1)$$

где  $\Delta P_T(t)$  – мощность тепловых потерь;  $A$  – теплоотдача;  $C$  – теплоёмкость двигателя;  $\tau$  – превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды,  $\tau = \Theta_{дв} - \Theta_c$ .

Перепишав (6.1) в операторной форме

$$\Delta P_T(p) = A\tau(p) + Cp\tau(p),$$

получим передаточную функцию, описывающую динамический характер изменения температуры двигателя:

$$W_\tau(p) = \frac{\tau(p)}{\Delta P_T(p)} = \frac{k_\tau}{T_H p + 1}, \quad (6.2)$$

где  $k_\tau = 1/A$  – коэффициент передачи;  $T_H = C/A$  – постоянная времени нагрева.

На рис. 6.1 представлены кривые нагрева и охлаждения двигателя.

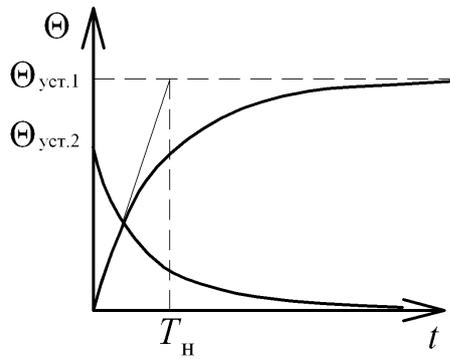


Рис. 6.1. Графики процессов нагрева и охлаждения двигателя

Значение постоянной времени нагрева в пределах одной серии может меняться от 10 мин до 2-3 часов в зависимости от габаритов двигателя.

Передаточная функция (6.2) справедлива, если параметры  $A$  и  $C$  остаются неизменными. У самовентилируемых двигателей теплоотдача зависит от скорости ротора и её характеризуют коэффициентом ухудшения теплоотдачи  $\beta_{Ai} = A_i / A$ .

### 6.3. Классы применяемой изоляции

Применяемые при изготовлении машин материалы имеют определённую нагревостойкость, поэтому для любых режимов работы ЭМП должно соблюдаться условие, чтобы температура его частей не превосходила некоторого предельно допустимого значения. Предел нагрева электрической машины определяется допустимой температурой изоляционных материалов, которая в свою очередь устанавливается исходя из необходимого срока службы изоляции. В электромашиностроении применяется несколько классов изоляции, каждый из которых имеет определённую допустимую температуру нагрева (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Классы нагревостойкости изоляции

Класс изоляции	Основные компоненты	Допустимая температура нагрева, °С
У	Волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка, натурального шёлка	90
А	х/б ткани, пряжа, бумага, целлюлоза, шелк	105
Е	Синтетические органические материалы (плёнки, смолы и др.)	120
В	Слюда, асбест, стекловолокно, связующие органические	130
Ф	То же; связующие синтетические	155
Н	То же; связующие кремнийорганические, кремнийорганические эластомеры	180
С	Слюда, керамика, кварц; связующие неорганические	>180

Температура изоляции обмоток определяется не только уровнем внутренних тепловыделений, но и температурой окружающей среды. Принято указывать уровень допустимых тепловых потерь в электрической машине в расчёте на температуру среды, равную 40 °С, поэтому иногда оперируют понятием превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды  $\tau$ .

Максимальная температура обмоток электродвигателя, при которой можно эксплуатировать электродвигатель,

зависит от класса изоляции электродвигателя. Класс изоляции электродвигателя указан на его бирке.

Классы изоляции определяются по стандартам, установленным Национальной Ассоциацией Производителей Электрооборудования (NEMA) для соответствия температуры двигателя требованиям, имеющим место в различных условиях окружающей среды. Сумма окружающей температуры 40°C и допустимой температуры нагрева дает максимальную температуру обмотки двигателя. Также допускается запас для точки в центре обмотки, где температура выше. Согласно тех же стандартов нормируются рекомендованные температуры обмоток (в абсолютной величине), при которых срок службы изоляции составит 20 000 часов. Превышение температуры изоляции на 10 градусов выше допустимой сокращает срок службы изоляции в два раза.

#### 6.4. Классификация режимов работы двигателей по нагреву

Возможные режимы работы электроприводов отличаются многообразием по характеру и длительности циклов, значениям нагрузок, условиям охлаждения и т.д., поэтому изготовление двигателей для каждого из режимов не целесообразно. На основании анализа реальных режимов выделен специальный класс режимов – номинальные режимы, для которых проектируются и изготавливаются серийные двигатели.

ГОСТ 183-74 (2001) предусматривает 8 номинальных режимов, которые имеют обозначения S1-S8. Ниже дана краткая характеристика часто встречающихся режимов.

1. *Продолжительный* номинальный режим (S1) – это режим работы при неизменной нагрузке, продолжающийся до тех пор, пока превышения температур всех частей электрической машины не достигнут установившихся значений (рис. 6.2,а).

2. *Кратковременный* номинальный режим (S2) работы – это такой режим, при котором период неизменной номинальной нагрузки  $t_p$  чередуется с периодом отключения машины, при этом за время работы двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время паузы охлаждается до температуры окружающей среды (рис.6.2,б). Продолжительность периода включения  $N$  должна составлять 10, 30, 60 или 90 минут.

3. *Повторно-кратковременный* номинальный режим (S3) работы – это такой режим, при котором периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами пауз, при чём во время работы температура не достигает установившейся, а за время пауз двигатель не успевает остыть до температуры окружающей среды (рис. 6.2,в). Этот режим работы принято характеризовать продолжительность включений  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{t_p}{t_p + t_n}.$$

Продолжительность одного цикла составляет 10 мин. Стандартные значения  $\varepsilon$  могут составлять 0,15; 0,25; 0,40 и 0,60.

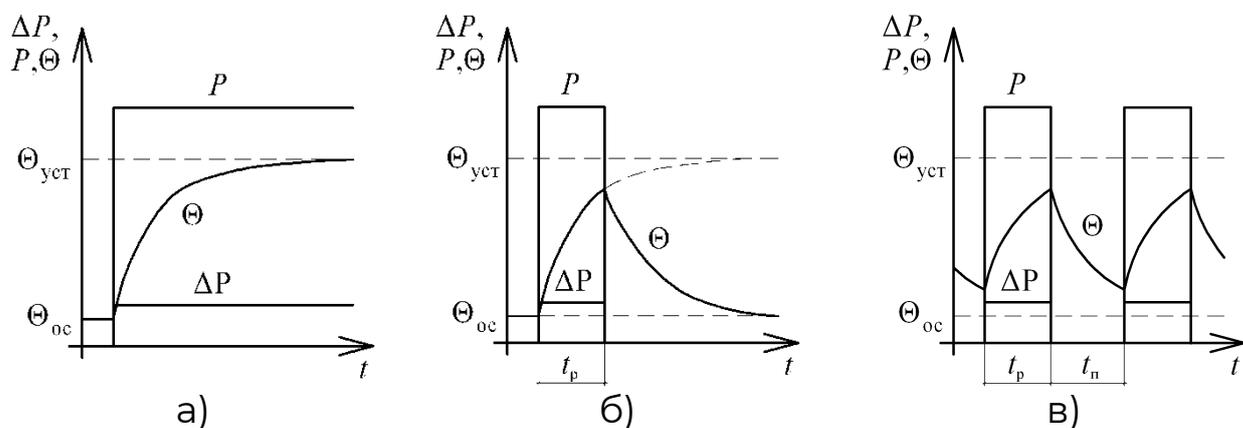


Рис. 6.2. Графики мощности и температуры для номинальных режимов

(а – длительный, б – кратковременный, в – повторно-кратковременный)

Режимы S1- S3 являются основными номинальные данные для которых включаются в паспорт машины и каталоги. Режимы S4- S8 призваны упростить задачу эквивалентирования произвольного режима номинальному.

4. *Повторно-кратковременный номинальный режим работы с частыми пусками (S4)*. В этом режиме, в отличие от S3, пусковые потери оказывают существенное влияние на превышение температуры частей машины.

5. *Повторно-кратковременный номинальный режим работы с частыми пусками и электрическим торможением*. То же, что и S4. Дополнительно к потерям при пусках учитываются потери при торможениях.

6. *Перебегающий режим работы (S6)*. Отличается от S3 тем, что во время пауз двигатель не отключается, а продолжает работать вхолостую.

7. *Перебегающий режим с частыми реверсами (S7) при электрическом торможении*. То же что и S6 с учётом потерь при частых реверсах двигателя, которые оказывают существенное влияние на нагрев машины.

8. *Перебегающий режим с двумя и более частотами вращения (S8)*. То же что и S7, только двигатель работает на двух и более установившихся скоростях.

## 6.5. Расчёт мощности и проверка по нагреву двигателя

### 6.5.1. Продолжительный режим работы

В соответствии с уравнением движения электропривода для одномассовой системы момент двигателя на различных этапах работы определяется текущими значениями статической и динамической нагрузки электропривода:

$$M(t) = M_c(t) + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}.$$

Зависимость момента двигателя от времени  $M(t)$  называется нагрузочной диаграммой двигателя и является главной характеристикой, используемой при расчётах, связанных с выбором мощности электродвигателя. Основой для расчёта нагрузочных диаграмм являются информация о статическом моменте на каждом этапе работы  $M_c(t)$ , называемую нагрузочной диаграммой механизма, и сведения о характере движения электропривода в технологическом процессе, задаваемые тахограммой электропривода  $\omega(t)$ .

Производственных механизмов с точки зрения режимов работы электропривода разделяют на две группы: механизмы непрерывного и механизмы циклического действия. Соответственно имеют особенности и методики выбора и проверки двигателя на нагрев.

#### 6.5.1.1. Расчёт мощности при неизменной нагрузке

Особенностью механизмов непрерывного действия является продолжительный режим работы двигателя при неизменной средней скорости  $\omega_{cp} = const$ . При этом время динамических режимов (пуск, торможение, реверс) настолько мало по сравнению с общим временем работы на каждом включении, что существенного влияния на нагрев двигателя динамические режимы не оказывают и при построении нагрузочных диаграмм их можно не учитывать.

Расчётный момент двигателя можно найти по соотношению

$$M_p \geq k_3 M_{c,3},$$

где  $k_3 = 1,1 \div 1,3$  – коэффициент запаса, учитывающий динамические режимы электродвигателя;  $M_{c,3}$  – эквивалентный момент нагрузки.

Тогда расчётную мощность двигателя  $P_p$  можно определить по формуле

$$P_p = M_p \omega_p.$$

По полученному значения по каталогу выбирается двигатель ближайшей большей мощности и скорости, после чего выбранный двигатель проверяется по перегрузочной способности. Для этого на нагрузочной диаграмме определяют участок максимального динамического момента  $M_{д.мах}$  и сравнивают его с допустимым моментом двигателя

$$M_{д.мах} < M_{дв.доп} = \lambda_M M_{ном},$$

где  $\lambda_M$  – допустимый коэффициент перегрузки двигателя по моменту, указывается в паспортных данных на двигатель.

Для ДПТ обычного исполнения и синхронных двигателей  $\lambda_M = 1,5 \div 2,5$ , для АД максимальный момент двигателя может быть принят равным критическому. При выбора АД с КЗР также необходимо проверить двигатель по условиям пуска:

$$M_{дв.п} > M_{с.п}.$$

#### 6.5.1.2. Проверка двигателя по нагреву при переменной нагрузке

Двигатель будет работать в допустимом тепловом режиме при выполнении условия

$$\tau_{раб} < \tau_{доп}, \quad (6.3)$$

где  $\tau_{раб}$  – перегрев двигателя при работе;  $\tau_{доп}$  – допустимый перегрев двигателя, определяемый классом его изоляции.

Проверка двигателя по нагреву может быть выполнена прямым или косвенным методами. Использование прямого метода предполагает расчёт и построение кривой перегрева  $\tau(t)$  за цикл работы двигателя. Применение прямого метода требует наличия математической модели теплового режима двигателя, что является трудоёмкой задачей, так как точное описание процессов нагрева и охлаждения двигателя довольно сложное. Поэтому обычно используют косвенные методы проверки, не требующие построения графика  $\tau(t)$ .

##### 6.5.1.2.1. Метод средних потерь

Метод является наиболее точным и универсальным. Суть метода заключается в определении средних потерь мощности  $\Delta P_{ср}$  за цикл работы двигателя и сопоставление их с номинальными потерями мощности  $\Delta P_{ном}$ . Для получения конечного соотношения составим закон сохранения энергии за цикл работы в квазиустановившемся режиме. Всё выделенное за цикл тепло отводится в окружающую среду, т.е.

$$A\tau_{\text{cp}}t_{\text{ц}} = \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P(t) dt.$$

Тогда средний перегрев двигателя за время цикла  $t_{\text{ц}}$  составляет

$$\tau_{\text{cp}} = \int_0^{t_{\text{ц}}} \frac{\Delta P}{A} dt = \frac{\Delta P_{\text{cp}}}{A}. \quad (6.4)$$

По аналогии номинальные потери мощности в двигателе определяют его допустимый нагрев

$$\tau_{\text{доп}} = \frac{\Delta P_{\text{ном}}}{A}. \quad (6.5)$$

Подставив (6.4) и (6.5) в (6.3) получим основное расчётное соотношение метода средних потерь:

$$\Delta P_{\text{cp}} \leq \Delta P_{\text{ном}}.$$

С учетом (6.2) и (6.5) можно получить формулировку метода средних потерь: если средняя за цикл мощность потерь не превосходит номинальную мощность потерь, то среднее превышение температуры не превышает допустимое превышение температуры.

Если на отдельных участках цикла нагрузка постоянна, то средние потери определяются по формуле

$$\Delta P_{\text{cp}} = \sum_1^n \Delta P_i t_i / t_{\text{ц}}.$$

Номинальные потери мощности двигателя определяются по каталожным данным по формуле

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} (1 - \eta_{\text{ном}}) / \eta_{\text{ном}}.$$

Метод средних потерь позволяет оценить тепловой режим работы двигателя по среднему превышению температуры. В этом заключается определённая погрешность метода, так как максимальный перегрев двигателя на отдельных участках цикла может превышать  $\tau_{\text{cp}}$ . Точность оценки нагрева этим методом тем выше, чем больше разница между величинами постоянной времени нагрева  $T_{\text{н}}$  и длительностью наиболее продолжительного участка цикла работы двигателя  $t_{\text{max}}$ , то есть метод возможно использовать только при выполнении условия

$$t_{\text{ц}} \ll T_{\text{н}}.$$

Метод средних потерь требует знания кривой КПД двигателя в функции его нагрузки и предварительного определения потерь на каждом из участков нагрузочной диаграммы, что усложняет расчёт.

Часто оказывается приемлемым использование методов эквивалентных величин, позволяющих провести проверку двигателя по нагреву более просто. К таким методам относят метод эквивалентного тока, момента и мощности.

### 6.5.1.2.2. Методы эквивалентных величин: тока, момента, мощности

Если в результате построения нагрузочной диаграммы есть данные о кривых тока в функции времени, то при некоторых условиях можно провести проверку двигателя по нагреву без вычисления потерь, воспользовавшись методом эквивалентного тока.

Потери в двигателе можно рассматривать как сумму постоянных потерь, не зависящих от нагрузки, и переменных потерь, определяемых нагрузкой.

Эквивалентный ток – это такой неизменяющийся ток, при работе с которым в электрическом двигателе выделяются потери, равные средним потерям при переменном графике нагрузки, то есть

$$\Delta P_{\text{cp}} = \Delta P_{\text{const}} + I_{\text{экв}}^2 R. \quad (6.5)$$

Средняя мощность потерь за цикл при переменном графике нагрузки двигателя и продолжительном режиме работы

$$\Delta P_{\text{cp}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}. \quad (6.5)$$

Подставив (6.5) в (6.6) после преобразований получим формулу для определения эквивалентного тока:

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_{\text{ц}}}}$$

или в общем случае

$$I_{\text{экв}} = \frac{1}{t_{\text{ц}}} \sqrt{\int_0^{t_{\text{ц}}} i^2(t) dt}.$$

Двигатель проходит по условиям нагрева, если выполняется условие

$$I_{\text{экв}} \leq I_{\text{ном}}.$$

Метод эквивалентного тока исходит из предположения независимости потерь в стали и механических от нагрузки и предполагает постоянство сопротивления главной цепи двигателя на всех участках заданного графика нагрузки. Следовательно, когда постоянные потери не являются таковыми (изменение напряжения на АД) или сопротивление не остаётся постоянной величиной (АД с глубоким пазом в режиме переменного скольжения), метод эквивалентного тока может привести к существенным погрешностям.

В ряде случаев оказывается удобно использовать для проверки по нагреву график момента, развиваемого

двигателем, в функции времени. Если поток двигателя постоянен, то между моментом и током существует пропорциональная связь. Поэтому оказывается возможным проверка двигателя *методом эквивалентного момента*, который для ступенчатого графика вычисляется по формуле

$$M_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i^2 t_i) / t_{\text{ц}}} .$$

где  $M_i, t_i$  – соответственно момент и длительность  $i$ -ого участка нагрузочной диаграммы.

Двигатель проходит по условиям нагрева, если выполняется условие

$$M_{\text{ЭКВ}} \leq M_{\text{НОМ}} .$$

Метод применяется для проверки по нагреву всех двигателей при условии работы с постоянством потока.

Если нагрузочная диаграмма двигателя задана в виде графика мощности, то проверка двигателя по нагреву может быть выполнена непосредственно по графику мощности, но лишь тогда, когда между мощностью и током существует прямая пропорциональность, что имеет место при работе двигателя с постоянством потока и скорости.

Для ступенчатого графика нагрузки эквивалентная мощность вычисляется по формуле

$$P_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} .$$

### 6.5.2. Повторно-кратковременный режим работы

В случае, когда двигатель работает в повторно-кратковременном режиме проверку по нагреву можно выполнять указанными выше методами после приведения продолжительности включения  $\varepsilon$  для конкретного режима к стандартной  $\varepsilon_{\text{НОМ}}$ . Эквивалентные значения величин вычисляются по формулам

$$I_{\text{ЭКВ}} = I_{\text{ЭКВ.}\varepsilon} \sqrt{\frac{\varepsilon}{k_{\text{п}} (\varepsilon - \varepsilon_{\text{НОМ}}) + \varepsilon_{\text{НОМ}}}} ;$$

$$M_{\text{ЭКВ}} = M_{\text{ЭКВ.}\varepsilon} \sqrt{\frac{\varepsilon}{k_{\text{п}} (\varepsilon - \varepsilon_{\text{НОМ}}) + \varepsilon_{\text{НОМ}}}} ;$$

$$P_{\text{ЭКВ}} = P_{\text{ЭКВ.}\varepsilon} \sqrt{\frac{\varepsilon}{k_{\text{п}} (\varepsilon - \varepsilon_{\text{НОМ}}) + \varepsilon_{\text{НОМ}}}} ,$$

где  $k_{\text{п}} = \Delta P_{\text{const}} / \Delta P_{\text{var}}$  – коэффициент потерь.

Если величина постоянных потерь существенно меньше переменных, то слагаемым  $k_{\Pi}(\varepsilon - \varepsilon_{\text{НОМ}})$  можно пренебречь, при этом формулы для эквивалентных величин упрощаются.

При пренебрежении постоянными потерями ( $k_{\Pi} \ll 1$ ) и использовании двигателя, предназначенного для продолжительного режима работы ( $\varepsilon_{\text{НОМ}} = 1$ ), получим

$$I_{\text{ЭКВ}} = I_{\text{ЭКВ.}\varepsilon} \sqrt{\varepsilon}; M_{\text{ЭКВ}} = M_{\text{ЭКВ.}\varepsilon} \sqrt{\varepsilon}; P_{\text{ЭКВ}} = P_{\text{ЭКВ.}\varepsilon} \sqrt{\varepsilon}.$$

Формулы справедливы при условии постоянства теплоотдачи в период пауз (например, двигатели с принудительным охлаждением).