

**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Автоматизированный электропривод»**

**В. С. Захаренко, А. В. Козлов**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД  
РАБОЧИХ МАШИН  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**КУРС ЛЕКЦИЙ  
по одноименной дисциплине  
для студентов специальности 1-43 01 03  
«Электроснабжение (по отраслям)»  
дневной и заочной форм обучения**

**Гомель 2011**

УДК 62-83(075.8)  
ББК 31.291я73  
3-38

*Рекомендовано научно-методическим советом  
факультета автоматизированных и информационных систем  
ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 11 от 27.06.2011 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук, доц. *О. Г. Широков*

**Захаренко, В. С.**

3-38      Электрический привод рабочих машин промышленных предприятий : курс лекций по  
одноим. дисциплине для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение  
(по отраслям)» днев. и заоч. форм обучения / В. С. Захаренко, А. В. Козлов. – Гомель :  
ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011. – 199 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron  
300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acro-  
bat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Рассмотрены вопросы, связанные с принципами работы электроприводов рабочих машин про-  
мышленных предприятий. Приведены формульные зависимости, описывающие конкретные электро-  
приводы.

Для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» дневной и заоч-  
ной форм обучения.

**УДК 62-83(075.8)  
ББК 31.291я73**

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2011

## Введение

Понятие “*Электропривод*” можно рассматривать как:

1. Процесс приведения в движение машин и механизмов с помощью электрической энергии.
2. Устройство, обеспечивающее данный процесс.
3. Теория, изучающая как сам процесс, так и устройство.

Рассмотрим роль процесса и устройства в промышленности.

В производственных процессах огромную роль на качество и количество выпускаемой продукции оказывает процесс получения механической энергии с заданными параметрами. Причем, ее основным источником является электромеханический преобразователь (ЭМП) – электродвигатель.

Во время работы технологических установок и машин происходит изменение скоростей и положений рабочих органов, согласование их движений. Непосредственное управление механической энергией приводит к применению сложных, ненадежных и громоздких устройств (кулачковые механизмы, фрикционные вариаторы, управляемые муфты и т.д.). Гораздо проще и надежнее управлять подводимой электрической энергией. Силовые преобразователи электрической энергии надежны, имеют высокую точность получения заданных параметров при регулировании. А использование ЭМП для каждого исполнительного механизма технологической машины позволяет достаточно просто автоматизировать управление.

Таким образом, устройство ЭП, в которое вводят ЭМП и силовой преобразователь оказывает существенное влияние как на конструкцию рабочей машины, так и на технологический процесс.

Рассмотрим этапы развития электропривода и оценим его влияние на технологические машины. Первые образцы электрического привода появились в конце 19 века при замене парового двигателя на электрический. При этом один двигатель применялся для всей фабрики, или в лучшем случае для одного цеха: механическая энергия (МЭ) от ЭД передавалась к рабочим машинам (РМ) и к исполнительным механизмам (ИМ) с помощью длинных валов и ременных передач. По мере расширения выпуска ЭД и их номенклатуры отдельные двигатели начали устанавливать для групп РМ, расположенных рядом. Такой подход в принципе не меняет сути РМ и технологического процесса. А подобный вид привода получил название **группового электропривода**.

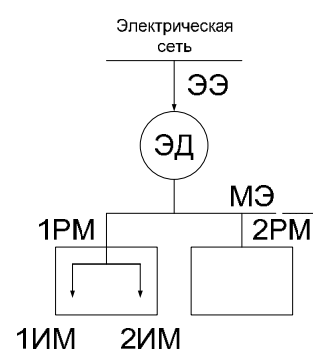


Рис. 1.1. Групповой электропривод.

Его главной особенностью является невозможность управления технологическим процессом с помощью систем управления, а главным недостатком – кинематические цепи. К групповому электроприводу по этим показателям можно отнести и такой, когда один двигатель РМ приводит в действие несколько её ИМ.

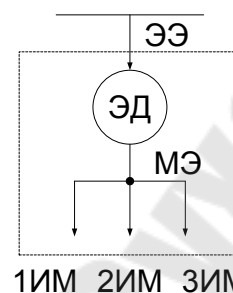


Рис. 1.2. Групповой электропривод.

Дальнейшим развитием явился **индивидуальный ЭП**, при котором каждый ИМ приводится в действие отдельным ЭД, или даже несколькими (**многодвигательный**):

Применение индивидуального ЭП позволило упростить механику РМ, резко расширить функции управления, повысить точность и качество технологического процесса.

Следует отметить, что современный ЭП является **индивидуальным автоматизированным** и в соответствии со стандартами на термины и определения:

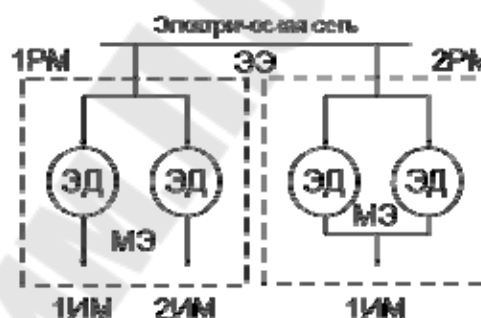


Рис. 1.3. Индивидуальный электропривод.

**Электрическим приводом** называется электромеханическое устройство, предназначенное для приведения в движение рабочих органов машин и управления их технологическим процессом, состоящее из передаточного устройства, электродвигательного устройства, системы управления.

**Передаточное устройство** содержит механические передачи и соединительные муфты, необходимые для передачи вырабатываемой двигателем механической энергии исполнительному механизму.

**Преобразовательное устройство** предназначается для управления потоком электрической энергии, поступающей из сети, с целью регулирования режимов работы двигателя и механизма. Оно представляет собой энергетическую исполнительную часть системы управления электроприводом.

**Управляющее устройство** представляет собой информационную слаботочную часть системы управления, предназначенную для фиксации и обработки поступающей информации о задающих воздействиях, о состоянии системы и выработке на её основе сигналов управления преобразовательным, электродвигательным и передаточным устройствами.

Таким образом, структуру современной системы АЭП можно показать в виде, показанном на рис. 4.

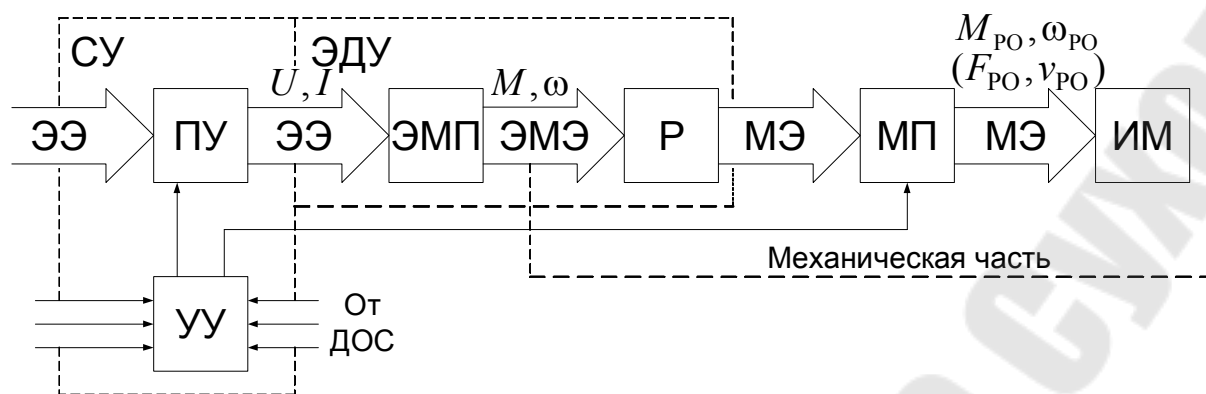


Рис. 1.4. Структура системы АЭП.

ЭД представлен в виде двух устройств: ЭМП – электромеханический преобразователь – как идеальный двигатель, ротор которого не имеет инерции и механических потерь. Он развивает электромагнитный момент  $M$  при скорости  $\omega$ , т.е. вырабатывает электромагнитную энергию, передаваемую в реальный ротор  $P$ ; МП – механическая передача ПУ – преобразовательное устройство – силовая часть системы управления СУ; УУ – управляющее устройство – слаботочная информационная часть УУ, которое получает командные сигналы от задающих устройств и от датчиков обратных связей ДОС при их наличии.

В настоящее время АЭП получил широкое применение во всех сферах жизнедеятельности общества. И поскольку от него зависит автоматизация, качество технологического процесса, то совершенствование его технических показателей является одним из важнейших направлений технического прогресса. Отметим основные направления развития самого ЭП в настоящее время:

1. Расширение сферы применения регулируемого ЭП постоянного и переменного тока с использованием тиристорных и транзисторных силовых преобразователей.
2. За счет интенсивного повышения технических требований к статическим и динамическим показателям ЭП, расширения и усложнения его функций возрастает сложность САУ. Развитие последних, как правило, идет по пути использования ВТ в основном на базе МП. Выбор соответствующего рода САУ определяется конкретными технологическими требованиями и представляет одну из важнейших задач при проектировании ЭП.
3. Унификация элементарной базы и выпуск унифицированных комплектных ЭП при использовании блочно-модульного принципа в конструкции.
4. Упрощение кинематической цепи (приближение к последнему валу ИМ) и создание безредукторных ЭП за счет применения ЭД

соответствующей конструкции: тихоходных (с  $n_n=18\div 120$  об/мин), линейных, дугостаторных, с катящимся ротором и др.

Структуру теории ЭП в настоящее время можно разделить на три части:

**I** «Общая теория ЭП» - занимается изучением механики и свойств ЭМП, статических и динамических свойств разомкнутых систем, энергетических процессов в ЭП.

**II** «Системы управления электроприводами» - изучает свойства отдельных видов систем, оптимизацию управления ими.

**III** «Электропривод конкретных рабочих машин» (Типовой электропривод промышленных установок; Автоматизация технологических процессов и установок) – занимается рассмотрением и разработкой типовых и конкретных систем на основе характерных особенностей РМ и технологических процессов.

## **1. Механика электропривода**

### **1.1. Приведение моментов, сил и жесткостей**

При анализе и синтезе ЭП использовать непосредственно кинематические схемы неудобно, поскольку отдельные массы движутся с разными скоростями, с разными видами движения. Поэтому все параметры элементов кинематической цепи обычно приводят к одной расчётной скорости – к угловой скорости ЭД  $\omega$ , т.е. составляют приведённую расчётную схему.

Условием соответствия приведённой расчётной схемы реальной механической системе является выполнение закона сохранения энергии, т.е. равенство запасённых кинематической и потенциальной энергий и равенство элементарной работы всех действующих сил и моментов на возможных перемещениях.

Обозначим в механической системе номера вращательно движущихся сосредоточенных масс через  $k=1\dots n$ , а поступательно –  $j=1\dots l$ . Вращающийся элемент с моментом инерции  $J_k$  связан с  $(k+1)$ -ым элементом механической связью, обладающей жесткостью  $c_k$  а поступательно движущийся элемент с массой  $m_j$  связан с  $(j+1)$ -ым элементом связью с жесткостью  $c_j$ .

Приведение моментов инерции и масс производится на основании сохранения запаса кинетической энергии:  $W_{k,пр} = W_k$ . Тогда для  $k$ -го элемента:

$$\frac{J_k \cdot \omega_k^2}{2} = \frac{J_{k.\text{пр.}} \cdot \omega^2}{2}, \text{ или } J_{k.\text{пр.}} = \frac{J_k}{i_k^2},$$

где  $i_k = \frac{\omega}{\omega_k}$  - коэффициент передачи от вала ЭД к  $k$ -у валу.

Для поступательно движущегося  $j$ -го элемента:

$$\frac{m_j \cdot v_j^2}{2} = \frac{J_{j.\text{пр.}} \cdot \omega^2}{2}, \text{ или } J_{j.\text{пр.}} = m_j \cdot \rho_j^2,$$

$\rho_j = \frac{v_j}{\omega}$  - радиус приведения линейной скорости  $v_j$  к угловой скорости ЭД  $\omega$ .

Приведение угловых  $\varphi$  и линейных  $s$  перемещений проводится с учетом соотношения скоростей. В общем случае:

$$d\varphi_{k.\text{пр.}} = i_k \cdot d\varphi_k \text{ и } d\varphi_{j.\text{пр.}} = \frac{ds_j}{\rho_j},$$

а при линейных механических связях ( $i_k, \rho_j = \text{const}$ ) полные перемещения:

$$\varphi_{k.\text{пр.}} = i_k \cdot \varphi_k \text{ и } \varphi_{j.\text{пр.}} = \frac{s_j}{\rho_j}.$$

Приведение моментов и сил статического сопротивления производится на основании равенства элементарной работы на возможных перемещениях:

$$M_k \cdot d\varphi_k = M_{k.\text{пр.}} \cdot d\varphi_{k.\text{пр.}}, M_{k.\text{пр.}} = \frac{M_k}{i_k} \text{ и } F_j \cdot ds_j = M_{j.\text{пр.}} d\varphi_{j.\text{пр.}}, M_{j.\text{пр.}} = F_j \cdot \rho_j.$$

Жесткость упругих связей в пределах, в которых выполняется закон Гука, можно представить: при скручивании  $c_k = \frac{M_{\text{кр.}}}{\Delta\varphi_k}$ , при линейной

деформации  $c_j = \frac{F_p}{\Delta s}$ , где  $M_{\text{кр.}}$ ,  $F_p$  - соответственно крутящий момент и усилие растяжения или сжатия, а  $\Delta\varphi_k$  и  $\Delta s$  - деформации механических связей.

Приведение жесткостей производится из условия равенства потенциальной энергии  $W_{\text{п.пр}} = W_{\text{п}}$ . Таким образом:

$$\frac{c_k \cdot \Delta\varphi_{k\text{пр}}^2}{2} = \frac{c_{\text{кпр}} \cdot \Delta\varphi_{\text{кпр}}^2}{2}, \quad \text{откуда} \quad c_{\text{кпр}} = \frac{c_k}{i_k^2} \quad \text{при кручении и}$$

$$\frac{c_j \cdot \Delta s_j^2}{2} = \frac{c_{\text{жпр}} \cdot \Delta\varphi_{\text{жпр}}^2}{2} \quad \text{при линейной деформации, } c_{\text{жпр}} = c_j \cdot \rho_j^2.$$

Теперь суммарные параметры механической части, приведенные к скорости ЭД:

$$J = J_{\text{д}} + \sum_k \frac{J_k}{i_k^2} + \sum_j m_j \cdot \rho_j^2, \quad (1.1)$$

$$\frac{1}{c_{\text{экв}}} = \sum_k \frac{i_k^2}{c_k} + \sum_j \frac{1}{c_j \cdot \rho_j^2}. \quad (1.2)$$

Суммарный приведенный статический момент  $M_{\text{с}}$  зависит от направления потока энергии. Оно определяется знаком приведенного полезного момента, присутствующего на валу ИМ (например, разные направления при подъеме и спуске груза). При этом, если поток энергии направлен от ЭД к рабочему органу (РО), то потери в кинематической цепи вызывают увеличение приведенного момента на их величину:

$$\Delta M_{\text{кпр}} = \left[ \frac{M_k}{\eta_k} - M_k \right] \cdot \frac{1}{i_k} = \frac{M_k}{i_k} \cdot \left( \frac{1}{\eta_k} - 1 \right),$$

а полный приведённый:

$$M_{\text{кпр}} = \frac{M_k}{i_k \cdot \eta_k}.$$

Для ветви кинематической цепи с обратным направлением потока потери компенсируются энергией, поступающей от РО, и тогда:

$$-M'_{\text{кпр}} = \frac{-M'_k}{i'_k} \cdot \eta'_k, \quad \text{где } \eta'_k \text{ - КПД передачи при обратном направлении}$$

потока, так как в общем случае  $\eta \neq \eta'$ . Теперь обобщенная формула для суммарного статического момента с учетом разных направлений потоков энергий:



$$M_C = \Delta M + \sum_k \left( \frac{M_k}{i_k \cdot \eta_k} - \frac{M'_k}{i'_k} \cdot \eta'_k \right) + \sum_j \left( \frac{F_j \cdot \rho_j}{\eta_j} - F'_j \cdot \rho_j \cdot \eta'_j \right) \quad (1.3)$$

где  $\Delta M$  - момент механических потерь в ЭД, составляющий  $\Delta M = (0,01 \div 0,05) \cdot M_H$  и которым в некоторых практических случаях можно пренебречь.

## 1.2. Расчетные схемы механической части

Механическая часть ЭМС, то есть ЭП включает в себя все движущиеся и связанные между собой массы: ротор ЭД, элементы передаточного устройства, РО. Полное представление о движущихся массах и связях между ними дает кинематическая схема. Для наглядности рассмотрим механизм подъема с одноступенчатым редуктором. ЭД с моментом инерции  $J_d$ ; СМ – соединительные муфты с моментами инерции  $J_1, J_4, J_5$ ; Р – редуктор с двумя шестернями, обладающими  $J_2$  и  $J_3$ ; Б – барабан грузоподъемной лебедки с  $J_6$ ; К – канат, массой  $m_K$  и весом  $G_K$ , обладающий жесткостью  $c_6$ ; Гр – груз массой  $m_{Гр}$  и весом  $G_{Гр}$ ;  $F_{II}$  - усилие натяжения каната, определяемое  $G_K + G_{Гр}$ .

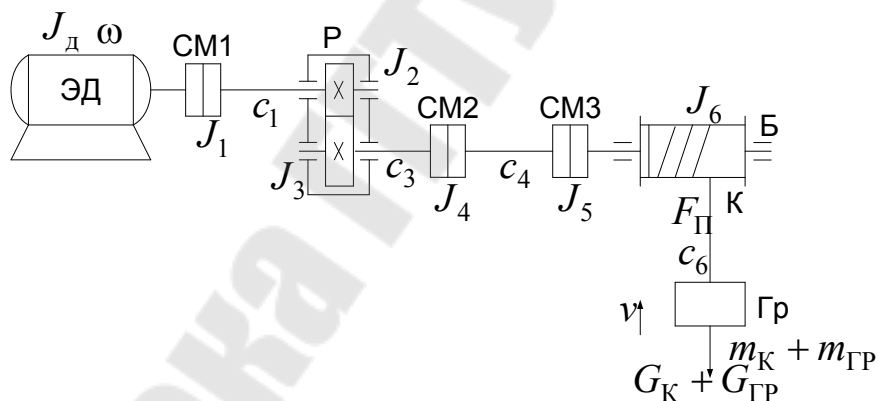


Рис. 1.1. Кинематическая схема.

Рассмотрим порядок составления расчетных схем. Для их составления предварительно все движущие массы, моменты, усилия приводятся к скорости двигателя, т.е. составляется приведенная схема. На ней массы представляются прямоугольниками или кругами, площадь которых пропорциональна моменту инерции. Механические связи показываются линиями, длина которых обратно пропорциональна жесткости связи.

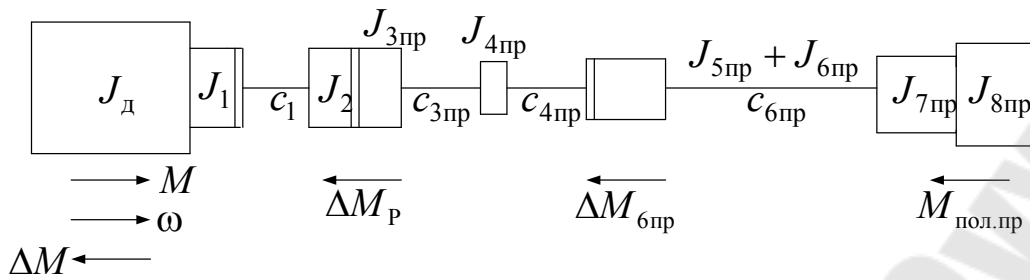


Рис. 1.2. Расчетная схема механической части.

Моменты инерции  $J_{7пр}$  и  $J_{8пр}$  определяются массами  $m_k + m_{гр}$ .

Для правильного учета всех моментов и потерь необходимо указать положительное направление скорости (подъем). После этого можно указать и направление действия моментов потерь на трение в подшипниках и барабане. Полезный статический момент  $M_{пол}$  определяется весом каната и груза.  $\Delta M_{б.пр}$  состоит из потерь на трение в подшипниках и каната о барабан.

Однако подобной полной схемой обычно не пользуются. Для исследований и расчетов применяют обобщенные трех-, двух- или одномассовую схему. В последнем случае ЭП представляют в виде жесткого приведенного звена.

При составлении обобщенных схем за основу берут механические связи с наименьшими жесткостями, а затем суммируют моменты инерции и моменты сопротивления справа и слева.

Трехмассовая схема используется, когда необходимо достаточно точно исследовать движение механической части при математическом моделировании.

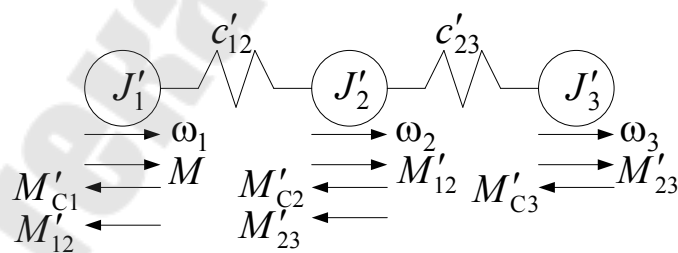


Рис. 1.3. Трехмассовая схема.

Для данного механизма связями, обладающими наименьшей жесткостью будут канат и длинный вал от СМ2 до СМ3. Таким образом:

$$c'_{23} = c_{6пр}, \text{ а } \frac{1}{c'_{12}} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_{3пр}} + \frac{1}{c_{4пр}}.$$

Моменты инерции обобщенной схемы:

$$J'_1 = J_d + J_1 + J_2 + J_{3пр} + J_{4пр};$$

$$J'_2 = J_{5пр} + J_{6пр}; J'_3 = J_{7пр} + J_{8пр}.$$

Статические моменты:

$$M'_{C1} = \Delta M + \Delta M_p; M'_{C2} = \Delta M_{Бпр}; M'_{C3} = M_{пол.пр}.$$

В динамических режимах, из-за наличия упругих связей, мгновенные значения скоростей отдельных масс различны ( $\omega_1 \neq \omega_2 \neq \omega_3$ ).

При деформации упругой связи возникает момент упругого взаимодействия:  $M'_{12} = c'_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)$  и  $M'_{23} = c'_{23}(\varphi_2 - \varphi_3)$ , где  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  и  $(\varphi_2 - \varphi_3)$  - деформации связей.

Когда необходимо исследовать движения ЭД и РО ИМ, или существует связь в цепи с намного меньшей жесткостью, то применяют двухмассовую схему.

Параметры данной схемы:

$$\frac{1}{c''_{12}} = \frac{1}{c'_{12}} + \frac{1}{c'_{23}}; J''_1 = J'_1 + J'_2; J''_2 = J'_3;$$

$$M''_{C1} = M_{C1} + M_{C2}; M''_{C2} = M_{C3};$$

$$M''_{12} = c''_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2).$$

Наименьшая жёсткость у каната.

В тех случаях, когда влияние упругих связей незначительно или нет необходимости в их учете, то механическую часть рассматривают жестким приведенным звеном, т.е. одномассовой схемой с суммарным моментом инерции:

$$J = J''_1 + J''_2 = J_d + \sum_k J_{кпр} + \sum_j J_{jпр},$$

и статическим моментом сопротивления:

$$M_C = M''_{C1} + M''_{C2} = \Delta M + \sum_k \Delta M_{кпр} + \sum_j \Delta M_{jпр} + M_{пол.пр}$$

Следует иметь в виду, что ряд механизмов дают разветвленные схемы. Например, лифт с противовесом.  $J_1$  – ЭД и жестко связанные с ним элементы цепи;  $J_2$  – канатопроводящий шкив;  $J_3$  – кабина с грузом;  $J_4$  – противовес.

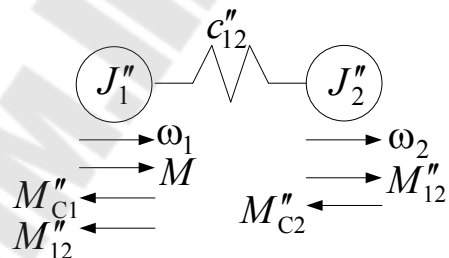


Рис. 1.4. Двухмассовая схема

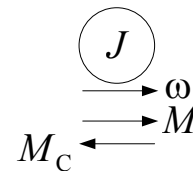


Рис. 1.5. Одномассовая схема

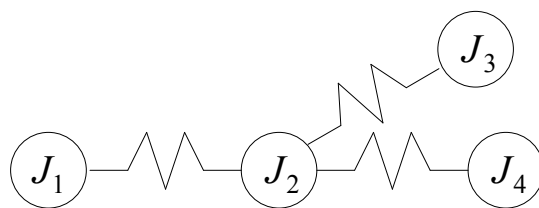


Рис. 1.6. Разветвленная схема.

### 1.3. Механические характеристики исполнительных механизмов

В соответствии со структурой ЭП электромагнитный момент  $M$  является выходным для электрической части и входным для механической. Все остальные силы и моменты, за исключением упругого взаимодействия, создают статическую нагрузку. В одномассовой схеме они объединены

$$M_C = \left( \Delta M + \sum_k \Delta M_{кпр} + \sum_j \Delta M_{jпр} \right) + M_{\Sigma пол.пр},$$

где в скобках представлена сумма механических потерь от всех моментов и сил.

Суммарный полезный приведенный момент определяется необходимой полезной работой, совершаемой исполнительным механизмом.

Силы и моменты полезной нагрузки могут иметь разный характер и по-разному зависеть от скорости. Поэтому вводится понятие механической характеристики ИМ, которую представляют в виде зависимости:

$$M_C = f(\omega) \text{ или } \omega = F(M_C).$$

По характеру взаимодействия с ЭП все силы и моменты делятся на **активные** и **реактивные**. Активными называются силы и моменты, создаваемые внешними, по отношению к ЭП, источниками механической энергии, и которые не зависят от движения ЭП (потенциальная энергия от веса груза, кинетическая энергия ветра и др.).

Реактивными называются силы сопротивления движению, возникающие как реакция на любой активный движущий момент (силы трения, давление при неупругой деформации, резание и т.д.). Реактивные силы и моменты действуют всегда против движения и в общем случае зависят от скорости.

Рассмотрим типовые нагрузки ЭП, которые различают по виду механической характеристики  $M_C = f(\omega)$ .

**1. Крановая.** Она характерна для механизмов подъема подъемно-транспортных машин (ПТМ), у которых момент сопротивления всегда направлен в одну сторону

$$M_C = G \cdot \frac{R}{i_p},$$

$R$  – радиус барабана, а  $G$  – вес груза.

При положительном направлении на подъем, механическая характеристика располагается в I и IV квадрантах плоскости механической характеристики  $M\omega$ . Таким образом, при подъеме статический момент противодействует, а при спуске способствует движению.

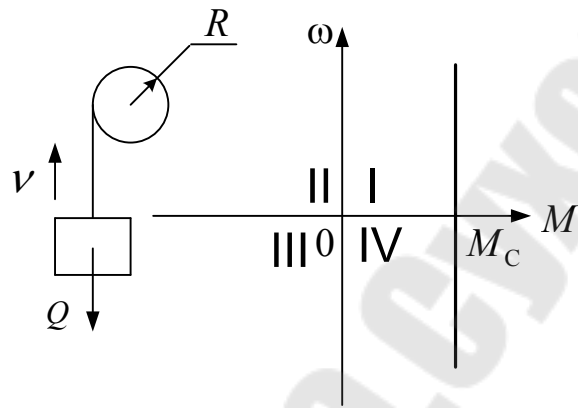


Рис. 1.7. Крановая характеристика.

Реактивной нагрузкой создающей постоянный момент является сухое трение. И в определенных пределах рабочих скоростей  $M_{CT} = const$  и  $M_C = |M_{CT}| \cdot sign(\omega)$ . При большой поверхности трения и значительной массе необходимо учитывать момент трения покоя (--- - реальная характеристика на рис. 12). В металлорежущих станках, при постоянной подаче инструмента и постоянном радиусе обработки:  $M_C = F_z \cdot R = const$ , где  $F_z$  - сила резания.

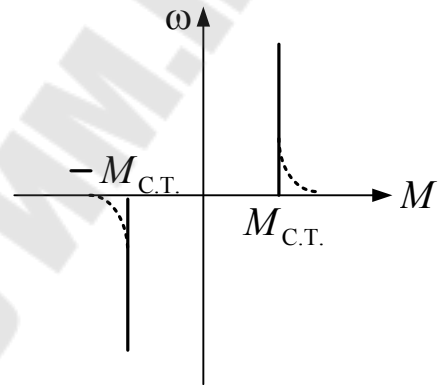


Рис. 1.8. Реактивная нагрузка.

**2. Вязкое трение.** На практике приходится сталкиваться с так называемым вязким трением, момент которого линейно зависит от скорости:

$$M_C = \beta_{в.т.} \cdot \omega,$$

где  $\beta_{в.т.}$  - коэффициент вязкого трения.

Иногда при анализе механической части необходимо учитывать внутреннее вязкое трение упругой связи. Момент при этом пропорционален скорости деформации

$$M_{вн} = \beta_{12}(\omega_1 - \omega_2),$$

где  $\omega_1, \omega_2$  - скорости на входе и выходе упругой связи;  $\beta_{12}$  - коэффициент пропорциональности (коэффициент внутреннего трения).

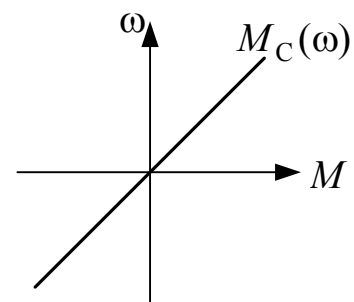


Рис. 1.9. Вязкое трение.

Следует различать ещё одну особенность нагрузок – влияние на механические колебания. По этому признаку все силы и моменты делятся на **консервативные** и **диссипативные**. Консервативные – силы и моменты не поглощают энергию колебаний, т.е. работа от них за период колебаний равна нулю. Они не зависят от скорости (например, сила тяжести). При действии на систему диссипативных сил происходит поглощение энергии колебаний. Их величина зависит от скорости (например, вязкое трение).

**3. Вентиляторная нагрузка.** Подобной характеристикой обладает идеальный центробежный вентилятор (без противодействия и трения)

$$M_C = \beta_{\text{мех}} \cdot \omega^2.$$

Для центробежных насосов показатель степени может принимать значение от 2 до 5.

**4. Конвейерная нагрузка.** Она характерна для механизмов с большим числом гнёзд трения и с учётом трения покоя. В зоне рабочих скоростей имеет место гиперболическая зависимость

$$M_C = \beta_{\text{мех}} \cdot \omega^{-1}.$$

Статическая нагрузка может зависеть не только от скорости, но и от других координат. Так, для механизмов с нелинейными механическими связями, момент сопротивления является периодической функцией угла поворота. Например, для кривошипно-шатунного механизма поршневого компрессора

$$M_{C2} = M_{C2\text{max}} \cdot \sin \varphi_2,$$

где  $\varphi_2$  - угол поворота вала кривошипа.

Если скорость ЭД меняется незначительно и можно считать, что она равна какой-то средней постоянной и  $\omega_{\text{cp}} = \text{const}$ , а

$$M_C = M_{C\text{max}} \cdot \sin(k \cdot \omega_{\text{cp}} \cdot t),$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности между частотой колебаний нагрузки и скоростью ЭД.

Следует помнить, что в механизмах обычно присутствует несколько составляющих, и реальные характеристики отличаются от типовых. Только в отдельных случаях присутствуют совпадения.

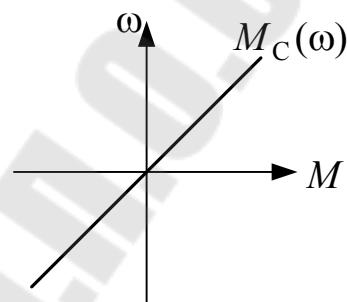


Рис. 1.10. Вязкое трение.

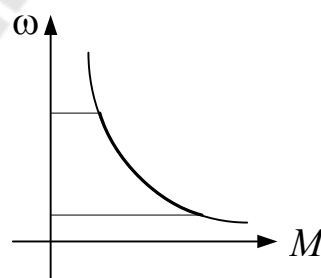


Рис. 1.11. Конвейерная нагрузка.

## 1.4. Уравнение движения электропривода

Механическая часть ЭП представляет собой систему твёрдых тел, на движение которых наложены ограничения, определяемые механическими связями. Описывается такая система уравнением Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \cdot \left( \frac{\partial W_K}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial W_K}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1.4)$$

где  $W_K$  – запас кинетической энергии в системе, выраженный через обобщённые координаты  $q_i$  и обобщённые скорости  $\dot{q}_i$ ;  $Q_i = \frac{\delta A_i}{\delta q_i}$  – обобщённые силы, определяемые суммой элементарных работ на возможных перемещениях.

Поскольку механическую систему мы привели к вращательному движению, то координаты:

$$q_i = \varphi_i, \quad \dot{q}_i = \omega_i \text{ и } Q_i = M_i.$$

Рассмотрим уравнение движения (1.4) в принятых нами параметрах применительно для двухмассовой схемы. Механические связи возьмём линейными, тогда  $M_C$  и  $J$  не зависят от угла поворота  $\varphi$ .

Запас кинетической энергии

$$W_K = \frac{J_1 \cdot \omega_1^2}{2} + \frac{J_2 \cdot \omega_2^2}{2}.$$

Элементарная работа, совершаемая при движении первой массы от всех сил и моментов

$$\delta A_1 = (M - M_{C1} - M_{12}) \cdot \delta \varphi_1.$$

Обобщённая сила, приложенная к первой массе:  $Q_1 = M - M_{C1} - M_{12}$ . Аналогично, для второй массы:  $Q_2 = M_{12} - M_{C2}$ .

Теперь с учётом частных производных  $\frac{\partial W_K}{\partial \omega} = J \cdot \omega$ ,  $\frac{\partial W_K}{\partial \varphi} = 0$ ,

решая (1.4) для каждой массы, получим уравнение движения двухмассовой системы

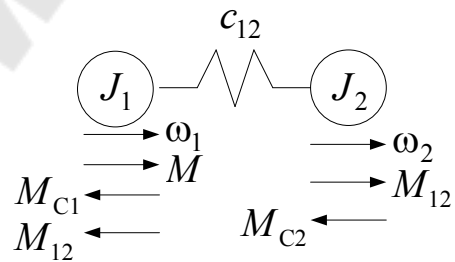


Рис. 1.12. Двухмассовая система

$$\left. \begin{aligned} M - M_{C1} - M_{12} &= J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt} \\ M_{12} - M_{C2} &= J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} \\ \frac{dM_{12}}{dt} &= c_{12}(\omega_1 - \omega_2) \end{aligned} \right\} (1.5)$$

Третье уравнение в (1.5) связывает 1 и 2-ю массы через упругое взаимодействие.

Для одномассовой системы имеющей скорость  $\omega$  и момент инерции  $J$  получаем

$$W_K = \frac{J \cdot \omega^2}{2}, \text{ а } \frac{\partial W_K}{\partial \omega} = J \cdot \omega \text{ и } Q_1 = M - M_C.$$

Откуда уравнение движения

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

(1.6) является основным и имеет исключительное значение при анализе физических процессов в ЭП.

Теперь получим уравнение движения для системы с нелинейными механическими связями на примере кривошипно-шатунного механизма.

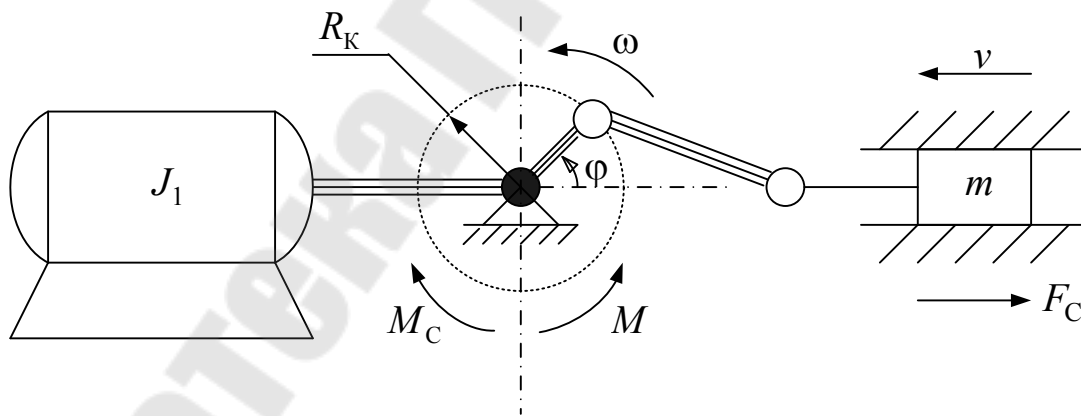


Рис. 1.13. Кривошипно-шатунный механизм.

Вал кривошипа приведён к скорости двигателя  $\omega$ . На валу действуют моменты: электромагнитный  $M$ , статического сопротивления  $M_{C1}$  от сил, действующих на линейно-связанные с ЭД массы.  $F_C$  – сила сопротивления движению поступательно движущейся массе  $m$ .



В данной схеме радиус приведения линейной скорости  $v$  зависит от угла поворота кривошипа:  $\rho(\varphi) = \frac{\delta v}{\delta \omega} = \frac{\delta S}{\delta \varphi} = R_K \cdot \sin \varphi$ .

Приведенный момент инерции также является функцией угла  $J_{пр}(\varphi) = m \cdot \rho^2(\varphi)$  и суммарный  $J(\varphi) = J_1 + J_{пр}(\varphi)$ , где  $J_1$  – приведенный момент инерции ЭД и линейно связанных с ним масс. В итоге запас кинетической энергии в системе

$$W_K = \frac{J(\varphi) \cdot \omega^2}{2}$$

Суммарный статический момент на валу кривошипа:

$$M_C(\varphi) = M_{C1} + F_C \cdot \rho(\varphi)$$

и обобщенная сила

$$Q = M - M_C(\varphi).$$

Используем уравнение Лагранжа (1.4). Частные производные

$$\frac{\partial W_K}{\partial \omega} = J(\varphi) \cdot \omega, \text{ а}$$

$$\frac{d}{dt} [J(\varphi) \cdot \omega] = J(\varphi) \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega \cdot \frac{dJ(\varphi)}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = J(\varphi) \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega^2 \cdot \frac{dJ(\varphi)}{d\varphi}.$$

Производная по углу

$$\frac{\partial W_K}{\partial \varphi} = \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ(\varphi)}{d\varphi}.$$

В итоге для механической системы с нелинейной связью уравнение движения:

$$M - M_C = J(\varphi) \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ(\varphi)}{d\varphi}. \quad (1.7)$$

### 1.5. Режимы работы электропривода

Анализ физических процессов, протекающих в электромеханической системе, позволяет разделить как динамические, так и статические режимы в ЭП. Для анализа режимов используем уравнение движения (1.6)

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

Условием, определяющим **динамические** режимы в механической системе с линейными связями: выполнение неравенства  $\frac{d\omega}{dt} \neq 0$ . Они разделяются на переходный процесс и динамический установившийся. В первом случае система стремится от одного установившегося состояния к другому. Динамический установившийся режим возникает, когда по окончании переходного процесса один из моментов ( $M$  или  $M_c$ ) имеет периодическую составляющую. Она определяет вынужденное движение системы с периодически меняющейся скоростью.

**Статические** (или просто «установившиеся») режимы имеют место при постоянстве запаса энергии в системе и  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ . При этом уравнение (1.6) запишется  $M = M_c$ . Эти режимы разделяют в зависимости от направления потока энергии в механической части на двигательный и тормозной.

В двигательном режиме поток энергии направляется от ЭД к РО и электромагнитная мощность положительна

$$P = M \cdot \omega = (-M) \cdot (-\omega) > 0.$$

На плоскости механической характеристики  $M\omega$  двигательному режиму соответствует работа в I и III квадрантах.

В тормозном режиме поток энергии направлен от РО к ЭД, который является потребителем механической энергии. Если пренебречь механическими потерями, то  $P = (-M) \cdot \omega = M \cdot (-\omega) < 0$ , что соответствует работе в II и IV квадрантах.

При **нелинейных механических связях** статические режимы отсутствуют. Даже, при  $\frac{d\omega}{dt} = 0$  поступательно движущиеся массы имеют переменные скорость и приведенный момент инерции. Момент ЭД и  $M_c$  также являются переменными.

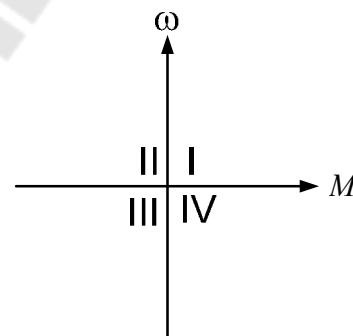


Рис. 1.14. Плоскость механической характеристики.

## 1.6. Структурные схемы и динамические свойства механической части электропривода

I. Двухмассовая схема с линейными связями.

Представим уравнение движения (1.5) в операторной форме (дифференциальные уравнения записаны в приращениях к установившемуся режиму)

$$\left. \begin{aligned} M - M_{C1} - M_{12} &= J_1 \cdot p \cdot \omega_1 \\ M_{12} - M_{C2} &= J_2 \cdot p \cdot \omega_2 \\ p \cdot M_{12} &= c_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2) \end{aligned} \right\}$$

Из 1-го и 2-го уравнений выразим  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , а из 3-го  $M_{12}$

$$\omega_1 = \frac{1}{J_1 \cdot p} \cdot (M - M_{C1} - M_{12}); \quad \omega_2 = \frac{1}{J_2 \cdot p} \cdot (M_{12} - M_{C2});$$

$$M_{12} = \frac{c_{12}}{p} \cdot (\omega_1 - \omega_2).$$

По полученным выражениям составим структурную схему со входным сигналом в виде  $M$  и выходным -  $\omega_2$  (скорость РО).

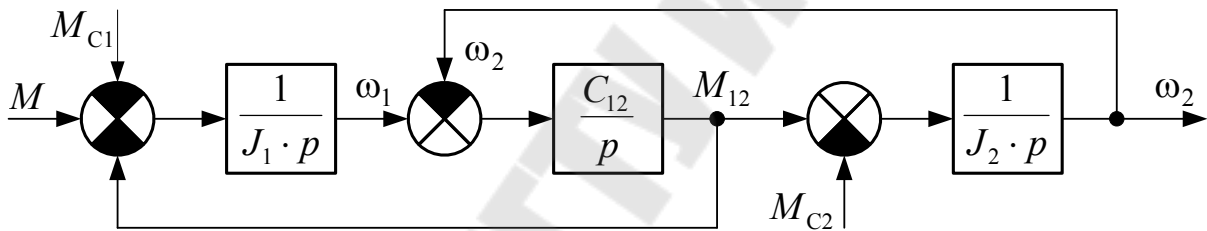


Рис. 1.15. Структурная схема двухмассовой системы.

В первую очередь нас интересует, как управлять ЭП для уменьшения упругих колебаний. Поэтому получим передаточные функции (ПФ) по управляющему воздействию  $M_c(p) = 0$ , приняв  $M_c(p) = 0$ . Преобразуем схему.

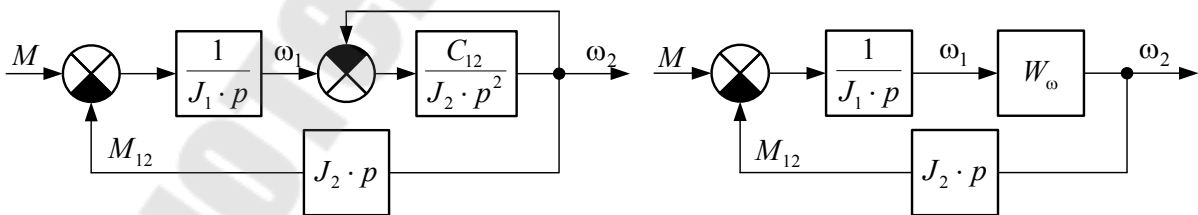


Рис. 1.16. Преобразованные структурные схемы двухмассовой системы.

ПФ звена  $W_\omega$ , связывающего скорости РО  $\omega_2(p)$  и ЭД

$$W_{\omega}(p) = \frac{\omega_2(p)}{\omega_1(p)} = \frac{\frac{c_{12}}{J_2 \cdot p^2}}{\frac{c_{12}}{J_2 \cdot p^2} + 1} = \frac{c_{12}}{J_2 \cdot p^2 + c_{12}}$$

Получим ПФ для  $\omega_1(p)$  и  $\omega_2(p)$  с учетом представления для замкнутой системы через функции прямого канала и обратной связи ( $W_{\text{пр}}$ ,  $W_{\text{о}}$ )

$$\Phi(p) = \frac{1}{W_{\text{о}} + 1/W_{\text{пр}}}$$

Для скорости ЭД схему можно представить в виде, показанном на рис. 21.

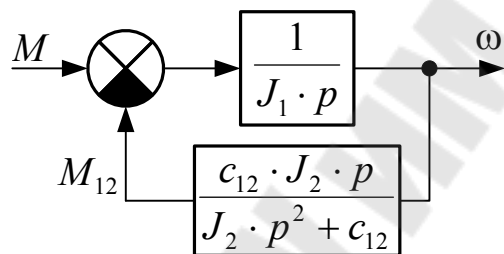


Рис. 1.17.

и ПФ

$$W_{\omega_1}(p) = \frac{\omega_1(p)}{M(p)} = \frac{1}{J_1 \cdot p + \frac{c_{12} \cdot J_2 \cdot p}{J_2 \cdot p^2 + c_{12}}} = \frac{J_2 \cdot p^2 + c_{12}}{J_1 \cdot J_2 \cdot p^3 + c_{12} \cdot (J_1 + J_2) \cdot p}$$

или с учетом, что  $J_1 + J_2 = J_{\Sigma}$

$$W_{\omega_1}(p) = \frac{\omega_1(p)}{M(p)} = \frac{\left(\frac{J_2}{c_{12}}\right) \cdot p^2 + 1}{J_{\Sigma} \cdot p \cdot \left(\frac{J_1 \cdot J_2}{c_{12} \cdot J_{\Sigma} \cdot p} \cdot p^2 + 1\right)}$$

ПФ для скорости второй массы  $\omega_2(p)$  будем получать в виде  $W_{\omega_2} = W_{\omega_1} \cdot W_{\omega}$ :

$$W_{\omega_2}(p) = \frac{\omega_2(p)}{M(p)} = \frac{\frac{J_2 \cdot p^2 + 1}{c_{12}}}{J_{\Sigma} \cdot p \cdot \left( \frac{J_1 \cdot J_2}{c_{12} \cdot J_{\Sigma}} \cdot p^2 + 1 \right)} \cdot \frac{1}{\frac{J_2 \cdot p^2 + 1}{c_{12}}},$$

$$W_{\omega_2}(p) = \frac{\omega_2(p)}{M(p)} = \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot p \cdot \left( \frac{J_1 \cdot J_2}{c_{12} \cdot J_{\Sigma}} \cdot p^2 + 1 \right)}.$$

Характеристическое уравнение двухмассовой механической части  $J_{\Sigma} \cdot p \cdot \left( \frac{J_1 \cdot J_2}{c_{12} \cdot J_{\Sigma}} \cdot p^2 + 1 \right) = 0$  имеет корни

$$p_1 = 0; p_{2,3} = \pm j \cdot \sqrt{\frac{c_{12} \cdot J_{\Sigma}}{J_1 \cdot J_2}} = \pm j \cdot \sqrt{\frac{c_{12} \cdot \gamma}{J_2}} = \pm j \cdot \Omega_{12},$$

где  $\gamma = \frac{J_{\Sigma}}{J_1}$  – коэффициент соотношения масс, а

$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{c_{12} \cdot \gamma}{J_2}}$  – частота собственных колебаний механической части, т.е. резонансная частота кинематической цепи.

Теперь характеристическое уравнение:  $J_{\Sigma} \cdot p \cdot \left( \frac{1}{\Omega_{12}^2 \cdot p^2 + 1} \right) = 0$ , а с

учётом, что  $\frac{c_{12}}{J_2} = \frac{\Omega_{12}^2}{\gamma}$ , ПФ:

$$W_{\omega_1}(p) = \frac{\omega_1(p)}{M(p)} = \frac{\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \cdot p^2 + 1}{J_{\Sigma} \cdot p \cdot \left( \frac{1}{\Omega_{12}^2} \cdot p^2 + 1 \right)} =$$

$$= \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot p} \cdot \frac{1}{\left( \frac{1}{\Omega_{12}^2} \cdot p^2 + 1 \right)} \cdot \left( \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \cdot p^2 + 1 \right). \quad (1.8)$$

$$W_{\omega_2}(p) = \frac{\omega_2(p)}{M(p)} = \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot p} \cdot \frac{1}{\left( \frac{1}{\Omega_{12}^2} \cdot p^2 + 1 \right)}. \quad (1.9)$$

Таким образом, получим, что механическая часть ЭП по отношению к скорости ЭД при управляющем воздействии представляет соединение трёх звеньев: интегрирующего, идеального колебательного и форсирующего второго порядка.

По отношению к скорости РО – соединение двух звеньев: интегрирующего и идеального колебательного.

Рассмотрим динамические свойства.

А. Проанализируем как ведёт себя ротор ЭД и жестко связанные с ним массы по (1.8). Частота сопряжения форсирующего звена  $\Omega_{\Phi} = \frac{\Omega_{12}}{\sqrt{\gamma}}$ .

Построим ЛАЧХ для каждого звена отдельно:  $L_{И}$ ,  $L_{К}$  и  $L_{\Phi}$  (прямые линии – асимптоты звеньев), и затем суммарная  $L_{\omega_1}$ .

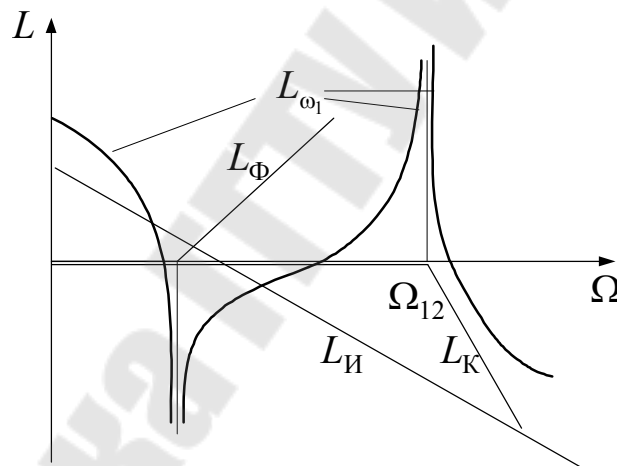


Рис. 1.18. Логарифмическая характеристика  $L_{\omega_1}$ .

При частоте  $\Omega_{\Phi}$  имеет место нуль передаточной функции, где характеристика имеет разрыв и коэффициент передачи стремится к нулю, а  $L_{\omega_1}$  стремится к  $-\infty$ .

На резонансной частоте  $\Omega_{12}$ , т.е. на частоте сопряжения колебательного звена, имеет место полюс передаточной функции, характеристика также имеет разрыв, а коэффициент передачи и  $L_{\omega_1}$  стремятся к  $+\infty$ .

В низкочастотной области характеристику определяет первое интегрирующее звено.

В целом можно отметить:

1. В низкочастотной области механическая часть ведёт себя как интегрирующее звено и при  $M = const$  скорость ЭД  $\omega_1$  должна расти линейно с наложением колебаний, определяемых упругой связью.

2. При приближении частоты колебаний электромагнитного момента  $M$  к частоте  $\Omega_{12}$ , амплитуда колебаний скорости  $\omega_1$  должна стремиться к бесконечности. Однако наличие форсирующего звена оказывает существенное ограничивающее влияние. Так, при  $J_1 \gg J_2$   $\gamma$  стремится к 1, и к 1 стремится произведение  $W_K \cdot W_\Phi$ . В результате резонанс для скорости  $\omega_1$  исключается.

**Б.** Поведение второй массы проанализируем по (1.9). ЛАЧХ  $L_{\omega_2}$  образуется характеристиками двух звеньев: интегрирующего и колебательного.

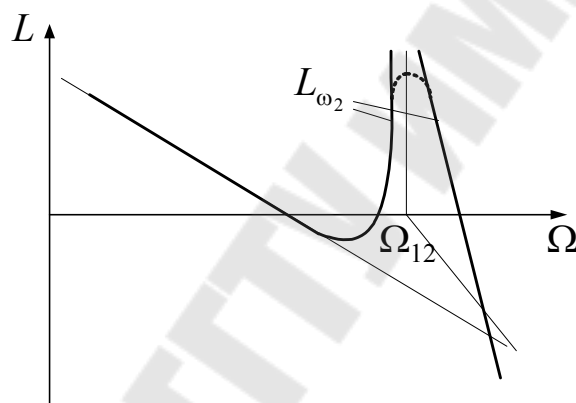


Рис. 1.19. Логарифмическая характеристика  $L_{\omega_2}$ .

На движение второй массы форсирующее звено не влияет. На частоте  $\Omega_{12}$  ЛАЧХ  $L_{\omega_2}$  имеет разрыв и стремится к  $+\infty$ . Затем наклон составляет -60 дБ/дек.

Представим основные выводы:

1. Если при синтезе ЭП использовать обратную связь по скорости ЭД и  $J_2 \gg J_1$  или при частоте среза  $\Omega_C$  желаемой ЛАЧХ много меньшей резонансной частоты  $\Omega_C \ll \Omega_{12}$ , то механическую часть ЭП можно представить жестким приведенным звеном, т.е. одномассовой схемой.

2. Колебательность второй массы выше и нет факторов ограничивающих развитие колебаний. При необходимости получить требуемое качество движения РО и регулирование его координат пренебрегать влиянием упругих связей без проверки нельзя.

В реальных системах присутствуют диссипативные силы, которые оказывают демпфирующее воздействие. Их можно представить в виде внутреннего вязкого трения:

$$M_{\text{вн.}} = \beta_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2),$$

при этом операторное уравнение упругого момента:

$$M_{12}(p) = \left( \frac{c_{12}}{p} + \beta_{12} \right) \cdot (\omega_1 - \omega_2),$$

а корни характеристического уравнения  $p_{2,3} = -\alpha_{\text{вн}} \pm \sqrt{\alpha_{\text{вн}}^2 - \Omega_{12}^2}$ .

В результате при любом значении  $\alpha_{\text{вн}}$  отличном от нуля процесс будет затухающим, а ЛАЧХ получают ограничения в области полюса (-). Только по внутреннему вязкому трению в упругой связи декремент

$$\text{затухания: } \lambda = \frac{2\pi \cdot \alpha_{\text{вн}}}{\Omega_{12}} = 0,1 \div 0,3.$$

### II. Одномассовая схема.

Уравнение движения в операторной форме  $M - M_c = J \cdot p \cdot \omega$ , а ПФ

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{M(p)} = \frac{1}{J \cdot p}.$$

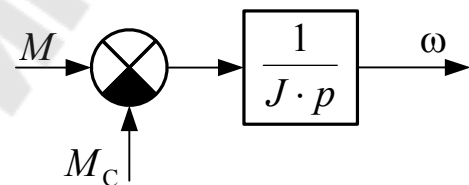


Рис. 1.20. Структурная схема одномассовой

Таким образом, механическая часть представляет собой интегрирующее звено и является фильтром нижних частот.

## 1.7. **Переходные процессы в механической части электропривода**

Переходные процессы возникают как следствие управляющего воздействия или возмущения. При управляющем воздействии возможны процессы пуска, торможения, реверса или изменения скорости при регулировании. Под возмущением понимают сброс или наброс нагрузки. И при необходимости, анализируют процессы в ЭП, когда изменяется напряжение сети.

Рассмотрим поведение МЧ в виде жесткого приведенного звена в разных процессах при условии  $M = const$  и  $M_c = const$ . Уравнение

движения  $M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$  решим разделив переменные



$$d\omega = \frac{M - M_c}{J} \cdot dt. \quad \text{Интегрируем} \quad \int_{\omega_{\text{нач}}}^{\omega} d\omega = \int_0^t \frac{M - M_c}{J} \cdot dt. \quad \text{Откуда}$$

$\omega - \omega_{\text{нач}} = \frac{M - M_c}{J} \cdot t$ . При постоянных моментах  $\frac{M - M_c}{J} = \frac{d\omega}{dt} = \varepsilon$  – ускорение ЭП. Теперь решение

$$\omega = \omega_{\text{нач}} + \varepsilon \cdot t, \quad (1.10)$$

или  $t = \frac{\omega - \omega_{\text{нач}}}{\varepsilon}$ .

Таким образом, получим, что в одномассовой схеме при постоянных моментах переходной процесс представляет равномерно ускоренное движение.

**Пуск.**

В момент  $t=0$  момент ЭД скачком изменяется от 0 до  $M_1$ . Возникает динамический момент  $M_d = M_1 - M_c$  и ЭП равномерно разгоняется.

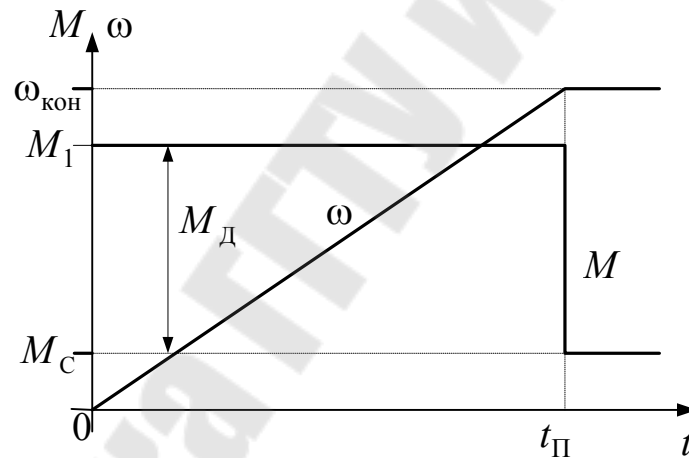


Рис. 1.21. Диаграмма пуска при постоянстве моментов.

При достижении заданной скорости  $\omega_{\text{кон}}$  момент ЭД должен скачком измениться до значения  $M_c$ . Время пуска исходя из решения (1.10)

$$t_{\text{П}} = \frac{\omega_{\text{кон}}}{\varepsilon} = \frac{J \cdot \omega_{\text{кон}}}{M - M_c}.$$

**Торможение.**

Предшествующее установившееся состояние  $M(0_-) = M_c$ ,  $\omega(0_-) = \omega_{\text{нач}}$ . При  $t=0$  момент ЭД меняется до значения  $M = -M_1$ . Динамический момент при торможении  $M_d = -M_1 - M_c$ , а ускорение

$\varepsilon = -\frac{(M_1 + M_C)}{J}$ . Для остановки с реактивным  $M_C$  при  $\omega = 0$  момент ЭД должен стать  $M = 0$ , и время торможения  $t_T = \frac{-\omega_{нач}}{-(M_1 + M_C)} \cdot J$ .

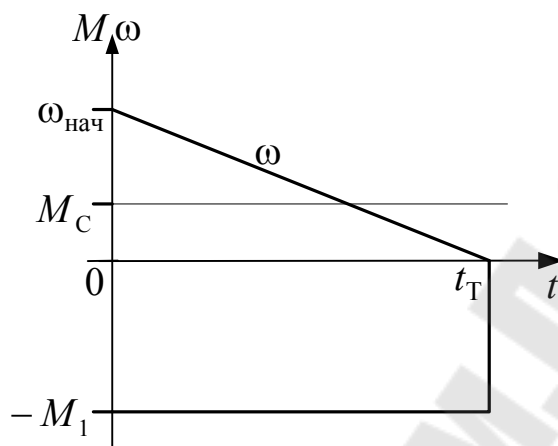


Рис. 1.22. Диаграммы торможения при постоянстве моментов.

### Реверс.

В зависимости от характера нагрузки возможны два варианта:

1-й:  $M_C$  - активный и независит от направления движения. Предшествующее состояние  $M(0_-) = M_C$  и  $\omega(0_-) = \omega_{нач}$ . При  $t = 0$   $M(0) = -M_1$ . Если при переходе скорости через значение  $\omega = 0$  при  $t = t_T$  момент ЭД не изменяется, то ЭП начинает разгоняться в противоположном направлении.

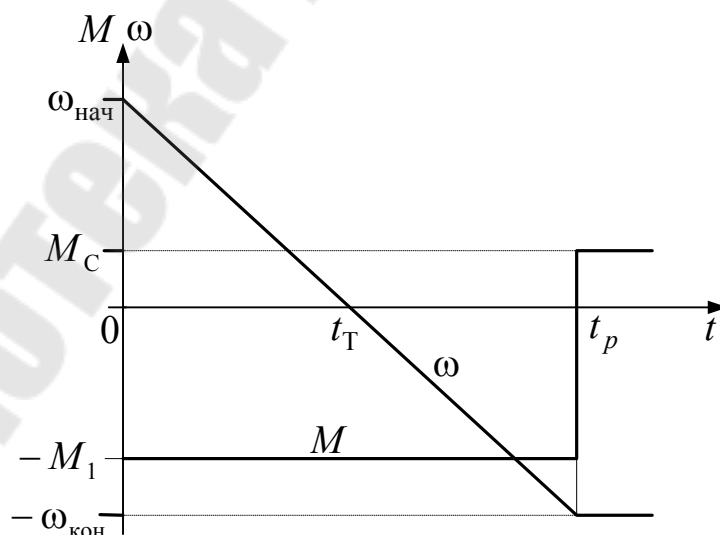


Рис. 1.23. Диаграммы реверса при активном моменте сопротивления.

Динамический момент и ускорение остаются неизменными  $M_{\text{д}} = -(M_1 + M_{\text{с}})$ ,  $\varepsilon = \frac{-(M_1 + M_{\text{с}})}{J}$ . По окончании реверса, когда  $\omega = -\omega_{\text{кон}}$  момент ЭД меняется до значения  $M_{\text{с}}$ . Длительность реверса:  $t_{\text{р}} = t_{\text{т}} + t_{\text{п}} = \frac{(-\omega_{\text{кон}}) - \omega_{\text{нач}}}{-(M_1 + M_{\text{с}})} \cdot J$ .

2-й вариант:  $M_{\text{с}}$  - реактивный. При переходе скорости через нулевое значение момент  $M_{\text{с}}$  изменяет знак. Ускорение при торможении  $\varepsilon_{\text{т}} = -\frac{M_1 + M_{\text{с}}}{J}$ , а при разгоне  $\varepsilon_{\text{п}} = \frac{-M_1 + M_{\text{с}}}{J}$ .

Время реверсирования

$$t_{\text{р}} = \frac{-\omega_{\text{нач}}}{-(M_1 + M_{\text{с}})} \cdot J + \frac{-\omega_{\text{кон}}}{-M_1 + M_{\text{с}}} \cdot J.$$

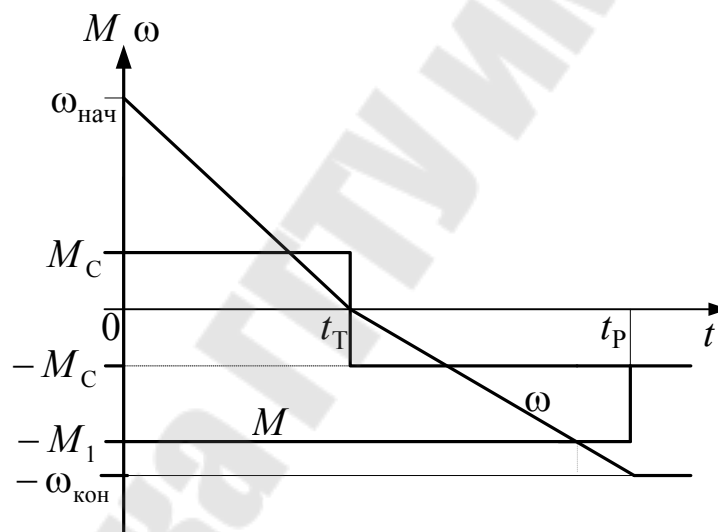


Рис. 1.24. Диаграммы реверса при реактивном моменте сопротивления.

### 1.8. Переходные процессы при нелинейных зависимостях $M(t)$ и $M_{\text{с}}(t)$

Если  $M_{\text{с}} = \text{const}$  а, к примеру,  $M(t) = \Delta M_{\text{п}} \cdot e^{-t/T_1} + M_{\text{с}}$ , то ЭД развивает дополнительный динамический момент при пуске, который изменяется по экспоненциальной зависимости:

$$M_{\text{д}} = M(t) - M_{\text{с}} = \Delta M_{\text{п}} \cdot e^{-t/T_1},$$

где:  $T_1$  – постоянная времени, определяющая длительность пуска.

При начальном значении ускорения  $\varepsilon_{\text{нач}} = \frac{d\omega}{dt}(0) = \frac{\Delta M_{\text{П}}}{J}$  (из уравнения движения) разделяя переменные в уравнении и решая:

$$\int_{\omega_{\text{нач}}}^{\omega} d\omega = \int_0^t \frac{M(t) - M_{\text{С}}}{J} dt = \int_0^t \frac{\Delta M_{\text{П}}}{J} \cdot e^{-t/T_1} \cdot dt = \varepsilon_{\text{нач}} \int_0^t e^{-t/T_1} \cdot dt,$$

В результате

$$\omega = \omega_{\text{нач}} + \varepsilon_{\text{нач}} \cdot T_1 \left( 1 - e^{-t/T_1} \right).$$

Таким образом, получаем, что при  $\omega_{\text{нач}} = 0$  скорость при пуске изменяется от 0 до  $\omega_{\text{кон}} = \varepsilon_{\text{нач}} \cdot T_1$  по экспоненциальной зависимости.

Когда производится пуск ЭД с вентиляторной нагрузкой с  $M_{\text{С}} = M_{\text{С0}} + (M_{\text{СН}} - M_{\text{С0}}) \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{Н}}} \right)^2$ , или при более сложных нелинейностях, аналитические решения нецелесообразны по трудоёмкости или невозможны. В этих случаях прибегают к графоаналитическим методам. Рассмотрим один из них – метод конечных приращений на примере указанного пуска. По данному методу механические характеристики разбиваются на участки  $\Delta\omega_i$ , для которых можно принять, что  $M_{\text{Ди}} = (M - M_{\text{С}})_i = M_{\text{Ди ср}} = \text{const}$ . Затем для каждого участка решают уравнение движения в конечных приращениях:

$$\Delta t_i = J \cdot \frac{\Delta\omega_i}{M_{\text{Ди ср}}}.$$

Построение графика  $\omega(t)$  производится с припасовыванием отдельных решений  $\Delta t$ , то есть на плоскости  $t\omega$  откладывают время  $\Delta t_i$  для участков  $\Delta\omega_i$  и получают  $\omega(t)$  в виде ломаной линии, которую затем сглаживают.

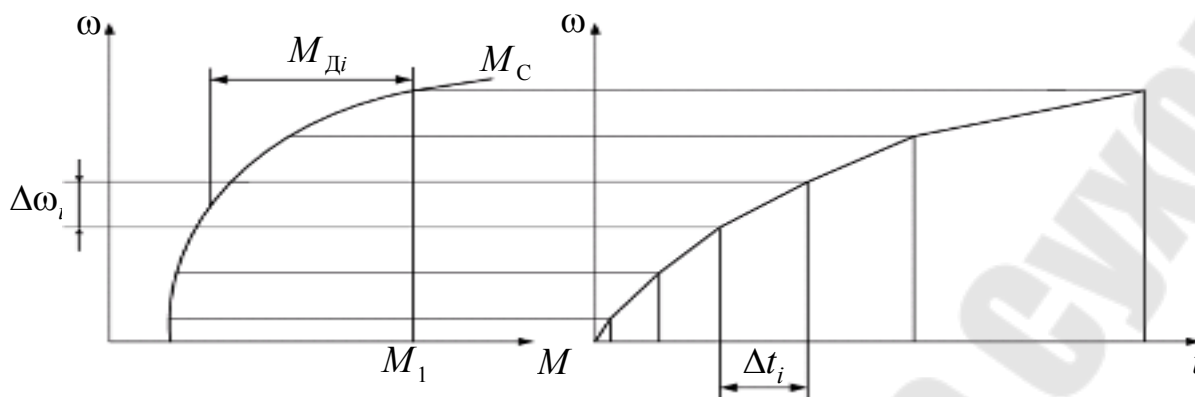


Рис. 1.25. Построение диаграммы пуска методом конечных приращений.

Исходя из рассмотренных примеров, отметим: изменение скорости во времени определяется зависимостями  $M(t)$ ,  $M_c(t)$  и, так как  $M_c(t)$  определяется конструкцией и технологией ИМ, то получение требуемого закона движения РО обеспечивается формированием соответствующего закона  $M(t)$ .

### 1.9. Переходные процессы в механической части с упругой связью

Рассмотрим поведение механической части на примере пуска с  $M_c = 0$  и  $M(0_-) = 0$ , а  $M(0) = M_1 = const$ . Уравнение движения при условии  $M_{c1} = M_{c2} = 0$  записывается:

$$\left. \begin{aligned} M - M_{12} &= J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt} \\ M_{12} &= J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} \\ \frac{dM_{12}}{dt} &= c_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2) \end{aligned} \right\}$$

Дифференциальные уравнения для скорости можно получить, решая систему, или по передаточным функциям. Воспользуемся вторым способом. Передаточная функция для первой массы:

$$W_{\omega_1}(p) = \frac{\omega_1(p)}{M(p)} = \frac{\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \cdot p^2 + 1}{J_{\Sigma} \cdot p \cdot \left( \frac{1}{\Omega_{12}^2} \cdot p^2 + 1 \right)}$$

Операторное уравнение

$$\left[ J_{\Sigma} \cdot p \cdot \left( \frac{1}{\Omega_{12}^2} \cdot p^2 + 1 \right) \right] \cdot \omega_1(p) = \left( \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \cdot p^2 + 1 \right) \cdot M(p),$$

где  $\gamma = \frac{J_{\Sigma}}{J_1}$ ,  $\Omega_{12}^2 = \sqrt{\frac{c_{12} \cdot \gamma}{J_2}}$

Дифференциальная форма

$$J_{\Sigma} \cdot \left( \frac{1}{\Omega_{12}^2} \cdot \frac{d^3 \omega_1}{dt^3} + \frac{d\omega_1}{dt} \right) = \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \cdot \frac{d^2 M}{dt^2} + M.$$

С учётом, что  $M_1 = const$ :  $\frac{1}{\Omega_{12}^2} \cdot \frac{d^3 \omega_1}{dt^3} + \frac{d\omega_1}{dt} = \varepsilon_{cp}$ , где  $\varepsilon_{cp} = \frac{M_1}{J_{\Sigma}}$ .

Корни характеристического уравнения:  $p_1 = 0$ ,  $p_{2,3} = \pm j \cdot \Omega_{12}$ .

Нулевой корень характеризует интегрирующее поведение системы и определяет частное решение в виде:  $\omega^* = \varepsilon_{cp} \cdot t$  (для проверки подставляется в левую часть дифференциального уравнения). Мнимые корни определяют незатухающие колебания. Общее решение имеет вид:

$$\omega_1(t) = \varepsilon_{cp} \cdot t + A \cdot \cos(\Omega_{12} \cdot t) + B \cdot \sin(\Omega_{12} \cdot t), \quad (1.11)$$

а производная решения:

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \varepsilon_{cp} - \Omega_{12} \cdot A \cdot \sin(\Omega_{12} \cdot t) + \Omega_{12} \cdot B \cdot \cos(\Omega_{12} \cdot t). \quad (1.11a)$$

Для нахождения коэффициентов А и В воспользуемся начальными условиями:  $M(0) = M_1$ ,  $\omega_1(0) = 0$ ,  $\omega_2(0) = 0$ ,  $M_{12}(0) = 0$ .

Из первого уравнения системы находим:

$$\frac{d\omega_1}{dt}(0) = \frac{M - M_{12}}{J_1} = \frac{M_1}{J_1} \cdot \frac{J_{\Sigma}}{J_{\Sigma}} = \gamma \cdot \varepsilon_{cp}.$$

Теперь (1.11) и (1.11a) при  $t = 0$  запишутся:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= A \\ \gamma \cdot \varepsilon_{cp} &= \varepsilon_{cp} + \Omega_{12} \cdot B \end{aligned} \right\}$$

Откуда:  $B = \frac{(\gamma - 1)}{\Omega_{12}} \cdot \varepsilon_{cp} = \frac{J_2 \cdot \varepsilon_{cp}}{J_1 \cdot \Omega_{12}}$  (учитывая, что  $\gamma - 1 = \frac{J_2}{J_1}$ ).

В итоге решение (1.11):

$$\omega_1(t) = \varepsilon_{\text{cp}} t + \frac{J_2 \cdot \varepsilon_{\text{cp}}}{J_1 \cdot \Omega_{12}} \sin(\Omega_{12} \cdot t). \quad (1.12)$$

(1.12) представляет закон движения первой массы при ступенчатом управляющем воздействии. Изменение упругого момента  $M_{12}(t)$  определим из первого уравнения исходной системы  $M_{12}(t) = M_1 - J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt}$ . С учётом, что  $M_1 = J_{\Sigma} \cdot \varepsilon_{\text{cp}} = (J_1 + J_2) \cdot \varepsilon_{\text{cp}}$   $M_{12}(t) = (J_1 + J_2) \cdot \varepsilon_{\text{cp}} - J_1 \cdot \varepsilon_{\text{cp}} - J_2 \cdot \varepsilon_{\text{cp}} \cdot \cos(\Omega_{12} \cdot t)$  и окончательно получаем

$$M_{12}(t) = J_2 \cdot \varepsilon_{\text{cp}} \cdot [1 - \cos(\Omega_{12} \cdot t)]. \quad (1.13)$$

Для определения закона движения  $\omega_2(t)$  используем третье уравнение системы

$$\omega_2(t) = \omega_1(t) - \frac{1}{c_{12}} \cdot \frac{dM_{12}}{dt} = \varepsilon_{\text{cp}} \cdot t + \left( \frac{J_2 \cdot \varepsilon_{\text{cp}}}{J_1 \cdot \Omega_{12}} - \frac{J_2 \cdot \varepsilon_{\text{cp}}}{c_{12}} \cdot \Omega_{12} \right) \cdot \sin(\Omega_{12} \cdot t).$$

Выражение в скобках

$$\begin{aligned} \frac{J_2 \cdot \varepsilon_{\text{cp}}}{\Omega_{12}} \cdot \left( \frac{1}{J_1} - \frac{\Omega_{12}^2}{c_{12}} \right) &= \frac{J_2 \cdot \varepsilon_{\text{cp}}}{\Omega_{12}} \cdot \left( \frac{1}{J_1} - \frac{c_{12} \cdot \gamma}{J_2 \cdot c_{12}} \right) = \\ &= \left| \frac{\gamma}{J_2} = \frac{J_1 + J_2}{J_1 \cdot J_2} \right| = \frac{J_2 \cdot \varepsilon_{\text{cp}}}{\Omega_{12}} \cdot \left( \frac{J_2 - J_1 - J_2}{J_1 \cdot J_2} \right) = -\frac{\varepsilon_{\text{cp}}}{\Omega_{12}}. \end{aligned}$$

Окончательно:

$$\omega_2(t) = \varepsilon_{\text{cp}} \cdot t - \frac{\varepsilon_{\text{cp}}}{\Omega_{12}} \cdot \sin(\Omega_{12} \cdot t). \quad (1.14)$$

Графики движения и  $M_{12}$  при условии  $J_1 = J_2$

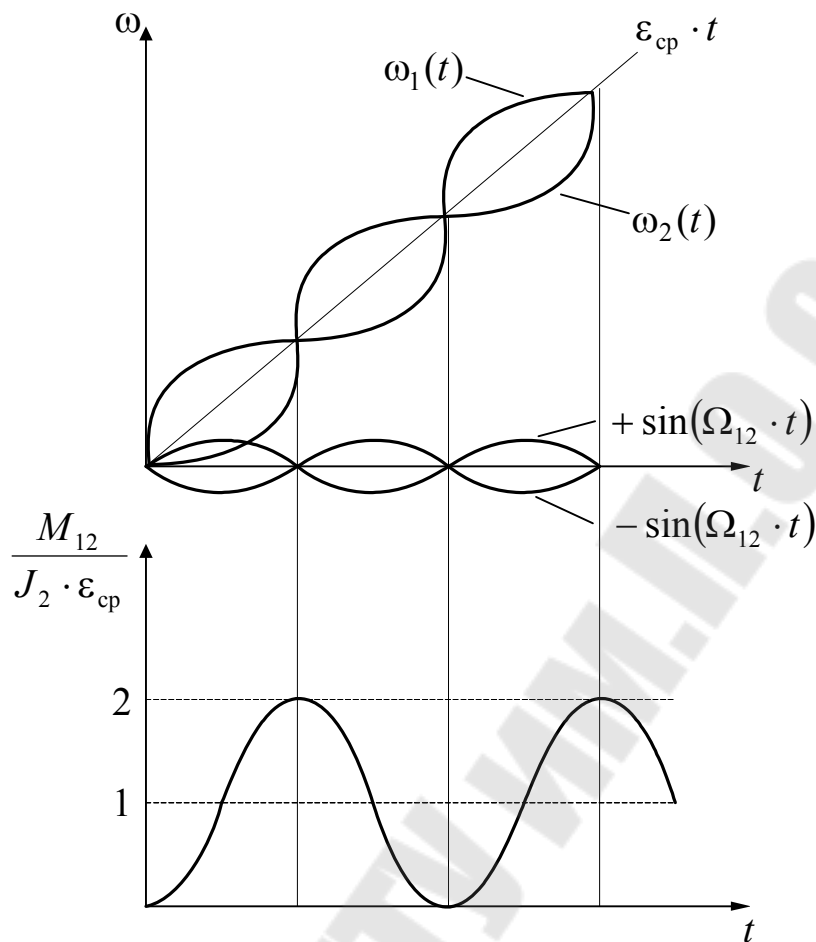


Рис. 1.26. Диаграммы пуска в двухмассовой системе.

Проанализируем (1.12) и (1.14). На амплитуду колебаний первой массы непосредственное влияние оказывает соотношение масс, а для второй это влияние отсутствует. Упругий момент изменяется от 0 до  $2 \cdot J_2 \cdot \varepsilon_{\text{ср}}$ . Динамический момент, передаваемый второй массе упругой связью, имеет среднее значение  $M_{\text{Дср}} = J_2 \cdot \varepsilon_{\text{ср}}$ .

Коэффициент, характеризующий динамическую перегрузку передачи  $K_{\text{Д}} = \frac{M_{\text{Дmax}}}{M_{\text{Дср}}} = 2$ .

## 2. Динамические процессы в электромеханическом преобразователе

### 2.1. Обобщенная электрическая машина

В общем случае электромеханический преобразователь (ЭМП) можно представить как многополюсник с  $n$  входными электрическими обмотками и двумя выводами для электромагнитного момента  $M$  и



скорости ротора  $\omega$ . Однако такая модель ЭД достаточно громоздкая, поэтому, когда допустимо, используют эквивалентную двухфазную модель – так называемую **обобщенную электрическую машину (ЭМ)**.

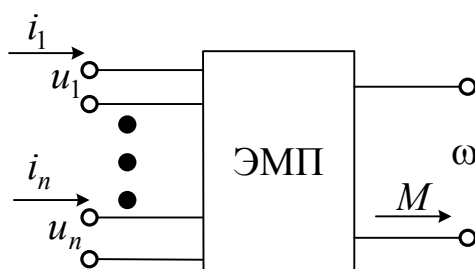


Рис. 2.1. Электромеханический преобразователь в виде многополюсника.

При переходе от реальной к обобщенной машине должны выполняться следующие допущения:

1. Магнитная система не насыщена.
2. Зазор принимается равномерным по всей окружности, а явнополюсность учитывается введением переменной составляющей радиальной магнитной проницаемости, или изменением индуктивностей и взаимоиндуктивностей обмоток.
3. Машина симметричная как геометрически, так и по параметрам обмоток.
4. Магнитное поле в зазоре синусоидально.
5. При питании ЭД несимметричным напряжением применяется метод симметричных составляющих.

При указанных допущениях переменные (координаты) ЭМ можно представить результирующими, суммарными временными векторами. Они определяются геометрическим суммированием векторов соответствующих переменных фазных обмоток реальной машины. Поскольку обмотки имеют строгое геометрическое положение по окружности машины, то векторы также определены в пространстве. Учет временной зависимости переменных и количество обмоток даст вращение или неподвижное положение векторов в пространстве. Таким образом, представляя переменную в виде результирующего вектора его можно разложить на проекции в любую систему координат: в 2-х или 3-х фазную, неподвижную или вращающуюся.

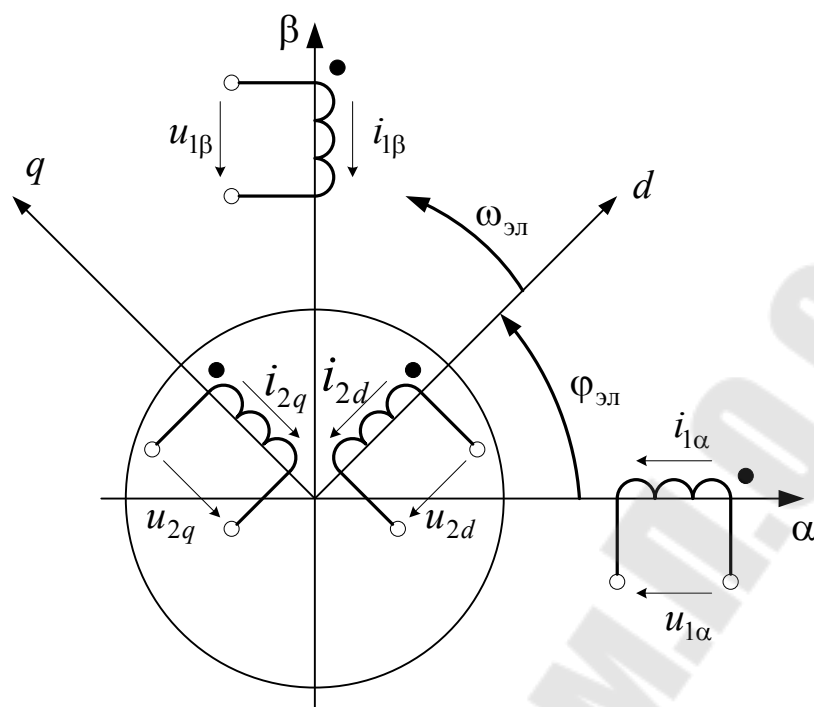


Рис. 2.2. Схема обобщенной ЭМ.

На исходной схеме обобщенной машины:  $\alpha$ ,  $\beta$  - оси координат связанные со статором;  $d$ ,  $q$  - оси жестко связанные с ротором. Обмотки статора и ротора, прикладываемые к ним напряжения и протекающие токи имеют соответствующие индексы осей. Электрический угол поворота ротора  $\varphi_{эл}$  и геометрический  $\varphi$  реальной машины связаны через число пар полюсов  $p_d$ , как и соответствующие скорости ротора

$$\varphi_{эл} = p_d \cdot \varphi \text{ и } \omega_{эл} = p_d \cdot \omega.$$

Динамические процессы в обобщенной машине через электрические и механические координаты описываются уравнениями электрического равновесия (уравнениями Кирхгофа) для каждой из обмоток и уравнением электромагнитного момента. Исходная система, описывающая обобщенную ЭМ

$$\left. \begin{aligned}
 u_{1\alpha} &= R_1 \cdot i_{1\alpha} + \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt}, \\
 u_{1\beta} &= R_1 \cdot i_{1\beta} + \frac{d\psi_{1\beta}}{dt}, \\
 u_{2d} &= R_2 \cdot i_{2d} + \frac{d\psi_{2d}}{dt}, \\
 u_{2q} &= R_2 \cdot i_{2q} + \frac{d\psi_{2q}}{dt}, \\
 M &= \frac{dW_{\text{ЭМ}}}{d\varphi} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1\alpha}^{2q} i_i \cdot \frac{d\psi_i}{d\varphi}.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Электромагнитный момент определен через работу, совершаемую электромагнитной энергией  $W_{\text{ЭМ}}$ , при повороте ротора.

$\psi_i$  - потокосцепление  $i$ -ой обмотки, определяемое результирующим действием токов всех обмоток. В обобщенной форме потокосцепление каждой обмотки определяется как

$$\psi_i = \sum_{j=1\alpha}^{2q} (L_{i,j} \cdot i_j) \quad (2.2)$$

Разные индексы  $i$ ,  $j$  указывают на взаимную индуктивность соответствующих обмоток, а одинаковые  $i = j$  на собственную индуктивность данной обмотки.

Для неявнополюсных машин собственные индуктивности обмоток постоянны, а взаимные индуктивности между обмотками статора или между обмотками ротора равны нулю. Взаимные индуктивности между обмотками статора и ротора при повороте ротора изменяются с периодом  $2\pi$  эл. рад.

В явнополюсных машинах равны нулю взаимные индуктивности между обмотками явнополюсной части. Все же остальные изменяются при повороте ротора.

С учетом (2.2) описание обобщенной ЭМ можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned}
 u_i &= R_i \cdot i_i + \frac{d}{dt} \left( \sum_{j=1\alpha}^{2q} L_{i,j} \cdot i_j \right) \\
 M &= \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1\alpha}^{2q} i_i \cdot \left( \sum_{j=1\alpha}^{2q} i_j \cdot \frac{dL_{i,j}}{d\varphi} \right)
 \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

(2.3) описывает процессы преобразования энергии в ЭМП. Теперь для описания конкретного ЭД в (2.3) подставляют выражения для собственных и взаимных индуктивностей.

## 2.2. Электромеханическая связь в электромеханическом преобразователе

Электромеханическая связь, то есть связь между выходными механическими координатами и входными электрическими описывается уравнениями преобразования электрической энергии в электромагнитную (в (2.3) первое уравнение) и электромагнитной в механическую (в (2.3) второе уравнение с учетом уравнения движения).

Раскроем скобки в первом уравнении:

$$u_i = R_i \cdot i_i + \sum_{j=1}^{2q} L_{i,j} \cdot \frac{di_j}{dt} + \sum_{j=1}^{2q} i_j \cdot \frac{dL_{i,j}}{dt} \cdot \frac{d\varphi_{эл}}{d\varphi_{эл}}.$$

Поскольку  $L_{i,j}$  в явном виде зависит от угла поворота ротора  $\varphi_{эл}$ , то умножив и разделив третье слагаемое на  $d\varphi_{эл}$  и с учетом, что  $\frac{d\varphi_{эл}}{dt} = \omega_{эл}$  получаем

$$u_i = R_i \cdot i_i + \sum_j L_{i,j} \cdot \frac{di_j}{dt} + \omega_{эл} \cdot \sum_j i_j \cdot \frac{dL_{i,j}}{d\varphi_{эл}}. \quad (2.4)$$

В соответствии с (2.4) можно представить, что напряжение подведенной к  $i$ -ой обмотке уравновешивается падением напряжения  $R_i$ , ЭДС само- и взаимной индукции  $L \cdot \frac{di}{dt}$ , которые определяются изменением запаса электромагнитной энергии, и так называемой ЭДС вращения

$$e = \omega_{эл} \cdot \sum i \cdot \frac{dL}{d\varphi}.$$

Последняя пропорциональна скорости ротора и связана с изменением пространственного положения обмоток. Таким образом, имеем электрическую координату  $e$ , которая определяется механической координатой  $\omega_{эл}$ .

В итоге: токи в обмотках создают электромагнитную энергию, которая приводит к созданию момента. А он обеспечивает преобразование электрической энергии в механическую при движении ротора. В процессе движения в обмотках индуцируется ЭДС, которая влияет на величину

токов. Таким образом электромеханическая связь в ЭМП представляет не только прямое воздействие токов на момент, но и образует обратную связь – влияние скорости на величину токов.

При анализе свойств ЭД (ЭМП) используют характеристики:

**1. Электромеханическую** –  $\omega(i)$  из (2.4)

$$\omega = \frac{1}{p_d \cdot \sum_j i_j \cdot \frac{dL_{i,j} \cdot i_j}{d\varphi_{эл}}} \left( u_i - R_i \cdot i_i - \sum_j L_{i,j} \cdot \frac{di_j}{dt} \right). \quad (2.5)$$

**2. Механическая** –  $\omega(M)$ , получаемая при совместном решении (2.5) и второго уравнения (2.3).

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{1}{p_d \cdot \sum_j \frac{dL_{i,j}}{d\varphi_{эл}}} \left( u_i - R_i \cdot i_i - \sum_j L_{i,j} \cdot \frac{di_j}{dt} \right) \\ M &= \frac{1}{2} \cdot \sum_i i_j \cdot \frac{dL_{i,j}}{d\varphi} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

Рассматривая (2.6) с учетом уравнения движения становится видной взаимосвязь всех процессов в ЭП: электрических, электромагнитных, механических и тепловых ( $I^2 \cdot R$ ).

Поэтому вся система ЭП получила название **электромеханической системы**.

### **2.3. Системы координат обобщенной электрической машины**

Индуктивности и потокосцепления обмоток зависят от угла поворота ротора и в уравнениях ЭМП присутствуют периодические коэффициенты в виде тригонометрических функций. Они вызывают дополнительную нелинейность математической модели ЭД. Для исключения коэффициентов используют преобразование переменных к одной системе координат, то есть переходят к модели, у которой обмотки статора и ротора не меняют взаимного расположения. Рассмотрим преобразование переменных к общей системе  $uv$  вращающейся с некоторой скоростью  $\omega_k$  и повернутой относительно статора на угол  $\varphi_k = \omega_k \cdot t$ , а относительно ротора на угол  $(\varphi_k - \varphi_{эл}) = (\omega_k - \omega_{эл}) \cdot t$ . Графическое представление вектора  $\overline{X_1}$  в системе координат  $\alpha\beta$ , связанной со статором и получение его составляющих в осях  $uv$ , представим на рис. 33.

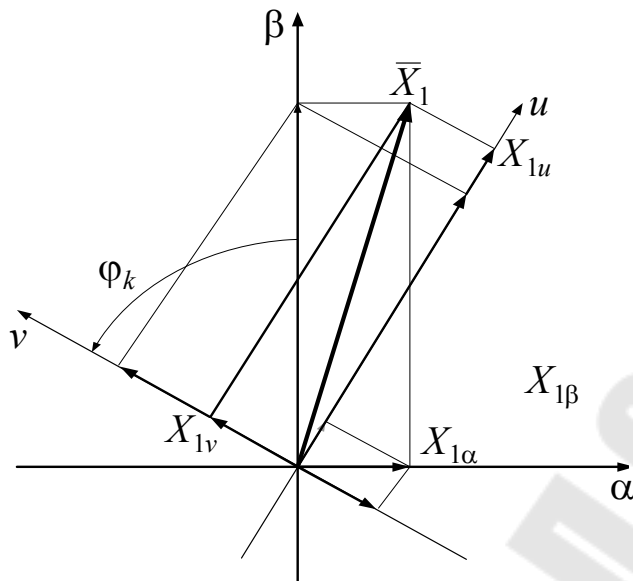


Рис. 2.3. Составляющие вектора  $\bar{X}_1$  на осях  $uv$ .

Просуммировав проекции по осям, получим формулы прямого преобразования

$$\left. \begin{aligned} x_{1u} &= x_{1\alpha} \cdot \cos \varphi_k + x_{1\beta} \cdot \sin \varphi_k \\ x_{1v} &= -x_{1\alpha} \cdot \sin \varphi_k + x_{1\beta} \cdot \cos \varphi_k \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

При необходимости перехода к реальным переменным обобщенной машины  $X_{1\alpha}$ ,  $X_{1\beta}$  используют формулы обратного преобразования. Поясним их получение на рис. 34.

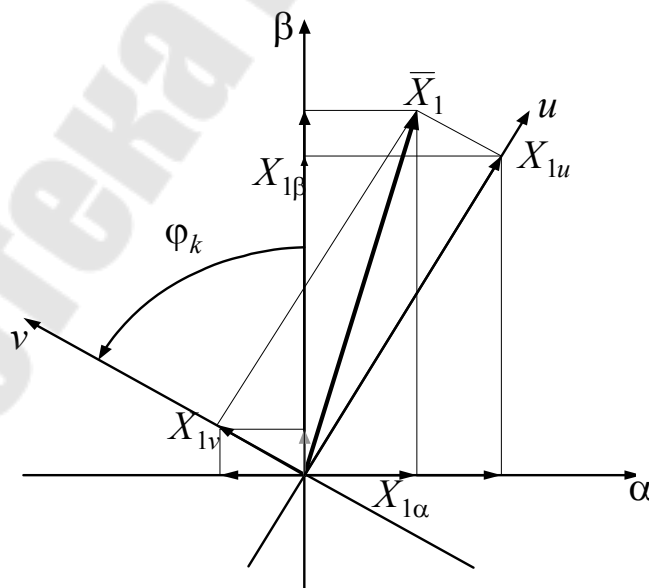


Рис. 2.4. Составляющие вектора  $\bar{X}_1$  на осях  $a\beta$ .

$$\left. \begin{aligned} x_{1\alpha} &= x_{1u} \cdot \cos\varphi_k - x_{1v} \cdot \sin\varphi_k \\ x_{1\beta} &= x_{1u} \cdot \sin\varphi_k + x_{1v} \cdot \cos\varphi_k \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Для получения преобразованных уравнений необходимо провести в них замену реальных переменных с помощью формул обратного преобразования. Для примера ограничимся уравнениями электрического уравнения статора, то есть в (2.1) подставим выражения для переменных, полученных на основе (2.7)

$$\left. \begin{aligned} u_{1u} \cdot \cos\varphi_k - u_{1v} \cdot \sin\varphi_k &= R_1 \cdot (i_{1u} \cdot \cos\varphi_k - i_{1v} \cdot \sin\varphi_k) + \\ &+ \frac{d}{dt} \cdot (\psi_{1u} \cdot \cos\varphi_k - \psi_{1v} \cdot \sin\varphi_k) \\ u_{1u} \cdot \sin\varphi_k + u_{1v} \cdot \cos\varphi_k &= R_1 \cdot (i_{1u} \cdot \sin\varphi_k + i_{1v} \cdot \cos\varphi_k) + \\ &+ \frac{d}{dt} \cdot (\psi_{1u} \cdot \sin\varphi_k + \psi_{1v} \cdot \cos\varphi_k) \end{aligned} \right\}$$

Помножив первое уравнение на  $\cos\varphi_k$ , а второе на  $\sin\varphi_k$  и сложив с учетом, что  $\cos^2\varphi_k + \sin^2\varphi_k = 1$ , получим уравнение для оси  $u$ . Затем первое помножив на  $-\sin\varphi_k$ , а второе на  $\cos\varphi_k$  и так же сложив получим уравнение для оси  $v$ . Аналогично поступая для роторных цепей получаем уравнение электрохимической характеристики ОМ в осях  $uv$ :

$$\left. \begin{aligned} u_{1u} &= R_1 \cdot i_{1u} + \frac{d\psi_{1u}}{dt} - \omega_k \cdot \psi_{1v} \\ u_{1v} &= R_1 \cdot i_{1v} + \frac{d\psi_{1v}}{dt} + \omega_k \cdot \psi_{1u} \\ u_{2u} &= R_2 \cdot i_{2u} + \frac{d\psi_{2u}}{dt} - (\omega_k - \omega_{эл}) \cdot \psi_{2v} \\ u_{2v} &= R_2 \cdot i_{2v} + \frac{d\psi_{2v}}{dt} + (\omega_k - \omega_{эл}) \cdot \psi_{2u} \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Как видно из (2.9) после преобразования в уравнениях электрического равновесия появляется дополнительное слагаемое - фиктивная ЭДС, определяемая разностью скоростей координатных осей.

В теории для представления моделей разных типов ЭД используют следующие системы координат:

1.  $\alpha\beta$  – связанная со статором и  $\omega_k = 0$ . Переменные ротора, преобразованные к этим осям имеют частоту тока статора.
2.  $dq$  – связанная с ротором –  $\omega_k = \omega_{эл}$ . Переменные статора после преобразования имеют частоту тока ротора.

3. ХУ – система координат вращающаяся со скоростью поля (с синхронной скоростью) –  $\omega_k = \omega_{0эл}$ . И поскольку в этой системе магнитное поле неподвижно относительно обмоток, то переменные приводятся к постоянному току.

#### **2.4. Ограничения на процессы преобразования энергии в ЭМП**

1. При работе ЭМ в ней происходят потери энергии, которые выделяются в виде тепла в отдельных частях машины. Переменные потери происходят в меди обмоток и пропорциональны квадрату тока  $I^2 \cdot R$ . С увеличением отдаваемой энергии увеличивается и количество потребляемой энергии из сети. Таким образом, возрастают переменные потери и количество тепла, выделяемого в ЭД за единицу времени. Это приводит к росту его температуры, но она не должна превысить допустимую. Данное значение определяется наименее термостойким элементом, которым является изоляция. В итоге получаем ограничение: **величина нагрузки ЭД по условиям нагрева не должна превысить номинальное значение при его работе в номинальном, то есть в расчетном режиме.**
2. Обычно ЭМ обладают значительной тепловой инерционностью, поэтому возможны кратковременные перегрузки (при пуске, торможении и в других случаях). Допустимое значение характеризуется **перегрузочной способностью** ЭД, которая представляется кратностью максимально допустимого момента или тока

$$\lambda = \frac{M_{доп}}{M_H}, \lambda_I = \frac{I_{доп}}{I_H}.$$

Для ДПТ перегрузочная способность определяется условиями коммутации тока на коллекторе. Для общепромышленных ЭД среднее значение  $\lambda_I = 2,5 \div 3$ , а для отдельных типов высокомоментных ЭД –  $\lambda_I = 8 \div 10$ . Данное ограничение объясняется действием реакции якоря, искажающей ось магнитного потока. Как следствие возникает разность ЭДС между соседними коллекторными пластинами, проходящими под щетками. При значительных токах разность ЭДС достигает величины, способной создать дугу, что является условием возникновения «**кругового огня**» и разрушение коллектора.

Машины переменного тока – бесколлекторные и допускают большие кратности токов. Для них перегрузочная способность определяется



развиваемым максимальным моментом. В частности для АД, учитывая допустимое снижение напряжения в сети до  $0,9 \cdot U_H$

$$\lambda = 0,8 \cdot \frac{M_K}{M_H},$$

где:  $M_K$  – критический момент.

Таким образом, невыполнение данного ограничения вызовет разрушение ДПТ, а для ЭД переменного тока приведет к выходу из нормального режима.

В результате: **кратковременное увеличение нагрузки должно быть ограничено перегрузочной способностью.**

3. У ДПТ компенсацию реакции якоря осуществляют дополнительные полюса и компенсационная обмотка. Однако из-за наличия электромагнитной инерционности обмоток и вихревых токов в полюсах происходит отставание воздействия на реакцию якоря. Поэтому накладывается ограничение на **скорость изменения тока якоря**  $\left( \frac{di_{\text{я}}}{dt} \right)$ . В зависимости от мощности двигателя допустимые значения производной:

- для ЭД малой и средней мощности  $\frac{di_{\text{я}}}{dt} \leq (30 \div 50) \cdot \frac{I_H}{c}$ ,
- для ЭД большой мощности  $\frac{di_{\text{я}}}{dt} \leq (20 \div 30) \cdot \frac{I_H}{c}$ .

### **3. Электромеханические свойства электродвигателей**

Под электромеханическими понимаются пускорегулировочные свойства ЭД. Они определяются допустимыми способами: пуска, получения статических режимов, электрического торможения и возможностью регулировать электрические и механические координаты во всех режимах.

#### **3.1. Естественные и искусственные характеристики. Виды изменения переменных**

Под естественными понимаются характеристики (зависимости между переменными), которыми обладают ЭД, работающие в нормальной схеме включения при отсутствии добавочных сопротивлений в цепях и при питании электроэнергией с номинальными параметрами ( $U_H, f_H$ ). Если не

соблюдается любое из условий, то взаимосвязь между переменными изменяется, т.е. ЭД получает новую искусственную характеристику.

В ТЭП различают три вида изменения переменных:

1. Саморегулирование - изменение переменных ЭД по его характеристикам с изменением нагрузки. Например, с увеличением нагрузки от значения  $M_{C1}$  до  $M_{C2}$  скорость уменьшается от  $\omega_{C1}$  до  $\omega_{C2}$ .

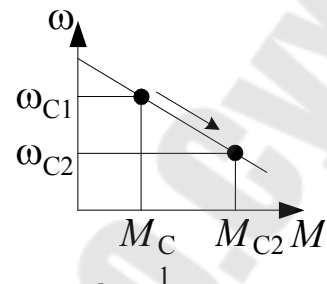


Рис. 3.1. Саморегулирование.

2. Регулирование - получение новых искусственных характеристик по требованию технологического процесса или конструкции РМ. Например, при работе ЭД на естественной характеристике ( $M_e$ ) в точке с координатами  $M_{C1}$ ,  $\omega_{C1}$  с вентиляторной нагрузкой, имеющей представленную на рисунке характеристику  $M_C(\omega)$ , необходимо уменьшить скорость вентилятора до значения  $\omega_{C2}$ . Это потребует изменить характеристику двигателя (получить искусственную –  $M_{и}$ ).

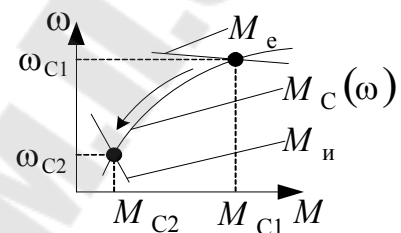


Рис. 3.2. Регулирование.

3. Автоматическое регулирование ЭП реализуется, когда регулирование ЭД, т.е. процесс получения его искусственных характеристик за счет действия обратных связей ставится в зависимость от изменения каких-либо переменных.

### 3.2. Обобщенная модель машины постоянного тока независимого возбуждения

В настоящее время ДПТ НВ представляют основной тип ЭД, применяемый в АЭП. В них обмотка якоря (ОЯ) и обмотка возбуждения (ОВ) обычно подключаются к независимым источникам. При одинаковых номинальных напряжениях они могут включаться параллельно, когда мощность источника много превышает мощность ЭД, для исключения влияния процессов в якорной цепи на цепь возбуждения. Для создания вращающегося момента, т.е. для процесса преобразования энергии, необходимо, чтобы, по крайней мере, в одной обмотке протекал переменный ток. В ДПТ с помощью щеточно-коллекторного узла переменный ток протекает в обмотке якоря. Этот узел играет роль механического преобразователя частоты. Коммутация тока производится с угловой частотой  $\omega_2$  численно равной угловой скорости ротора  $\omega_{эл}$ . В

пределах допущений для обобщенной ЭМ, анализ электромеханических свойств ДПТ справедлив и для вентильного двигателя (система ЭП на основе СД питающегося от источника постоянного тока через АИН, при коммутации вентилей по сигналам датчика положения ротора).

Схема включения обобщенной ЭМ для модели ДПТ НВ представлена на рис. 37.

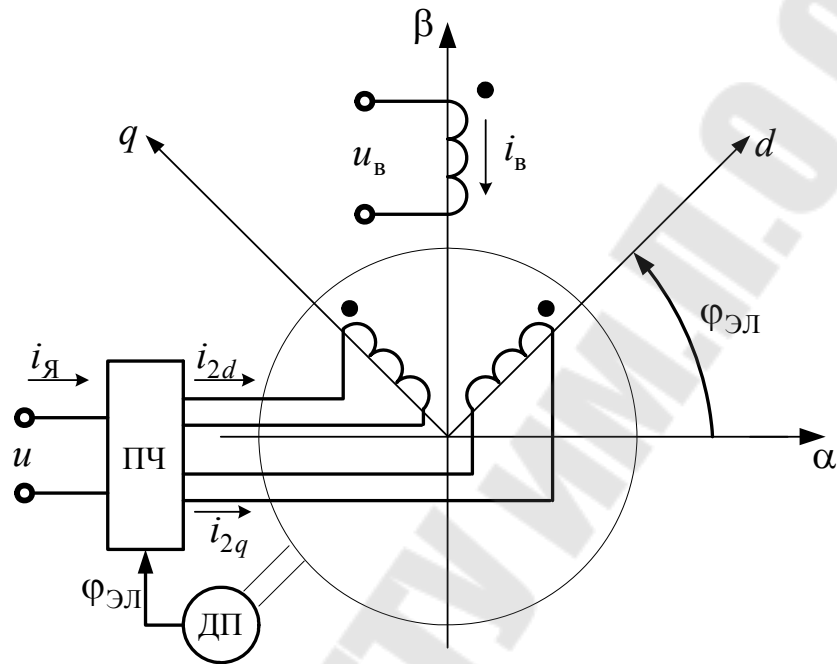


Рис. 3.3. Схема включения модели обобщенной ЭМ для модели ДПТ НВ.

Обмотка статора включена на напряжение возбуждения:  $u_{1\beta} = u_B$ ,  $i_{1\beta} = i_B$ . НС этой обмотки неподвижна относительно статора. НС от токов ротора при его вращении со скоростью  $\omega_{эл}$  также неподвижна относительно статора. Поэтому она должна вращаться относительно ротора со скоростью  $\omega_{эл}$ , но в противоположном направлении. При этом фазные токи изменяются по законам:

$$i_{2d} = i_{Я} \cdot \cos(\omega_{эл} \cdot t)$$

$$i_{2q} = i_{Я} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \omega_{эл} \cdot t\right) = -i_{Я} \cdot \sin(\omega_{эл} \cdot t)$$

Если преобразовать токи к системе координат  $\alpha \beta$  ( $\omega_k = 0$ )

$$\left. \begin{aligned} i_{2d} &= i_{Я} \cdot \cos^2(\omega_{эл} \cdot t) + i_{Я} \cdot \sin^2(\omega_{эл} \cdot t) = i_{Я} \\ i_{2q} &= i_{Я} \cos(\omega_{эл} \cdot t) \cdot \sin(\omega_{эл} \cdot t) - i_{Я} \cdot \sin(\omega_{эл} \cdot t) \cdot \cos(\omega_{эл} \cdot t) = 0 \end{aligned} \right\}$$

Таким образом, переменные токи обмоток ротора эквивалентны постоянному току якоря  $i_{\text{я}}$ , протекающему по одной обмотке, расположенной по оси  $\alpha$ . НС от этого тока неподвижна в пространстве и направлена по оси  $\alpha$  - поперечная реакция якоря. Для ее компенсации применяют дополнительные полюса (ДП) и компенсационную обмотку (КО). При этом схема модели ДПТ НВ без учета вихревых токов в полюсах будет иметь вид, показанный на рис. 3.4.

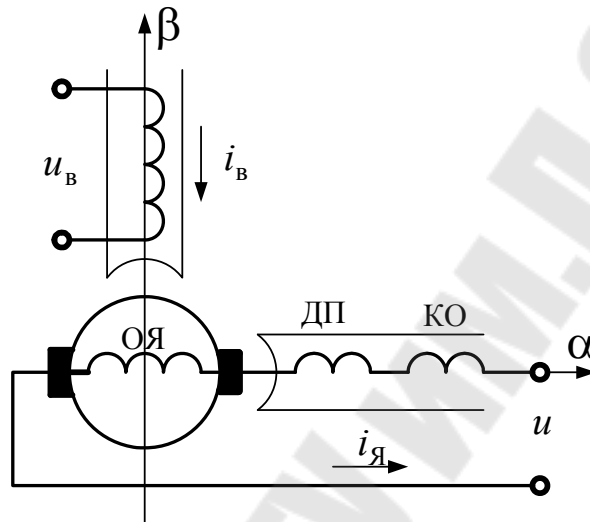


Рис. 3.4. Схема модели ДПТ НВ.

Уравнение механической характеристики после преобразования в координатной системе  $\alpha\beta$ :

$$\left. \begin{aligned} u_{1\alpha} &= R_1 \cdot i_{1\alpha} + \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt} \\ u_{1\beta} &= R_1 \cdot i_{1\beta} + \frac{d\psi_{1\beta}}{dt} \\ u_{2\alpha} &= R_1 \cdot i_{2\alpha} + \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} + \omega_{\text{эл}} \cdot \psi_{2\beta} \\ u_{2\beta} &= R_1 \cdot i_{2\beta} + \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} - \omega_{\text{эл}} \cdot \psi_{2\alpha} \\ M &= p_{\text{д}} \cdot L_{12} \cdot (i_{2\alpha} \cdot i_{1\beta} - i_{2\beta} \cdot i_{1\alpha}) \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

В соответствии со схемой модели:  $u_{1\alpha} = u_{2\beta} = 0$ ,  $i_{1\alpha} = i_{2\beta} = 0$ ;  
 $u_{1\beta} = u_{\text{в}}$ ,  $i_{1\beta} = i_{\text{в}}$ ;  $u_{2\alpha} = u$ ,  $i_{2\alpha} = i_{\text{я}}$ ;  $R_{1\beta} = R_{\text{в}}$ ,

$$R_{2\alpha} = R_{\text{ОЯ}} + R_{\text{ДП}} + R_{\text{КО}} + R_{\text{ЩК}} = R_{\text{Яд}},$$

$$L_{1\beta} = L_{\text{В}} = \text{const},$$

$$L_{2\alpha} = L_{\text{ОЯ}} + L_{\text{ДП}} + L_{\text{КО}} = L_{\text{Яд}} = \text{const}.$$

$R_{\text{Я}}$ ,  $L_{\text{Я}}$  - сопротивление и индуктивность якорной цепи ЭД;  $R_{\text{ЩК}}$  – сопротивление щеточного контакта, учитывающееся в статических режимах.

Потокосцепление обмоток:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{1\beta} &= L_{1\beta} \cdot i_{1\beta} + L_{12} \cdot i_{2\beta} = L_{1\beta} \cdot i_{1\beta} = L_{\text{В}} \cdot i_{\text{В}} \\ \Psi_{2\alpha} &= L_{12} \cdot i_{1\alpha} + L_{2\alpha} \cdot i_{2\alpha} = L_{2\alpha} \cdot i_{2\alpha} = L_{\text{Яд}} \cdot i_{\text{Я}} \\ \Psi_{2\beta} &= L_{12} \cdot i_{1\beta} + L_{2\beta} \cdot i_{2\beta} = L_{12} \cdot i_{\text{В}} \end{aligned} \right\}$$

Теперь уравнение механической характеристики:

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{В}} &= R_{\text{В}} \cdot i_{\text{В}} + L_{\text{В}} \cdot \frac{di_{\text{В}}}{dt} \\ u &= R_{\text{Яд}} \cdot i_{\text{Я}} + L_{\text{Яд}} \cdot \frac{di_{\text{Я}}}{dt} + \omega_{\text{эл}} \cdot L_{12} \cdot i_{\text{В}} \\ M &= p_{\text{д}} \cdot L_{12} \cdot i_{\text{Я}} \cdot i_{\text{В}} \end{aligned} \right\}$$

Если машина работает на линейном участке кривой намагничивания  $L_{12} = \text{const}$ , то 3-е слагаемое второго уравнения представляет собой ЭДС вращения  $e = \omega_{\text{эл}} \cdot L_{12} \cdot i_{\text{В}}$ , или суммируя по окружности во всех проводниках:  $e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{p_{\text{д}}}{a} \cdot N \cdot \Phi \cdot \omega$ , где  $p_{\text{д}}$  - число пар полюсов;  $N$  - число проводников в якоре;  $a$  – число пар параллельных ветвей;  $\Phi$  – магнитный поток одного полюса.

Обозначая конструктивную постоянную машины как  $k = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{p_{\text{д}}}{a} \cdot N$ , получаем

$$e = k \cdot \Phi \cdot \omega, \quad (3.2)$$

$$M = k \cdot \Phi \cdot i_{\text{Я}} \quad (3.3)$$

Окончательно описание электромеханических процессов в ДПТ НВ

$$\left. \begin{aligned} u_B &= R_B \cdot i_B + L_B \cdot \frac{di_B}{dt} \\ u &= R_{\text{яд}} \cdot i_{\text{я}} + L_{\text{яд}} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt} + \omega \cdot k \cdot \Phi \\ M &= k \cdot \Phi \cdot i_{\text{я}} \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

### 3.3. Основные характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

На схемах включения ДПТ показывать обмотки ДП и КО не будем. Используем изображения, показанные на рис. 39.

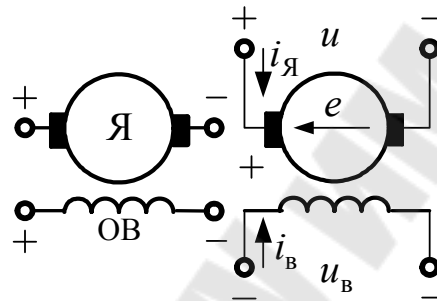


Рис. 3.5. Схема включения ДПТ НВ.

Систему (3.4) можно также получить по эквивалентной схеме с помощью основных законов электротехники.

В описании процессов присутствует нелинейности в виде произведений:  $\Phi \cdot \omega$  и  $\Phi \cdot i_{\text{я}}$ . Они проявляются в динамических режимах с  $\Phi = \text{var}$ . Для основной массы режимов с  $\Phi = \text{const}$  можно обозначить произведение  $k \cdot \Phi$  через коэффициент  $c = k \cdot \Phi = \text{const}$ . Из (3.4) получаем выражения для электромеханической и механической характеристик

$$\omega = \frac{u}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{яд}}}{k \cdot \Phi} \cdot i_{\text{я}} - \frac{L_{\text{яд}}}{k \cdot \Phi} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt}, \quad (3.5)$$

$$\omega = \frac{u}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{яд}}}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M - \frac{L_{\text{яд}}}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot \frac{dM}{dt}. \quad (3.6)$$

Для статических режимов ( $d/dt = 0$ )

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} = c \cdot I_{\text{я}}, \quad (3.7)$$

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{яд}}}{k \cdot \Phi} \cdot I_{\text{я}} = \frac{U}{c} - \frac{R_{\text{яд}}}{c} \cdot I_{\text{я}}, \quad (3.8)$$

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{яд}}}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M = \frac{U}{c} - \frac{R_{\text{яд}}}{c^2} \cdot M. \quad (3.9)$$

Следует различать статические и динамические характеристики. Под статической понимают геометрическое место точек (ГМТ) средних значений переменных, причем каждая из них соответствует статическому режиму ( $M = M_{\text{с}}$ ). Динамическая характеристика (фазовая траектория) – ГМТ мгновенных значений переменных для конкретного ЭД и конкретного динамического режима. Таким образом, в (3.4)-(3.7) переменные  $u$ ,  $i_{\text{я}}$ ,  $\Phi$ ,  $\omega$  – мгновенные значения, а в (3.7)-(3.9) – средние значения. (3.7)-(3.9) представляют зависимости  $M(I_{\text{я}})$ ,  $\omega(I_{\text{я}})$ ,  $\omega(M)$  при неизменных значениях  $U$  и  $\Phi$ . Если не учитывать магнитный поток реакции якоря, то статические характеристики представляют прямые линии, которые можно построить по 2-м из следующих точек

1. Идеальный холостой ход:  $M = 0$ ,  $I_{\text{я}} = 0$ ,  $\omega_0 = \frac{U}{k \cdot \Phi}$ .
2. Номинальный режим:  $I_{\text{я}} = I_{\text{н}}$ ,  $M_{\text{н}} = k \cdot \Phi_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}}$ ,  $\omega = \omega_{\text{н}}$ .
3. Короткое замыкание:  $\omega = 0$ ,  $I_{\text{кз}} = \frac{U}{R_{\text{яд}}}$ ,  $M_{\text{кз}} = c \cdot I_{\text{кз}}$ .

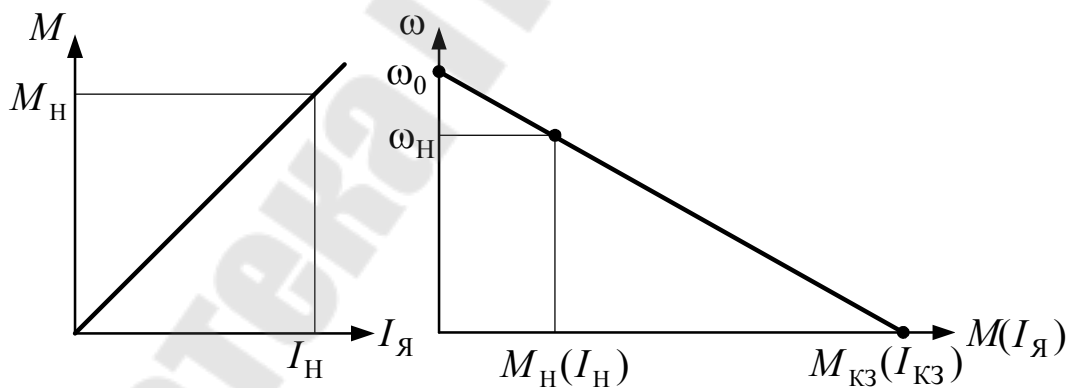


Рис. 3.6. Статические характеристики ДПТ НВ.

Для оценки электромеханических свойств и вида характеристик используют следующие показатели:

1. Статизм характеристики – относительное изменение скорости при изменении нагрузки в пределах  $M_{\text{с}} = 0 \dots M_{\text{н}}$ :

$$s_x = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} \text{ или } s_{x\%} = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} \cdot 100\%,$$

где  $\omega_H$  - скорость соответствующая номинальной нагрузке ( $M_C = M_H$ ).

2. Погрешность получения (регулирования) скорости – отношение максимального отклонения скорости к среднему значению

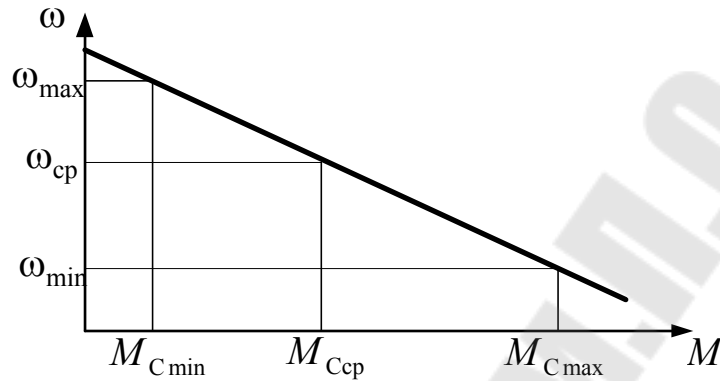


Рис. 3.7. К определению погрешности регулирования.

$$\Delta\omega_{\%} = \frac{\Delta\omega_{\max}}{\omega_{\text{ср}}} \cdot 100\% = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{2 \cdot \omega_{\text{ср}}} \cdot 100\%.$$

3. Модуль жесткости механической характеристики – отклонение момента при изменении скорости

$$\beta = \left| \frac{dM}{d\omega} \right|,$$

или при линейной характеристике

$$\beta = \left| \frac{M_1 - M_2}{\omega_1 - \omega_2} \right|.$$

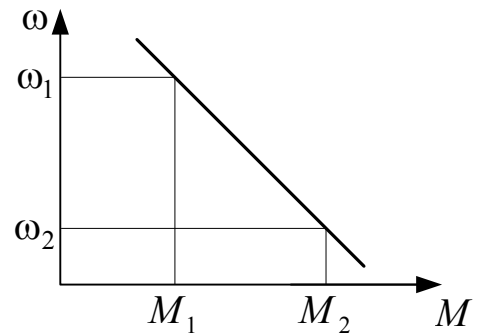


Рис. 3.8. К определению модуля жесткости.

Для ДПТ НВ

$$\beta = \frac{(k \cdot \Phi)^2}{R_{\text{Яд}}}. \quad (3.10)$$

Первые два показателя (относительные величины) служат для оценки различных типов и серий ЭД и указываются в заданиях на проект ЭП. Третий – расчетный, он характеризует конкретный типоразмер



двигателя. Учитывая (3.9) и что  $\frac{M_{кз}}{\omega_0} = \beta$ , механическую характеристику можно описать следующими выражениями

$$\omega = \omega_0 - \frac{M}{\beta}, \quad M = \beta \cdot (\omega_0 - \omega),$$

$$M = M_{кз} - \beta \cdot \omega.$$

В зависимости от значений статизма различают 4 вида характеристик ЭД (см. рис. 43):

- а) абсолютно жесткая –  $s_x = 0$ ,  $\beta = \infty$ ;
- б) жесткая –  $s_x \leq 5\%$ ;
- в) мягкая – обычно  $s_x = (5...15)\%$ ;
- г) абсолютно мягкая –  $s_x = \infty$ ,  $\beta = 0$ .

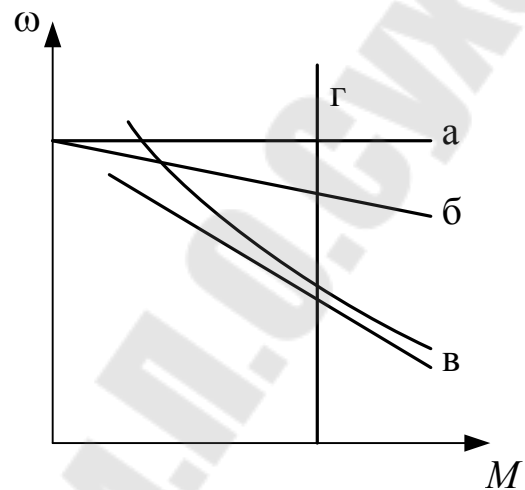


Рис. 3.9. Виды характеристик.

### 3.4. Естественные и искусственные характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

В соответствии с (3.7)-(3.9) характеристики представляют прямые линии. Но при отсутствии компенсации реакции якоря они нелинейные (штриховые линии на рис. 44).

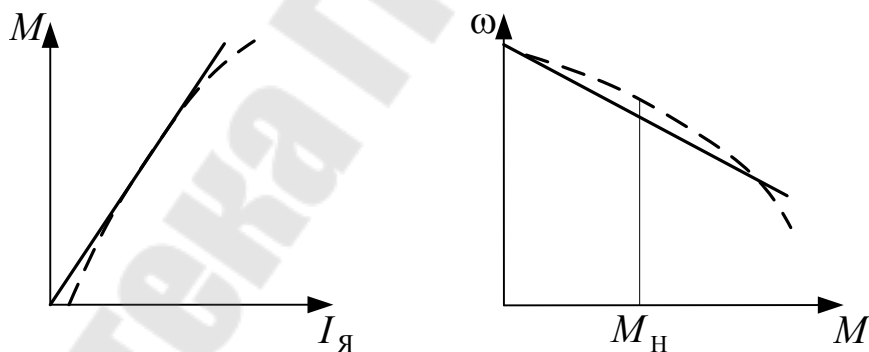


Рис. 3.10. Характеристики ДПТ НВ.

Из-за влияния реакции якоря в механической характеристике может присутствовать участок с положительной жесткостью  $\left(\frac{\Delta M}{\Delta \omega} > 0\right)$ , при больших нагрузках сказывается уменьшение момента, и в механической характеристике – увеличение коэффициента  $\frac{R_{яд}}{(k \cdot \Phi)^2}$ .

Если анализировать (3.7)-(3.9), то можно сделать вывод о получении искусственных характеристик:

- изменением напряжения на якорной цепи;
- изменением магнитного потока;
- введением добавочного сопротивления в цепь якоря (реостатное регулирование).

1. Регулирование изменением напряжения на якорной цепи.

Получение искусственных характеристик достигается уменьшением напряжения. При этом остаются неизменным отклонение скорости от

идеального холостого хода  $\Delta\omega = \frac{R_{яд}}{c^2} \cdot M$  и модуль жесткости  $\beta = \frac{c^2}{R_{яд}}$ .

Скорость идеального холостого хода  $\omega_0 = \frac{U}{c}$  пропорциональна напряжению. В результате искусственные характеристики располагаются параллельно естественной.

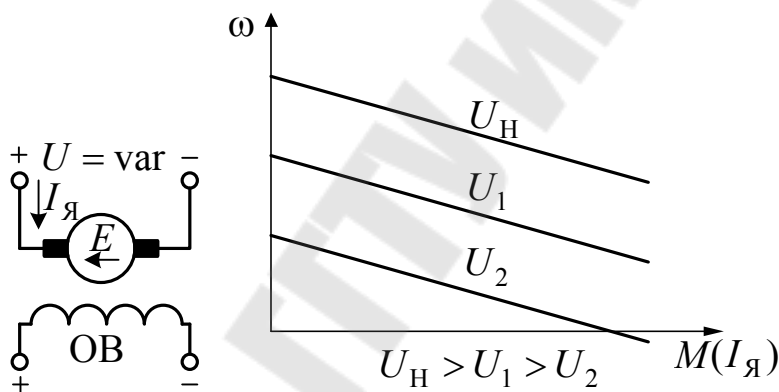


Рис. 3.11. Регулирование изменением напряжения на якорной цепи.

Применяется данный способ при питании от управляемых преобразователей (УП) постоянного тока и, как правило, в замкнутых САУ.

2. Реостатное регулирование.

При введении добавочного сопротивления  $R_{доб}$  в цепь якоря наклон характеристик увеличивается, т.е. характеристики смягчаются:

$\omega_0 = const$ , а отклонение скорости  $\Delta\omega = \frac{R_{я}}{c^2} \cdot M$  увеличивается (здесь

$R_{я} = R_{доб} + R_{яд}$  полное сопротивление якорной цепи). Уменьшается

модуль жесткости  $\beta = \frac{c^2}{R_{я}}$ , статизм характеристик  $s_x = \frac{\Delta\omega_H}{\omega_0} = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0}$

увеличивается.

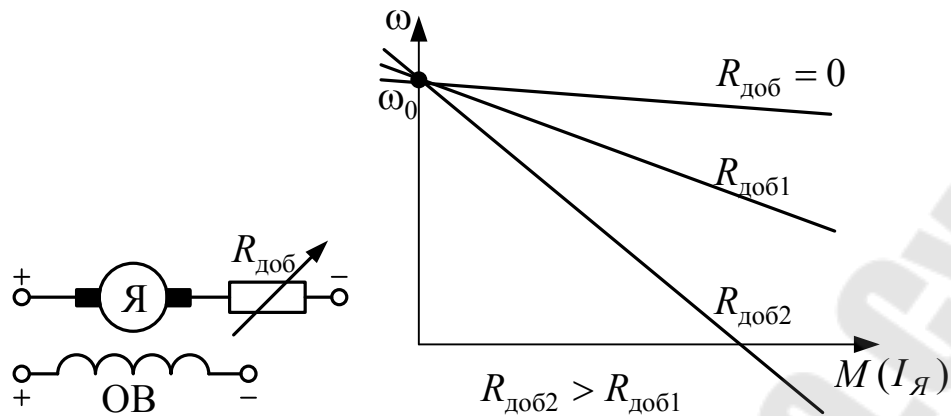


Рис. 3.12. Реостатное регулирование.

Рассмотрим энергетическую сторону. Уравнение электрического равновесия для якорной цепи:  $U = k \cdot \Phi \cdot \omega + I_{\text{я}} \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{доб}})$  умножим на ток якоря  $I_{\text{я}}$ . В результате получим:  $U \cdot I_{\text{я}} = k \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} \cdot \omega + I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{я}}$  или  $P_1 = M \cdot \omega + \Delta p_v$ , где  $\Delta p_v$  - переменные потери в цепи якоря.

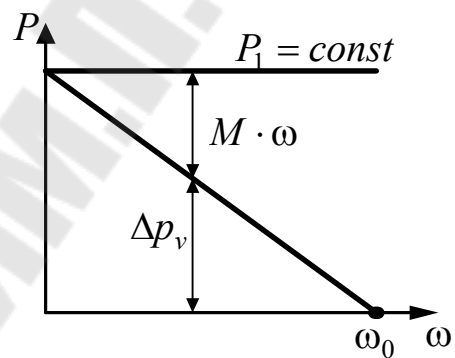


Рис. 3.13. Диаграмма регулирования.

Если при регулировании  $M_c = const$ , то  $I_{\text{я}} = const$  и потребляемая мощность  $P_1 = U \cdot I_{\text{я}} = const$ , а диаграмма регулирования  $P(\omega)$  выглядит как показано на рис. 47.

Таким образом, переменные потери в меди  $\Delta p_v = I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{я}}$  резко возрастают при расширении диапазона регулирования скорости.

На практике данный способ применяется в рабочих машинах, допускающих мягкие характеристики (ПТМ) и для реостатного пуска при питании от сети постоянного тока.

### 3. Регулирование изменением магнитного потока.

Представим кривую намагничивания в виде зависимости  $\Phi(I_{\text{в}})$ , показанном на рис. 48.

Номинальное значение магнитного потока  $\Phi_{\text{н}}$  незначительно отличается от значения  $\Phi_{\text{нас}}$  при насыщении магнитной системы, поэтому регулирование производится уменьшением тока возбуждения и потока. При этом скорость холостого хода

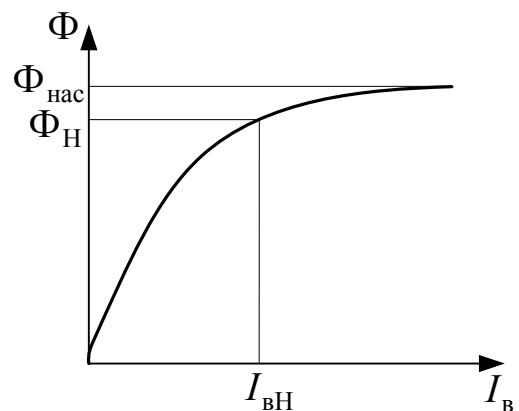


Рис. 3.14. Кривая намагничивания

$\omega_0 = \frac{U}{k \cdot \Phi}$  возрастает, а модуль жесткости уменьшается и характеристики смягчаются. Статизм характеристик изменяется в меньшей мере, чем при реостатном регулировании. Для построения искусственных характеристик можно воспользоваться точкой короткого замыкания:  $I_{кз} = \frac{U}{R_{яд}} = const$ , а

$M_{кз} = k \cdot \Phi \cdot I_{кз}$  уменьшается пропорционально потоку.  
Характеристики:

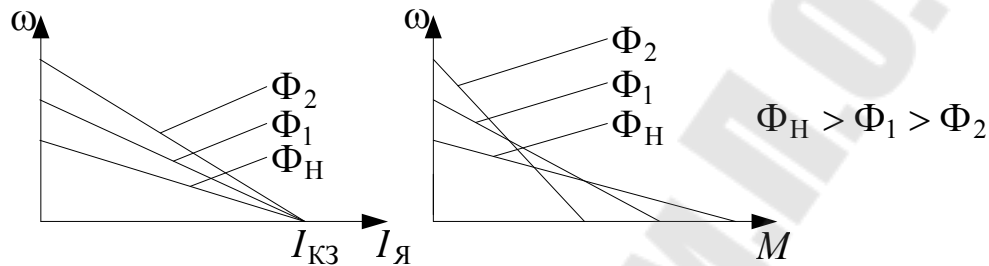


Рис. 3.15. Характеристики при регулировании магнитным потоком.

С уменьшение магнитного потока основных полюсов усиливается действие реакции якоря. Поэтому кратковременно допустимый ток  $I_{доп}$  и перегрузочная способность  $\lambda_I = \frac{I_{доп}}{I_H}$  уменьшаются. Если не учитывать незначительное изменение постоянных потерь мощности в ЭД, то его нагрев во всем диапазоне регулирования будет определяться допустимыми переменными потерями  $\Delta p_{вн} = I_H^2 \cdot R_{яд}$ , тогда длительно допустимый по условиям нагрева момент  $M_{дл.доп} = k \cdot \Phi \cdot I_H$  с уменьшением потока уменьшается. Скорость увеличивается, а допустимая мощность  $P_{дл.доп} = M_{дл.доп} \cdot \omega = const$ .

Данный способ применяется как в разомкнутых, так и в замкнутых ЭП для получения  $\omega > \omega_H$ , или для регулирования при постоянстве мощности.

### 3.5. Пуск и торможение двигателя постоянного тока независимого возбуждения

При питании ЭД от сети с  $U_c = const$  применяется ступенчатый реостатный пуск. Когда якорная цепь подключена к управляемому преобразователю (УП), то система управления обеспечивает пуск при плавном увеличении напряжения.

Для уменьшения времени торможения, а в ПТМ для получения низких скоростей или удержания груза применяют электрическое торможение электроприводов.

1. Рекуперативное торможение (генераторное) с обратным преобразованием энергии может происходить при питании ЭД от сети с активным  $M_C$  на валу, или при питании от реверсивного УП во время уменьшения скорости. Возникает торможение, когда  $\omega > \omega_0$  или  $\frac{E}{k \cdot \Phi} > \frac{U}{k \cdot \Phi}$ . При этом  $I_{Я} = \frac{U - E}{R_{Я}} < 0$  и  $M < 0$  становится тормозным. Электрическая мощность  $P_1 = U \cdot I_{Я} < 0$ . ЭД преобразует механическую энергию в электрическую, которую отдает в сеть. Характеристики с участками торможения во втором квадранте при активном  $M_C$  и при питании от УП показаны на рис. 50.

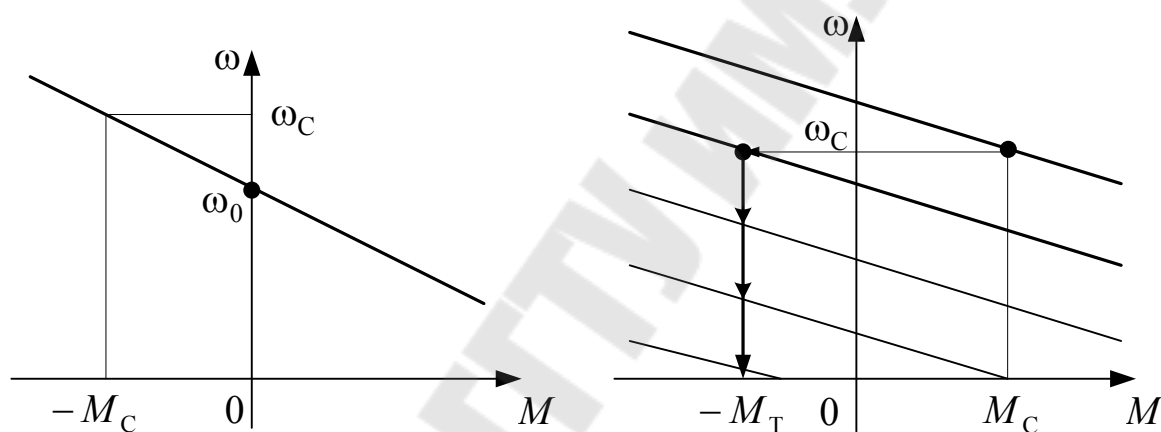


Рис. 3.16. Характеристики при рекуперативном торможении.

2. Торможение противовключением имеет место, когда ЭДС двигателя включена согласно с напряжением сети. Для ограничения тока в цепь якоря вводится значительное сопротивление (ступень  $R_{ПР}$  на схеме на рис. 51). После коммутации контактов (КВ – разомкнулись, КН - замкнулись) двигатель переходит с характеристики 1 на характеристику 2 во второй квадрант с участком торможения – а-б. Для ограничения тока при противовключении контактор КТ размыкает контакты вводя  $R_{ПР}$ .

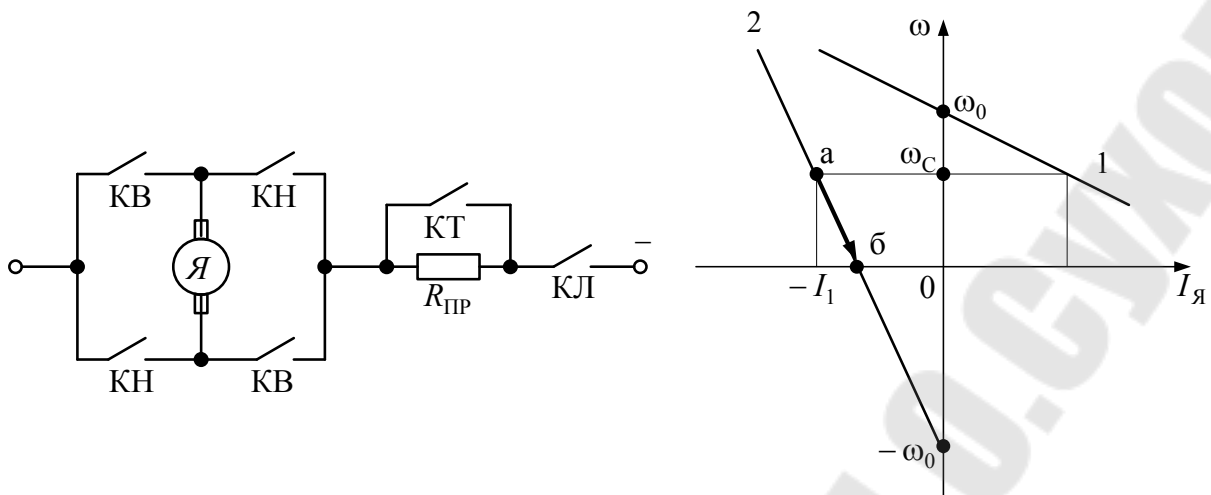


Рис. 3.17. Схема включения и характеристики при торможении противовключением.

Режим противовключения используется и при тормозном спуске тяжелого груза (четвертый квадрант: точка **а** на характеристике 2 на рис. 52).

Сопротивление  
противовключения

$$R_{\text{пр}} = \frac{-U - c \cdot \omega_c}{-I_c} - R_{\text{яд}} \text{ или}$$

$$R_{\text{пр}} = \frac{U - c \cdot (-\omega_c)}{I_c} - R_{\text{яд}}$$

ступени

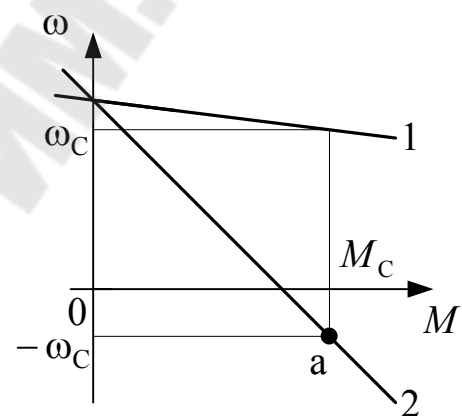


Рис. 3.18. Характеристики при тормозном спуске.

Электромагнитная мощность

$$P = (-M) \cdot \omega = M \cdot (-\omega) < 0,$$

**а**

потребляемая

$P_1 = (-U) \cdot (-I_{\text{я}}) = (U) \cdot (I_{\text{я}}) > 0$ . Таким образом, ЭД потребляет как механическую, так и электрическую энергию со стороны сети и суммарная рассеивается в цепи якоря.

3. Динамическое торможение соответствует режиму автономного генератора с независимым возбуждением.

Уравнение электрического равновесия:  $0 = c \cdot \omega + I_{\text{я}} \cdot (R_{\text{яд}} + R_{\text{Т}})$ .

Механическая характеристика записывается:  $\omega = -\frac{R_{\text{яд}} + R_{\text{Т}}}{c^2} \cdot M$ .

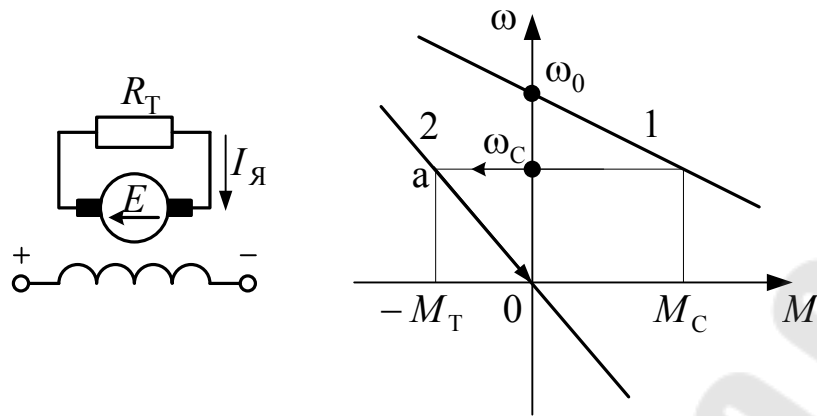


Рис. 3.19. Схема и характеристики при динамическом торможении.

Электромагнитная мощность  $P = (-M) \cdot \omega = M \cdot (-\omega) < 0$ . ЭД потребляет механическую энергию, которая после преобразования в электрическую расходуется в якорной цепи.

### 3.6. Структурные схемы двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Динамические свойства ДПТ НВ описываются системой (3.4).

Если представить переменные в приращениях к статическому режиму, то в операторной форме

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{в}} &= R_{\text{в}} \cdot (T_{\text{в}} \cdot p + 1) \cdot i_{\text{в}} \\ \Phi &= k_{\text{в}} \cdot i_{\text{в}} \\ u - e &= R_{\text{яд}} \cdot (T_{\text{яд}} \cdot p + 1) \cdot i_{\text{я}} \\ M &= L[k \cdot \Phi \cdot i_{\text{я}}] \\ e &= L[k \cdot \Phi \cdot i_{\text{я}}] \end{aligned} \right\}$$

где:  $i$ ,  $u$ ,  $\Phi$ ,  $M$  – являются функциями оператора  $p$ ;

$L[ ]$  - изображение по Лапласу произведения переменных;

$T_{\text{в}} = \frac{L_{\text{в}}}{R_{\text{в}}}$  и  $T_{\text{яд}} = \frac{L_{\text{яд}}}{R_{\text{яд}}}$  – электромагнитные постоянные времени цепей

возбуждения и якоря;

$k_{\text{в}} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta I_{\text{в}}}$  – коэффициент пропорциональности, определяемый по кривой намагничивания вблизи рабочей точки статического режима.

Представим описание в следующем виде

$$\left. \begin{aligned}
 i_B &= \frac{1/R_B}{T_B \cdot p + 1} \cdot u_B \\
 \Phi &= k_B \cdot i_B \\
 i_{Я} &= \frac{1/R_{Яд}}{T_{Яд} \cdot p + 1} \cdot \{u - L[k \cdot \Phi \cdot i_{Я}]\} \\
 M &= L[k \cdot \Phi \cdot i_{Я}]
 \end{aligned} \right\}$$

Теперь полная структурная схема (с учетом механической части) будет иметь вид, показанный на рис. 54.

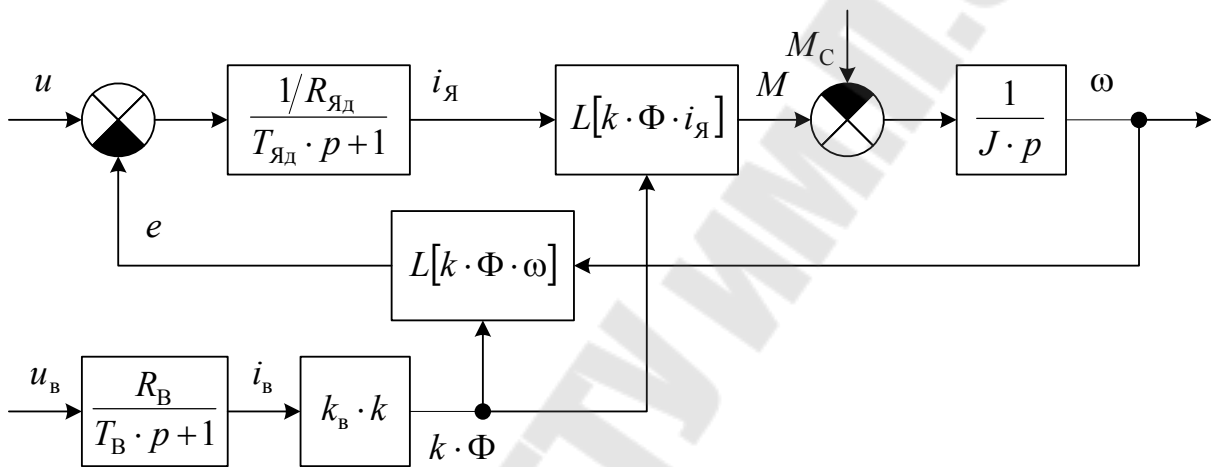


Рис. 3.20. Структурная схема ДПТ НВ.

Как видно из схемы, ДПТ НВ обладает двумя независимыми каналами управления. В динамических режимах каждый канал позволяет регулировать момент и скорость. Как ЭМП (с выходом в виде  $M$ ) ДПТ НВ по каналам представляется аperiodическими звеньями. Для режимов с  $c = k \cdot \Phi = const$  структурная схема представлена на рис. 55.

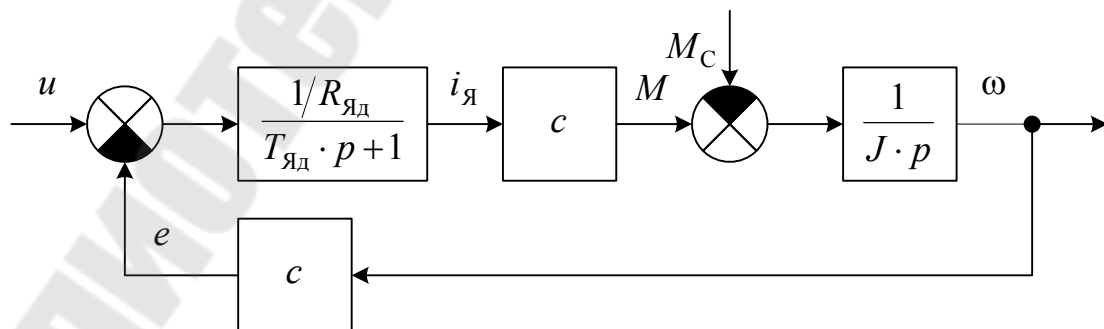


Рис. 3.21. Структурная схема ДПТ НВ при постоянстве магнитного потока.



Введем понятие “электромеханической” постоянной времени  $T_M = \frac{J}{\beta}$ , или для ДПТ НВ  $T_M = \frac{J \cdot R_{\text{Яд}}}{c^2}$  получим структурную схему в виде, показанном на рис. 56.

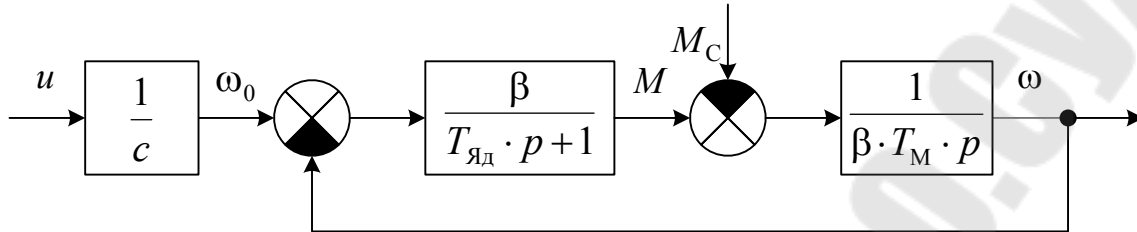


Рис. 3.22. Структурная схема ДПТ НВ при постоянстве магнитного потока.

Представляя ток нагрузки  $I_C = \frac{M_C}{c}$ , получим структурную схему в виде, показанном на рис. 57.

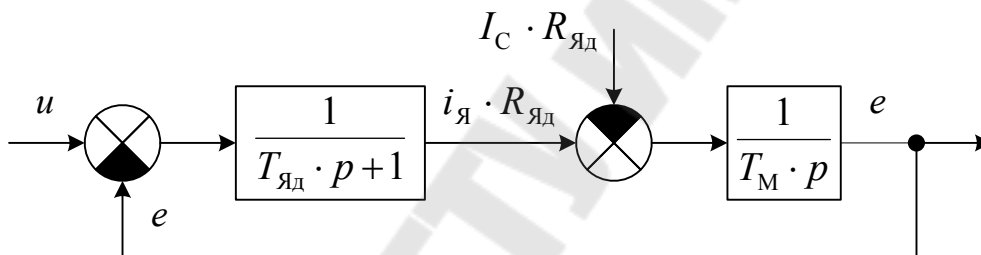


Рис. 3.23. Структурная схема ДПТ НВ при постоянстве магнитного потока.

При питании якорной цепи ЭД от источника тока, обеспечивающего определенное значение тока якоря  $I_{\text{Я}} = I_1 = \text{const}$  учитывая, что  $k_B = \Phi / I_B$ , управление производится только по цепи возбуждения.

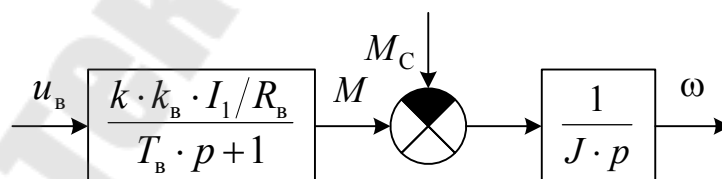


Рис. 3.24. Структурная схема ДПТ НВ при питании якоря от источника тока и управлении по цепи возбуждения.

ПФ по управлению со стороны цепи возбуждения  $M = \frac{1/R_B}{T_B \cdot p + 1} \cdot k \cdot k_B \cdot I_1 \cdot u_B$ .

В результате момент ЭД не зависит от скорости и механические характеристики абсолютно мягкие, как показано на рис. 59.

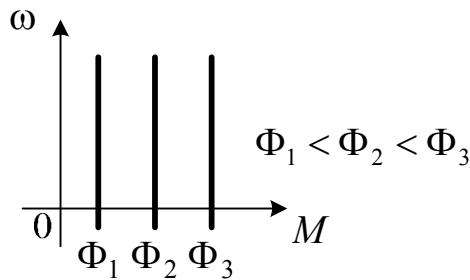


Рис. 3.25. Характеристики ДПТ НВ при постоянстве тока и управлении магнитным потоком.

### 3.7. Описание электромеханических процессов в двигателе постоянного тока последовательного возбуждения

Нормальная схема включения показана на рис. 60.

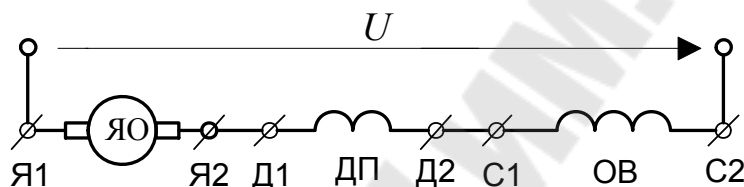


Рис. 3.26. Схема включения ДПТ последовательного возбуждения.

Математическую модель для данного ЭД можно получить, как и для ДПТ НВ. Однако включение ОВ последовательно с ЯО и то, что ток якоря является током возбуждения, приведет к следующему: в динамических режимах быстрое изменение тока якоря вызывает соответствующее изменение магнитного потока. При этом в полюсах и станине наводятся вихревые токи. Пренебрегая их влиянием на динамику можно получить существенную погрешность. Поэтому в математической модели влияние вихревых токов учитывают дополнительной фиктивной короткозамкнутой обмоткой(ОВТ). Схема модели в осях  $\alpha\beta$  показана на рис. 61.

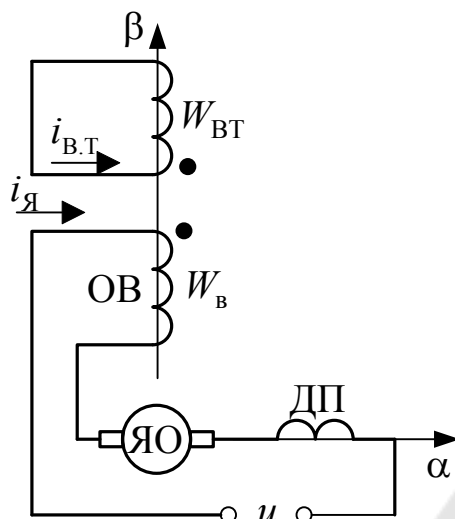


Рис. 3.27. Схема модели ДПТ ПВ.

Описание электромеханических процессов можно представить уравнениями

$$\left. \begin{aligned} 0 &= R_{\text{ВТ}} \cdot i_{\text{ВТ}} + W_{\text{ВТ}} \cdot \frac{d\Phi}{dt} \\ u &= R_{\text{яд}} \cdot i_{\text{я}} + L_{\text{яд}} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt} + k \cdot \Phi \cdot \omega + W_{\text{в}} \cdot \frac{d\Phi}{dt} \\ M &= k \cdot \Phi \cdot i_{\text{я}} \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

где:  $W$  – число витков соответствующих обмоток;  
 $R_{\text{яд}} = R_{\text{яО}} + R_{\text{ДП}} + R_{\text{ОБ}} + R_{\text{ЩК}}$  – сопротивление якорной цепи;  
 $L_{\text{яд}} = L_{\text{ДП}} + L_{\text{яО}} + L_{\text{ОБ}}$  – индуктивность рассеяния.

Индуктивность, связанная с главным потоком определяется последними слагаемыми в уравнениях электрического равновесия. ДПТ ПВ из-за ряда своих свойств широко применяют в подъемно-транспортных машинах.

Рассмотрим характеристику намагничивания в виде  $\Phi(I_{\text{в}})$ , показанную на рис. 62.

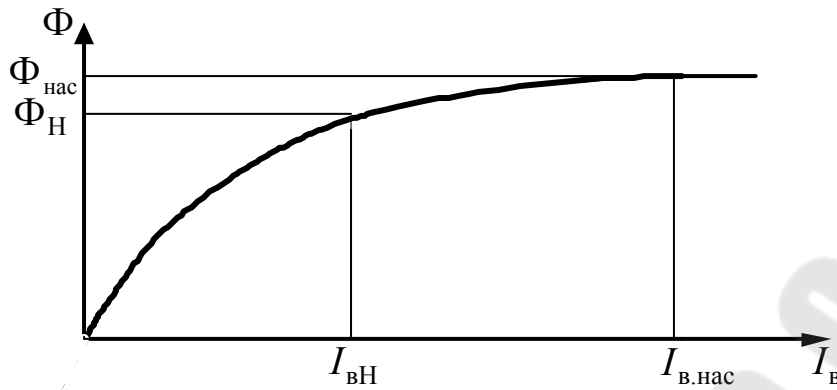


Рис. 3.28. Кривая намагничивания.

Ток, приводящий к насыщению магнитной системы, составляет  $I_{в.нас} = (1.6 \div 1.8) \cdot I_{вН}$  и сама характеристика не линейна. Для анализа режимов, при которых  $I_{в} \leq (1.2 \div 1.25) \cdot I_{вН}$ , кривую намагничивания обычно аппроксимируют двумя отрезками прямых, как показано на рис. 63.

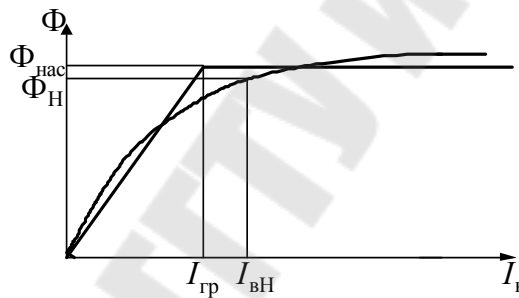


Рис. 3.29. Аппроксимация кривой намагничивания.

### 3.8. Статические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Учитывая зависимость  $\Phi = f(I_{я})$  и соответственно  $\Phi = f(M)$  при  $\frac{d}{dt} = 0$  из (3.11) получим электромеханическую и механическую характеристики

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi(I_{я})} - \frac{R_{яд}}{k \cdot \Phi(I_{я})} \cdot I_{я}, \quad \omega = \frac{U}{k \cdot \Phi(M)} - \frac{R_{яд}}{k \cdot [\Phi(M)]^2} \cdot M.$$

Рассмотрим характеристики, получаемые при аппроксимации кривой намагничивания двумя отрезками по участкам.

1.  $I_{в} \leq I_{гр}$  – магнитная система не насыщена  $\Phi = k_{в} \cdot I_{я}$  ( $k_{в} = const$ ).

Представляя  $I_{\text{Я}} = \frac{\Phi}{k_{\text{В}}}$ , получим  $M = k \cdot k_{\text{В}} \cdot I_{\text{Я}}^2 = \frac{k}{k_{\text{В}}} \cdot \Phi^2$ , или

$$\Phi = \sqrt{\frac{k_{\text{В}}}{k}} \cdot M.$$

В результате  $\omega = \frac{U}{k \cdot k_{\text{В}} \cdot I_{\text{Я}}} - \frac{R_{\text{Яд}}}{k \cdot k_{\text{В}}}$  и  $\omega = \frac{U}{\sqrt{k \cdot k_{\text{В}} \cdot M}} - \frac{R_{\text{Яд}}}{k \cdot k_{\text{В}}}$ .

Таким образом, при  $I_{\text{В}} \leq I_{\text{гр}}$  характеристики имеют гиперболический характер, а зависимость  $M = k \cdot k_{\text{В}} \cdot I_{\text{Я}}^2$  – параболический.

2.  $I_{\text{В}} \geq I_{\text{гр}}$  и  $k \cdot \Phi = k \cdot \Phi_{\text{нас}} = c = \text{const}$ . Статические характеристики становятся линейными  $\omega = \frac{U}{c} - \frac{R_{\text{Яд}}}{c} \cdot I_{\text{Я}}$  и  $\omega = \frac{U}{c} - \frac{R_{\text{Яд}}}{c^2} \cdot M$ .

Однако, учитывая, вид действительной кривой намагничивания, реальная характеристика (штриховая линия на рис. 64.) отличается от полученной.

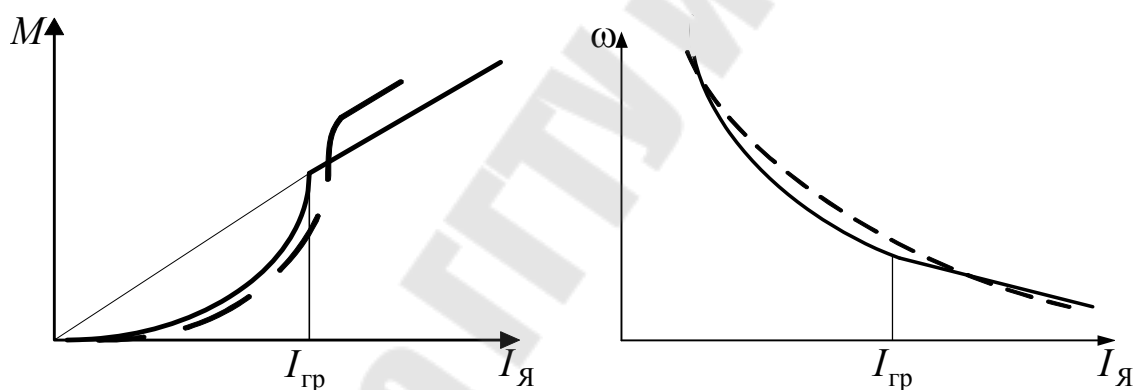


Рис. 3.30. Характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

Рассматривая характеристики можно отметить основные свойства:

1. Отсутствует идеальный холостой ход и недопустим режим с  $M_{\text{с}} = \text{const}$ , т.к. несмотря на наличие остаточного потока, скорость может превысить допустимое значение по условиям механической прочности.
2. При больших токах ДПТ ПВ развивает больший момент, чем ДПТ НВ и имеет большую перегрузочную способность по моменту при равных  $\lambda_{\text{Г}}$ .

Для серийных ДПТ ПВ в справочной и технической документации приводятся естественные универсальные характеристики в относительных величинах, например зависимости  $M(I_{\text{Я}})$  и  $n(I_{\text{Я}})$ , показанные на рис. 65.

За базовые значения (100%) принимаются номинальные величины. Имея подобные характеристики можно построить зависимость  $k \cdot \Phi = f(I_{\text{я}})$  в абсолютных величинах и на ее основании рассчитать электромеханическую и механическую характеристики.

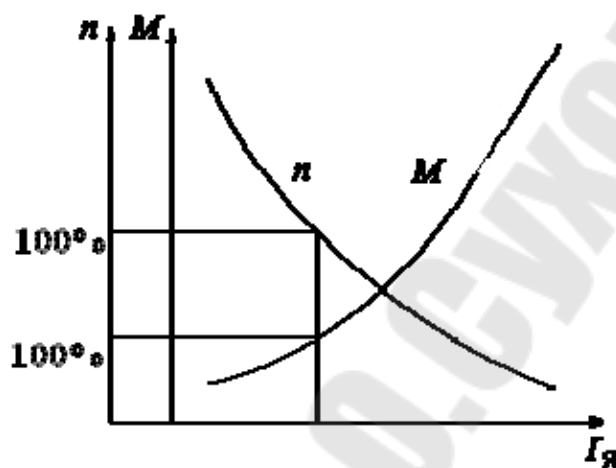


Рис. 3.31. Универсальные характеристики.

### 3.9. Искусственные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Как и ДПТ НВ, данный ЭД допускает аналогичные способы регулирования:

1. Регулирование изменением напряжения. Наиболее часто данный способ встречается в виде схем переключения нескольких ЭД с последовательного соединения на параллельное (см. рис. 66, 67).

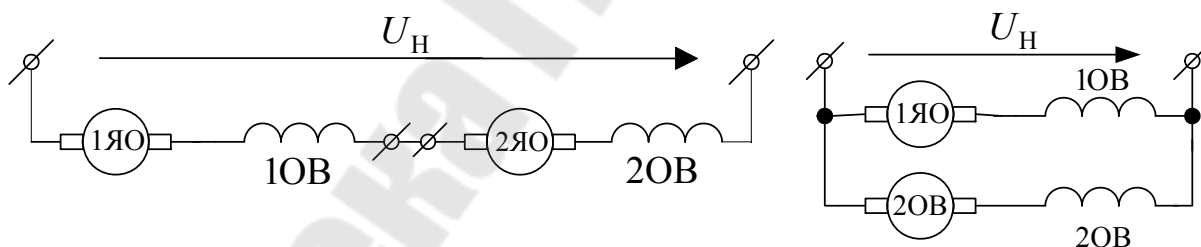


Рис. 3.32. Схема переключения двигателей с последовательного на параллельное.

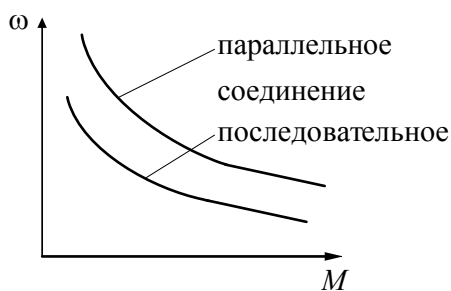


Рис. 3.33. Характеристики при переключении с последовательного на параллельное соединение.

Скорость при одинаковых значениях тока и момента отличаются примерно в 2 раза.

2. Регулирование введением добавочного сопротивления в цепь якоря (реостатное регулирование) (см. рис. 68). Введение добавочного сопротивления приводит к увеличению угловых

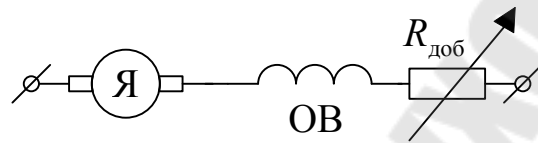


Рис. 3.34. Схема включения при реостатном регулировании.

коэффициентов искусственных характеристик по отношению к естественной  $\frac{R_{я}}{k \cdot \Phi}$  или  $\frac{R_{я}}{(k \cdot \Phi)^2}$ , где  $R_{я} = R_{яд} + R_{доб}$ . Вид характеристик показан на рис. 69.

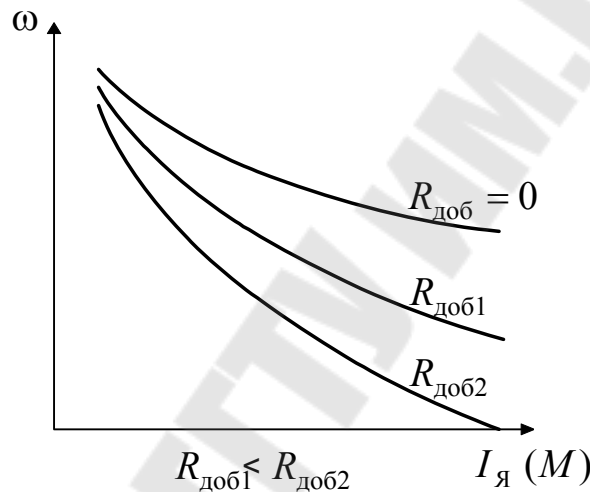


Рис. 3.35. Характеристики при реостатном регулировании.

Значения скорости на искусственной электромеханической характеристике  $\omega_{иi}$  при токе якоря  $I_{я} = I_i$  можно определить зная скорость на естественной характеристике  $\omega_{Еi}$  при том же значении тока из условия, что  $(k \cdot \Phi)_{иi} = (k \cdot \Phi)_{Еi}$

$$\omega_{иi} = \omega_{Еi} \cdot \frac{U - I_i \cdot (R_{яд} + R_{доб})}{U - I_i \cdot R_{яд}}$$

Особенности способа и энергетические показатели аналогичны реостатному регулированию ДПТ НВ.

3. Регулирование изменением магнитного потока. В зоне основных нагрузок магнитная система не насыщена и можно не только уменьшать, но и увеличивать поток. Уменьшение потока достигается шунтированием обмотки возбуждения, как показано на рис. 70. При

этом  $I_{\text{в}} = I_{\text{я}} - I_{\text{ш}}$ , и искусственные характеристики располагаются выше естественной.

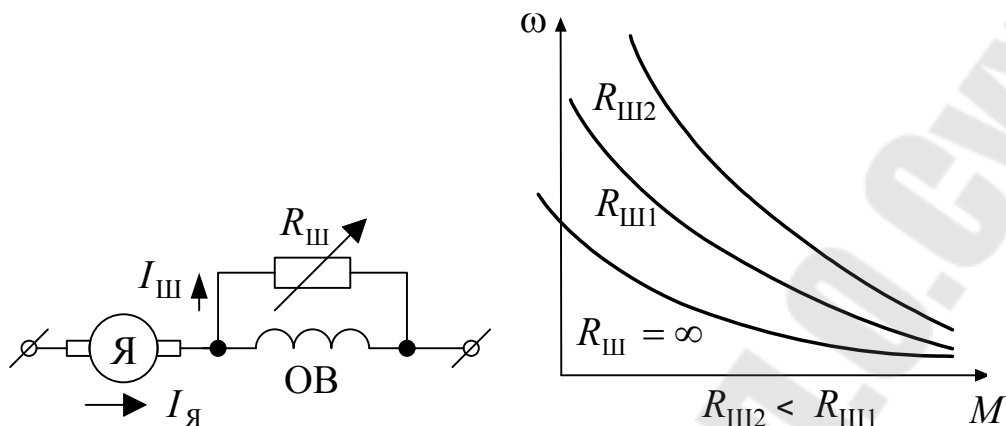


Рис. 3.36. Схема включения и характеристики при шунтировании обмотки возбуждения.

Диапазон регулирования скорости  $D_{\omega} = \frac{\omega_{\text{max}}}{\omega_{\text{Е}}} \leq 1.25 \div 1.5$ .

Для увеличения магнитного потока шунтируется обмотка якоря. Схема и вид характеристик показаны на рис. 71.

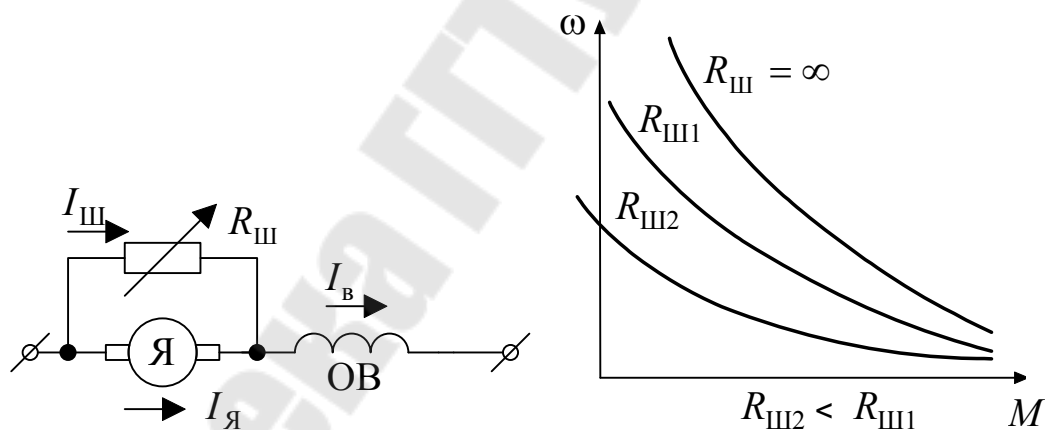


Рис. 3.37. Схема включения и характеристики при шунтировании обмотки якоря.

Ток возбуждения, состоит из 2-х составляющих  $I_{\text{в}} = I_{\text{я}} + I_{\text{ш}}$ . И до насыщения магнитной системы возможно увеличение потока. Диапазон регулирования с уменьшением нагрузки возрастает и появляется возможность получить скорость холостого хода.

С точки зрения энергетики регулирование изменением магнитного потока соизмеримо с реостатным регулированием.



### 3.10. Торможение двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Как и для ДПТ НВ данный двигатель допускает 3 способа электрического торможения:

1. Рекуперативное торможение. В нормальной схеме включения невозможно. В подъёмно-транспортных машинах реализуется при параллельном включении ОВ и якорной обмотки или при шунтировании якоря. Для обеспечения рекуперации энергии необходимо, чтобы скорость якоря превысила скорость идеального холостого хода. При этом 
$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}} = \frac{k \cdot \Phi \cdot \omega_0 - k \cdot \Phi \cdot \omega}{R_{\text{я}}} < 0$$
 и двигатель переходит в тормозной режим.
2. Торможение противовключением реализуется аналогично, как и для ДПТ НВ, но при противовключении изменение полярности напряжения производится только для обмотки якоря или обмотки возбуждения.
3. Динамическое торможение для ДПТ ПВ может быть реализовано 2-я способами:

3.1.С независимым возбуждением при включении ОВ в сеть, но с регулировочным сопротивлением большой мощности (см. рис. 72). Характеристики ЭД линейны и аналогичны характеристикам ДПТ НВ при динамическом торможении.

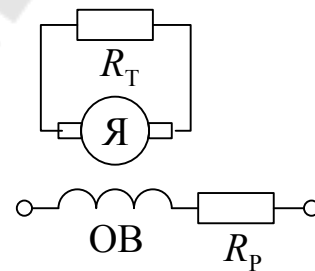


Рис. 3.38. Схема включения динамического торможения с независимым возбуждением.

3.2. Торможение с самовозбуждением. Схемы включения в двигательном и тормозном режимах показаны на рис. 73.

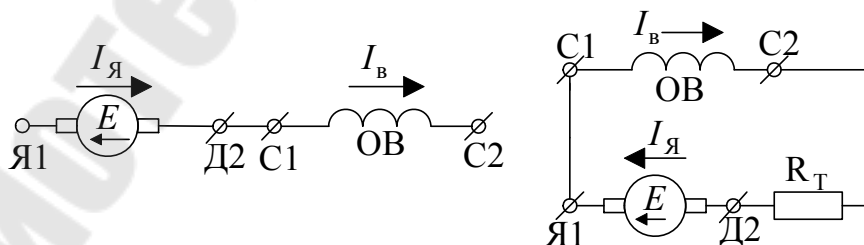


Рис. 3.39. Схемы включения в двигательном и тормозном режимах.

При переключении ЭД на схему торможения необходимо в ОВ сохранить направление тока  $I_{\text{в}}$ . В противном случае произойдет размагничивание машины и ЭДС станет равной нулю. Вторым условием

возникновения самовозбуждения является наличие общего решения двух характеристик: вольтамперной характеристики якорной цепи  $\Delta U = I_{\text{я}} \cdot (R_{\text{яд}} + R_{\text{т}})$  и зависимости  $E = k \cdot \Phi \cdot \omega$ , которую можно считать кривой намагничивания при данной скорости  $\omega$ . Графически покажем их с учетом аппроксимации кривой намагничивания двумя отрезками, как показано на рис. 74.

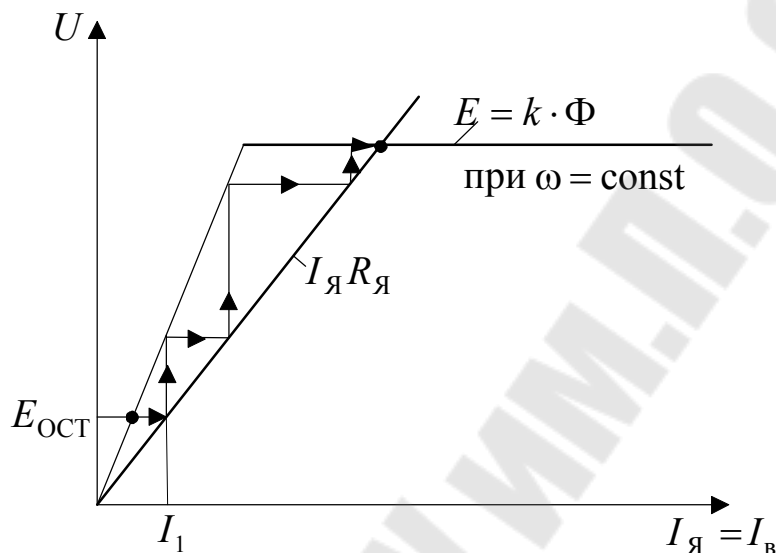


Рис. 3.40. Характеристики при торможении с самовозбуждением.

Под действием остаточной ЭДС  $E_{\text{ОСТ}}$  начинает протекать ток якоря –  $I_1$ , который создает новое значение потока, приводящего к увеличению ЭДС и т.д. Наименьшая скорость, при которой возможно самовозбуждение называется граничной скоростью и при ней характеристики совпадают. Механические характеристики показаны на рис. 75.

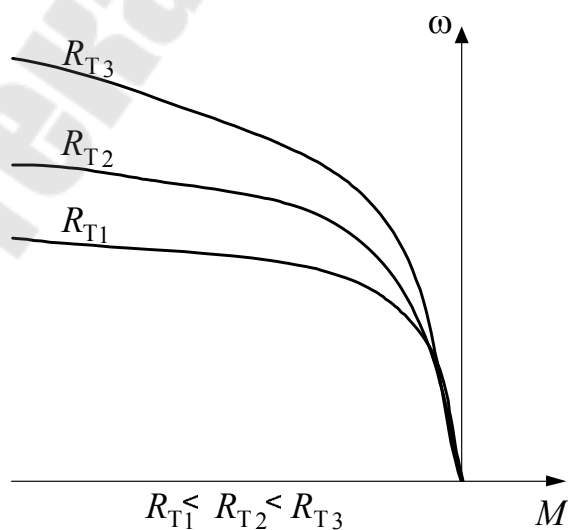


Рис. 3.41. Механические характеристики при торможении с самовозбуждением.

### 3.11. Особенности двигателя смешанного возбуждения

Нормальная схема включения показана на рис. 76.

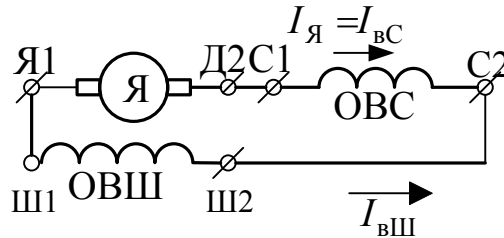


Рис. 3.42. Нормальная схема включения двигателя смешанного возбуждения.

Магнитный поток основных полюсов создается совместным действием намагничивающих сил (НС) двух обмоток возбуждения: параллельной (ОВШ) и последовательной (ОВС). Поэтому вид характеристик зависит от соотношения НС. Если представить их сумму как  $F_{\Sigma} = F_{Ш} + F_{С}$ , и привести параметры независимой обмотки к числу витков последовательной, то кривую намагничивания можно представить в виде зависимости  $\Phi(I_{Я})$ , имеющую вид, показанный на рис. 77.

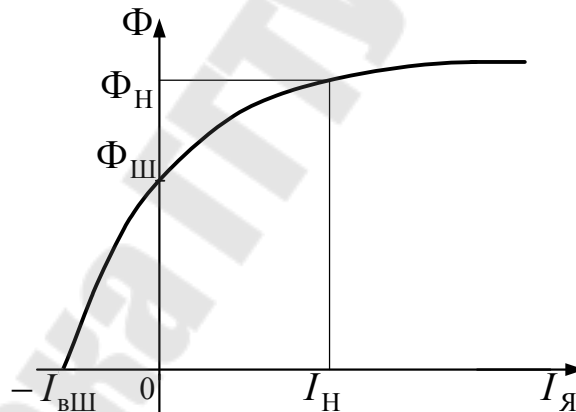


Рис. 3.43. Представление кривой намагничивания двигателя смешанного возбуждения.

При токе якоря  $I_{Я} = 0$  действует ОВШ и поток равен  $\Phi_{Ш}$ . С изменением полярности тока якоря (рекуперативный режим) НС обмоток направлены встречно и с увеличением тока суммарный поток уменьшается. При  $|I_{Я}| = I'_{ВШ}$  поток становится равным нулю. Скорость идеального холостого хода:  $\omega_0 = \frac{U}{k \cdot \Phi_{Ш}}$  причем,  $\Phi_{Ш} = (0.7 \div 0.85) \cdot \Phi_{Н}$ . С увеличением нагрузки от нуля (при положительном  $I_{Я}$ ) поток увеличивается, а скорость резко уменьшается. Когда наступает насыщение,

механическая характеристика линейна и достаточно жесткая. В зависимости от соотношения НС обмоток возбуждения  $\omega_0 = (1.3 \div 1.6) \cdot \omega_H$ .

Исходя из вида кривой намагничивания характеристики данного ЭД можно представить как характеристики ДПТ ПВ

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi(I_{\text{я}})} - \frac{R_{\text{яд}}}{k \cdot \Phi(I_{\text{я}})} \cdot I_{\text{я}} \quad \text{и} \quad \omega = \frac{U}{k \cdot \Phi(M)} - \frac{R_{\text{яд}}}{(k \cdot \Phi(M))^2} \cdot M,$$

но смещёнными вдоль оси абсцисс влево, как показано на рис. 78 сплошными линиями.

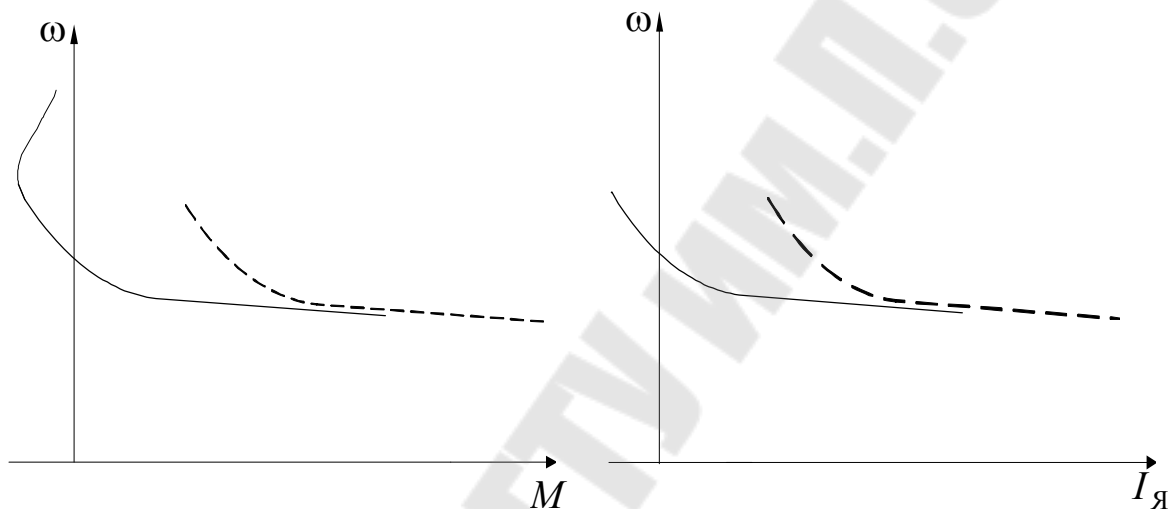


Рис. 3.44. Механическая и электромеханическая характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.

Однако в рекуперативном режиме с увеличением тока уменьшаются поток и тормозной момент. Поэтому механическая характеристика при увеличении скорости начинает приближаться к оси ординат справа.

### 3.12. Математическое описание электромеханических процессов в асинхронном электродвигателе

Для общего случая будем рассматривать двигатель с фазным ротором (АД ФР). Схемы включения АД и исходной модели представлены на рис. 79.

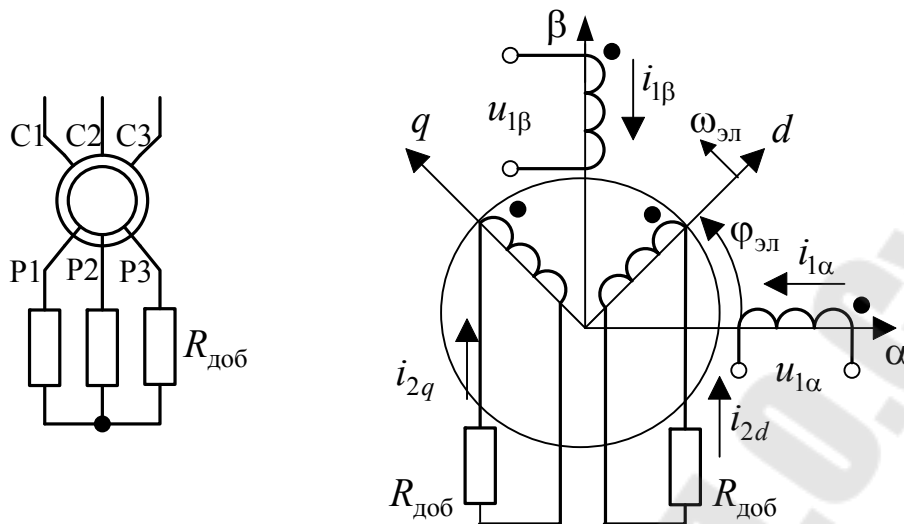


Рис. 3.45. Схема включения и схема модели асинхронного электродвигателя.

Представим математическое описание в координатной системе  $XU$ , вращающейся с синхронной скоростью  $\omega_k = \omega_{0эл}$ . Она численно равна круговой частоте сети  $\omega_c = 2\pi f_1$ , где  $f_1$  – частота тока статора.

В комплексной форме уравнения преобразования энергии:

$$\begin{cases} \bar{u}_1 = R_1 \cdot \bar{i}_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + j \cdot \omega_{0эл} \cdot \bar{\Psi}_1, \\ 0 = R'_{2\Sigma} \cdot \bar{i}'_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + j \cdot (\omega_{0эл} - \omega_{эл}) \cdot \bar{\Psi}_2, \\ M = p_d \cdot L_{12} \cdot \text{Im}[\bar{i}_1 \cdot \bar{i}'_2^*] \end{cases} \quad (3.12)$$

где  $R'_{2\Sigma} = R'_2 + R'_{доб}$  – суммарное сопротивление цепи фазы ротора, приведенное к обмотке статора;  $\bar{\Psi}_1, \bar{\Psi}_2$  – векторы потокосцепления статора и ротора;  $\omega_{эл}$  – скорость ротора в эл.рад/с.

Машина неявнополюсная. Потокосцепление обмоток

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_1 = L_1 \cdot \bar{i}_1 + L_{12} \cdot \bar{i}'_2, \\ \bar{\Psi}_2 = L_2 \cdot \bar{i}'_2 + L_{12} \cdot \bar{i}_1. \end{cases}$$

Откуда выразим токи

$$\begin{cases} \bar{i}_1 = \frac{\Psi_1}{L_1} - \frac{L_{12}}{L_1} \cdot \bar{i}'_2, \\ \bar{i}'_2 = \frac{\Psi_2}{L_2} - \frac{L_{12}}{L_2} \cdot \bar{i}_1 \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \bar{i}_1 = \frac{\Psi_1 \cdot L_2 - \Psi_2 \cdot L_{12}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2}, \\ \bar{i}'_2 = \frac{\Psi_2 \cdot L_1 - \Psi_1 \cdot L_{12}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2}. \end{cases}$$

Подставляя зависимости  $i(\psi)$  в (3.12) получим уравнение механической характеристики в потокосцеплениях, которое широко используются в моделях частотного ЭП:

$$\begin{cases} \bar{u}_1 = \frac{R_1 \cdot L_2}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2} \cdot \bar{\psi}_1 - \frac{R_1 \cdot L_{12}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2} \cdot \bar{\psi}_2 + \frac{d\bar{\psi}_1}{dt} + j \cdot \omega_{0\text{эл}} \cdot \bar{\psi}_1, \\ 0 = \frac{R'_{2\Sigma} \cdot L_1}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2} \cdot \bar{\psi}_2 - \frac{R'_{2\Sigma} \cdot L_{12}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2} \cdot \bar{\psi}_1 + \frac{d\bar{\psi}_2}{dt} + j \cdot (\omega_{0\text{эл}} - \omega_{\text{эл}}) \cdot \bar{\psi}_2, \\ M = p_{\text{д}} \cdot \frac{L_{12}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2} \cdot \text{Im}(\bar{\psi}_1 \cdot \bar{\psi}_2^*) \end{cases} \quad (3.13)$$

Аналогично можно получить описание АД с переменными в других координатных системах.

### 3.13. Описание статических режимов асинхронного двигателя

Для описания используем действующие значения токов и напряжений. Учтем, что  $\bar{I}_\mu = \bar{I}_1 + \bar{I}'_2$ , а  $\bar{\psi}_\mu = \bar{I}_\mu \cdot L_{12}$  – рабочее потокосцепление. Представим индуктивности рассеяния  $L_{1\sigma} = L_1 - L_{12}$  и  $L_{2\sigma} = L_2 - L_{12}$ , а индуктивные сопротивления  $X_1 = \omega_{0\text{эл}} \cdot L_{1\sigma}$ ,  $X'_2 = \omega_{0\text{эл}} \cdot L'_{2\sigma}$  и  $X_\mu = \omega_{0\text{эл}} \cdot L_{12}$ . При равенстве нулю  $\frac{d\psi}{dt} = 0$  уравнения электрического равновесия после преобразования (3.12) запишутся

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = R_1 \cdot \bar{I}_1 + j \cdot X_1 \cdot \bar{I}_1 + j \cdot X_\mu \cdot \bar{I}_\mu, \\ 0 = R'_{2\Sigma} \cdot \bar{I}'_2 + j \cdot X'_2 \cdot s \cdot \bar{I}'_2 + j \cdot X'_2 \cdot s \cdot \bar{I}_\mu, \end{cases}$$

где  $s = \frac{\omega_{0\text{эл}} - \omega_{\text{эл}}}{\omega_{0\text{эл}}} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  – скольжение, или относительная разность скоростей, которая определяет частоту тока ротора  $f_2 = f_1 \cdot s$ .

Слагаемое  $j \cdot X_\mu \cdot \bar{I}_\mu = \bar{E}_1 = -\bar{E}'_2$  представляет собой ЭДС, наводимую в обмотках (для ротора при  $s = 1$ ). Теперь уравнения

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = R_1 \cdot \bar{I}_1 + j \cdot X_1 \cdot \bar{I}_1 + \bar{E}_1, \\ \bar{E}'_2 = \frac{R'_{2\Sigma}}{s} \cdot \bar{I}'_2 + j \cdot X'_2 \cdot \bar{I}'_2. \end{cases} \quad (3.14)$$

Система (3.14) справедлива как для 2-х фазной модели, так и для 3-х фазного АД, поскольку их переменные пропорциональны и представлены

в векторной форме. Можно так же видеть, что (3.14) соответствует Т-образной схеме замещения, одной фазы, показанной на рис. 80.

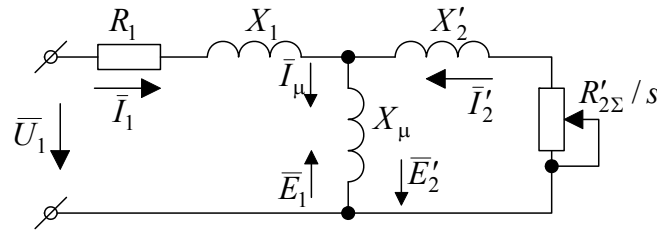


Рис. 3.46. Т-образная схема замещения.

Погрешность этой схемы определяется отсутствием учета потерь в стали. При необходимости учета вводится контур вихревых токов.

Для практических расчетов более удобна Г-образная схема замещения с вынесенным на зажимы статора контуром намагничивания, представленная на рис. 81.

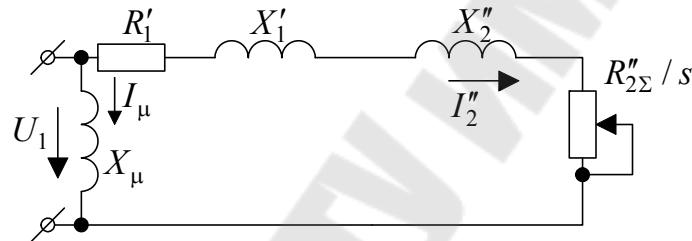


Рис. 3.47. Г-образная схема замещения.

Для АД с мощностями  $P_H \geq 10$  кВт вынесение контура намагничивания вызывает погрешность не более 5%.

### 3.14. Статические характеристики асинхронного двигателя

Электромагнитная мощность, передаваемая магнитным полем в ротор:  $P_{12} = M \cdot (\omega_0 - \omega) = M \cdot \omega_0 \cdot s$ . В соответствии со схемой замещения она расходуется на потери в роторной цепи:  $\Delta p_2 = P_{12} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot R'_{2\Sigma}$ , где  $m_1$  – число фаз статора. Теперь

$$M = \frac{m_1 \cdot I_2'^2 \cdot R'_{2\Sigma}}{\omega_0 \cdot s}.$$

По схеме замещения запишем

$$I'_2 = I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_{2\Sigma}/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (3.15)$$

В результате

$$M = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot R'_{2\Sigma}}{\omega_0 \cdot [(R_1 + R'_{2\Sigma}/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2]}, \quad (3.16)$$

где  $\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p_d}$  - синхронная скорость.

(3.15) представляет собой электромеханическую, а (3.16) – механическую характеристики. При графическом представлении по оси ординат указывая не скольжение, а скорость  $\omega = \omega_0 \cdot (1 - s)$ .

Механическая характеристика имеет экстремумы, ограничивающие устойчивый участок работы. Координаты критической точки:

$$M_K = \pm \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot [R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}]}, \quad (3.17)$$

$$s_K = \pm \frac{R'_{2\Sigma}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}, \quad (3.18)$$

и  $\omega_K = \omega_0 \cdot (1 - s_K)$ . Знаки "±" относятся соответственно к двигательному и тормозному режимам. Естественная механическая характеристика показана на рис. 82.

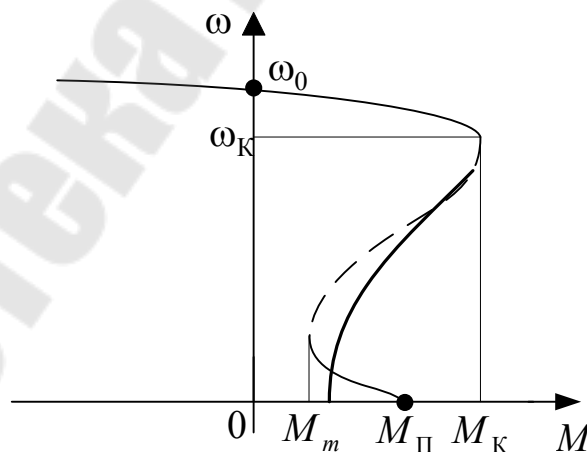


Рис. 3.48. Естественная механическая характеристика АД.

(3.16) достаточно точно аппроксимирует устойчивый участок характеристики. Физические процессы в роторе при больших скольжениях



могут приводить к появлению провала в механической характеристике и реальная будет отличаться (штриховая линия на рис. 82).

Если разделить (3.16) на (3.17) то получаем выражение механической характеристики в виде формулы Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + q \cdot s_K)}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} + 2 \cdot q \cdot s_K}, \quad (3.19)$$

где  $q = \frac{R_1}{R'_{2\Sigma}}$ .

Если допустимо принять  $q=0$ , то получим упрощенную формулу Клосса

$$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}$$

Основные точки характеристики:

1. Идеальный холостой ход при синхронной скорости ротора

$$M = 0, s = 0, \omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p_d}, n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p_d}.$$

2. Номинальный режим

$$M = M_H, \omega_H,$$

$s_H = (3 \div 15)\%$  в зависимости от исполнения ротора.

3. Критическая точка

$$M = M_K, s = s_K, \omega_K = \omega_0(1 - s_K).$$

Кратность критического момента

$$\lambda_K = \frac{M_K}{M_H} = 1,5 \div 2,5.$$

4. Режим короткого замыкания (пуск)

$$\omega = 0, s = 1, M = M_{II}.$$

Кратность пускового момента

$$\lambda_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_H} = 1 \div 2.$$

У некоторых АД присутствует провал характеристики (штриховая линия на рис. 82) с кратностью минимального момента  $\lambda_m = \frac{M_m}{M_H} = 0,7 \div 1$ .

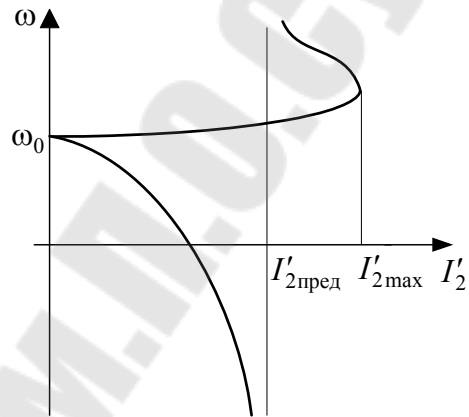
Электромеханическая характеристика, описываемая (3.15), так же нелинейна и имеет экстремумы. При синхронной скорости ( $s = 0$ ) ток ротора  $I'_2 = 0$ . Максимальное значение тока:

$$I'_{2\max} = \frac{U_1}{(X_1 + X'_2)}$$

при  $s = -\frac{R'_{2\Sigma}}{R_1}$  в генераторном режиме.

Когда скольжение стремится к  $\pm \infty$  имеем:

$$I'_{2\text{пред}} = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}.$$



### 3.15. Искусственные характеристики асинхронного двигателя

С учетом зависимости  $\omega_0$  от параметров АД механическая характеристика (3.16) запишется:

$$M = \frac{p_d m_1 U_1^2 \frac{R'_{2\Sigma}}{s}}{2\pi f_1 \left[ \left( R_1 + \frac{R'_{2\Sigma}}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]},$$

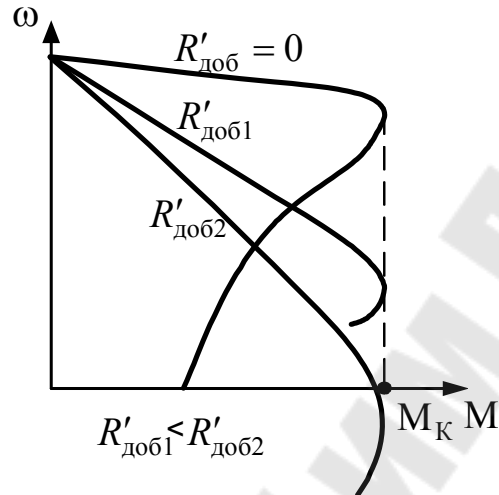
где  $m_1$  - число фаз обмотки статора.

Из анализа выражения видно, что искусственные зависимости  $\omega(M)$  можно получить изменением:

- активных и индуктивных сопротивлений цепей АД;
- числа пар полюсов;
- напряжения на обмотке статора;
- частоты тока статора.

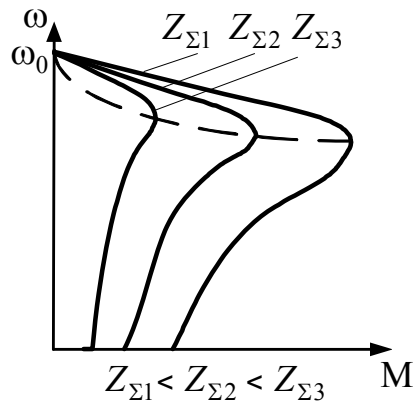
Для получения искусственных характеристик и их сравнения воспользуемся так же выражениями (3.16), (3.17), (3.18).

1. Регулирование при введении добавочного сопротивления в цепь ротора (реостатное регулирование) ( $R'_{2\Sigma} = \text{var}$ ). Синхронная скорость и критический момент не изменяются, а критическое скольжение  $s_K = \pm A \cdot R'_{2\Sigma}$  пропорциональное полному сопротивлению цепи ротора увеличивается. Критическая скорость  $\omega_K = \omega_0(1 - s_K)$  уменьшается и характеристики приобретают вид:



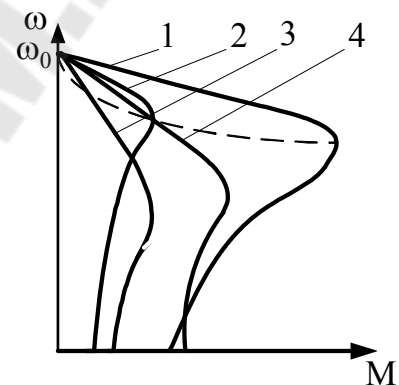
Полная электромагнитная мощность  $P = M\omega_0$ . Потери в цепи ротора  $\Delta p_2 = m_1 I_2'^2 (R'_2 + R'_{доб})$  при  $M_C = \text{const}$  с увеличением  $R'_{доб}$  возрастают. Ток ротора не изменяется, а рост потерь энергии происходит за счет сопротивления вне ЭД. Таким образом, если с изменением скорости условия охлаждения не изменяются, то длительно допустимый по нагреву момент не изменяется и равен  $M_H$ . К особенностям данного способа следует отнести возможность увеличения пускового момента с одновременным ограничением пускового тока.

2. Регулирование при изменении сопротивлений  $R_{1\Sigma}, X_{1\Sigma}, X'_{2\Sigma}$ . Синхронная скорость  $\omega_0 = \text{const}$ , а критические значения скольжения и момента уменьшаются:



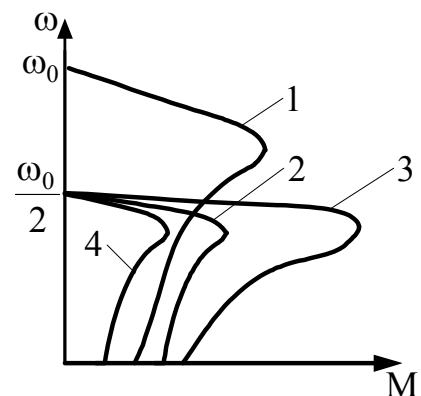
Введение добавочных сопротивлений в цепь статора применяется для ограничения пусковых токов ЭД средней и большой мощности. В многодвигательных ЭП с АД КЗ применяется подрегулирование скорости за счет введения сопротивления в цепь выпрямленного тока статора.

**3** Для АДФР в отдельных случаях применяют одновременное введение индуктивного и активного сопротивлений в цепь ротора. Характеристики: 1 – естественная; 2 – введение только  $X_{доб}$ ; 3 – последовательное включение  $X_{доб}$  и  $R_{доб}$ ; 4 – параллельное включение сопротивлений.



При параллельном включении, за счет перераспределения тока ротора между сопротивлениями с изменением  $f_2$  момент при пуске изменяется незначительно.

**4. Регулирование изменением числа пар полюсов.** Данный способ позволяет изменять синхронную скорость, но регулирование производится ступенчато. В общепромышленных сериях АД (4А, АИР и д.р.) обмотка статора имеет дополнительные выводы и при их переключении соотношение  $p_{д2} : p_{д1} = 2$ . Характеристики: 1 - характеристика при  $p_{д1}$ ; 2 - характеристика при  $p_{д2}$  и схеме переключения с постоянством момента (например, Y/YУ), 3 - характеристика при  $p_{д2}$  и схеме переключения с постоянством мощности (например, Δ/YУ), 4 - характеристика при  $p_{д2}$  для ЭД, предназначенного для центробежных машин.



При наличии 2-х обмоток выпускают 3-х

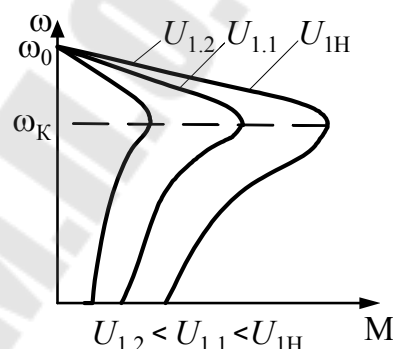
и 4-х скоростные ЭД. Для подъёмно-транспортных машин выпускают 2-х скоростные двигатели с двумя обмотками при соотношениях числа пар полюсов  $p_{д2} : p_{д1} = 4 \div 8$ .

5. Регулирование изменением напряжения на обмотке статора  $U_1$  и частоты тока статора  $f_1$ . При работе на устойчивой части механической характеристики магнитная система не насыщена. Если пренебречь падением напряжения на обмотке статора, то можно записать:

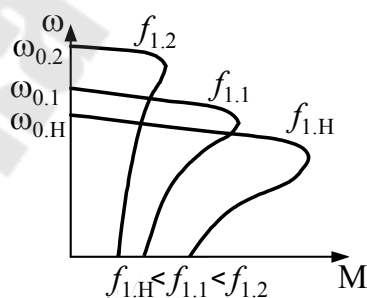
$$U_1 = E_1 = 4.44k_{обм}W_1f_1\Phi. \quad (3.20)$$

Таким образом, чтобы не произошло насыщение необходимо напряжение уменьшать, а частоту увеличивать. В противном случае, с наступлением насыщения резко увеличивается ток намагничивания, который в номинальном режиме уже составляет  $I_\mu = (0.25 \div 0.35) \cdot I_H$ .

При уменьшении  $U_1$  скольжение  $s_K = const$ , а критический момент уменьшается пропорционально квадрату напряжения. Диапазон регулирования ограничен  $\omega_K$ . Для расширения диапазона применяют АД КЗ с повышенным скольжением или АДФР с введенным добавочным сопротивлением.



При увеличении частоты  $f_1$  синхронная скорость возрастает, а критический момент и перегрузочная способность уменьшаются. Диапазон регулирования обычно ограничен механической прочностью. Характеристики:



Для расширения диапазона и более полного использования ЭД одновременно с частотой уменьшают и напряжение. Если производить регулирование, обеспечивающее  $\Phi = const$ , то по (3.20) закон частотного регулирования (взаимосвязь  $U_1$  и  $f_1$ ):  $U_1/f_1 = const$ . Для сохранения же перегрузочной способности по (3.17) необходим закон  $U_1^2/f_1 = const$ . В общем случае, для сохранения примерно постоянными перегрузочной способности и КПД закон частотного регулирования определяется на

основе механической характеристики исполнительного механизма по формуле М.П. Костенко:

$$\frac{U_{1.1}}{U_{1H}} = \frac{f_{1.1}}{f_{1H}} \cdot \sqrt{\frac{M_{C.1}}{M_{CH}}},$$

где  $M_{CH}$  - значение статического момента при работе АД на естественной характеристике, а  $M_{C1}$  - значение при работе на характеристике, определяемой частотой  $f_{1.1}$  и напряжением  $U_{1.1}$ . Для использования формулы отношения статических моментов заменяют отношением скоростей в соответствии с характеристикой  $\omega(M_C)$ . Затем, принимая, что скорость пропорциональна частоте, подставляют соотношение частот.

### 3.16. Динамические свойства асинхронного двигателя

Для сокращения записи обозначим:

$$A_1 = \frac{L_1}{L_1 L'_2 - L_{12}^2}, \quad A_2 = \frac{L'_2}{L_1 L'_2 - L_{12}^2}, \quad A_{12} = \frac{L_{12}}{L_1 L'_2 - L_{12}^2}.$$

Теперь уравнение механической характеристики в потокосцеплениях (3.13):

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{1X}}{dt} &= u_{1X} - R_1 A_2 \psi_{1X} + R_1 A_{12} \psi_{2X} + \omega_{0эл} \psi_{1Y} \\ \frac{d\psi_{2Y}}{dt} &= u_{1Y} - R_1 A_2 \psi_{1Y} + R_1 A_{12} \psi_{2Y} - \omega_{0эл} \psi_{1X} \\ \frac{d\psi_{2X}}{dt} &= -R'_2 A_1 \psi_{2X} + R'_2 A_{12} \psi_{1X} + (\omega_{0эл} - \omega_{эл}) \psi_{2Y} \\ \frac{d\psi_{2Y}}{dt} &= -R'_2 A_1 \psi_{2Y} + R'_2 A_{12} \psi_{1Y} - (\omega_{0эл} - \omega_{эл}) \psi_{2X} \\ M &= p_d A_{12} (\psi_{2X} \psi_{1Y} - \psi_{2Y} \psi_{1X}) \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

При построении полной структурной схемы по (3.21) требуются узлы произведения переменных, что определяет нелинейность модели. Для получения аналитических оценок динамических свойств можно использовать разложение в ряд Тейлора в режиме малых отклонений. В полном виде (3.21) применяется для моделирования с использованием численных методов.

При аналитических исследованиях обычно ограничиваются режимом на устойчивой части механической характеристики при  $|s| < s_K$ . В этом случае колебания скорости незначительны и изменение токов не вызывает существенных отклонений потокосцепления. В результате можно считать, что  $\frac{d\psi}{dt} = 0$ . При этом уравнение электрического равновесия для статора:

$$\bar{\psi}_1 = \frac{\bar{u}_1 - R_1 \bar{i}_1}{j\omega_{0эл}} = -j \frac{\bar{u}_1 - R_1 \bar{i}_1}{\omega_{0эл}}.$$

Пренебрегая падением напряжения:  $\Delta U_1 = R_1 i_1 = 0$ , получаем  $\bar{\psi}_1 = -j \frac{\bar{u}_1}{2\pi f_1}$ . Т.о., при частотном регулировании и работе АД на устойчивой части характеристики, потокосцепление статора зависит в первую очередь от  $f_1$  и  $\bar{u}_1$ . Введем понятие абсолютного скольжения:

$$s_a = \frac{\omega_{0эл} - \omega_{эл}}{\omega_{0элн}} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_{0н}},$$

где индекс “н” обозначает синхронную скорость при номинальной частоте ( $f_{1н}$ ).

Используя выражения электромагнитной постоянной времени АД:

$$T_{\mathcal{E}} = \frac{L_{1\sigma} + L'_{2\sigma}}{R'_2} = \frac{1}{\omega_{0элн} \cdot s_K},$$

после преобразований (3.21) для закона  $\psi_1 = \text{const}$  получаем:

$$M = \frac{2M_K}{(T_{\mathcal{E}} p + 1)(T_{\mathcal{E}} p + 1) \cdot \frac{s_K}{s_a} + \frac{s_a}{s_K}}. \quad (3.22)$$

Для переменных 3-х фазного АД (с учетом  $R_1 = 0$ ):  $M_K = \frac{3(U_1/\omega_0)^2}{2(X_{1н} + X'_{2н})}$ .

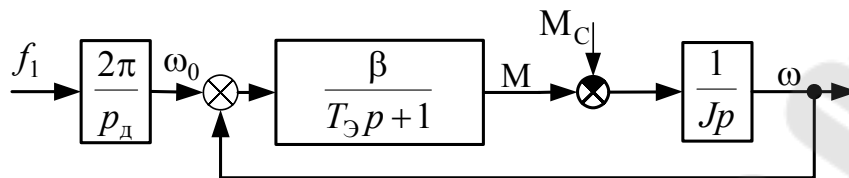
В статическом режиме (3.22) представляет формулу Клосса. Если раскрыть скобки в (3.22) и разложить в ряд Тейлора при  $s_a \ll s_K$ , то уравнение динамической механической характеристики:

$$(T_{\mathcal{E}} p + 1) \cdot M = \beta \cdot (\omega_0 - \omega),$$

где для линеаризованной характеристики модуль жесткости:

$$\beta = \frac{2M_K}{\omega_{0H} \cdot s_K}$$

Структурная схема АД для участка характеристики при  $s_a < s_K$ :



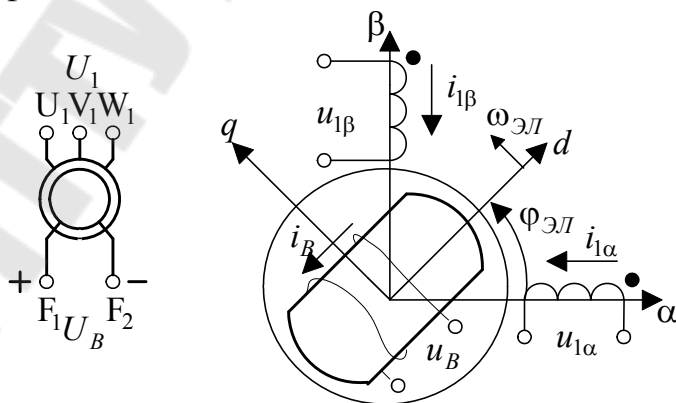
Таким образом, по окончании процессов связанных с включением (т.е. после выхода на устойчивую часть характеристики) и при питании от источника напряжения, АД представляется апериодическим звеном 1-й степени в контуре регулирования момента при условии, что  $\psi_1 = const$ , аналогично ДПТ НВ при  $\Phi = const$ .

### 3.17. Электромеханические свойства синхронного двигателя

Рассмотрим в общем случае явнополюсную машину с ОВ на роторе. Схемы включения ЭД и его двухфазной модели:

Через контактные кольца постоянный ток подводится в обмотку возбуждения, расположенную по оси d. Обмотки статора питаются синусоидальным напряжением:

$$\left. \begin{aligned} u_{1\alpha} &= U_{1m} \cdot \sin \omega_{0эл} t \\ u_{1\beta} &= -U_{1m} \cdot \cos \omega_{0эл} t \end{aligned} \right\}$$



где  $U_{1m}$  - амплитудное значение фазного напряжения на обмотке статора.

Уравнения электрического равновесия:

$$\left. \begin{aligned} u_{1\alpha} &= R_1 i_{1\alpha} + \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt} \\ u_{1\beta} &= R_1 i_{1\beta} + \frac{d\psi_{1\beta}}{dt} \\ u_{\epsilon} &= R_1 i_{\epsilon} + \frac{d\psi_{\epsilon}}{dt} \end{aligned} \right\}$$

Якорь СД вращается синхронно с полем статора, но в двигательном режиме отстает на т.н. “угол вылета ротора”:



$$\theta_{\text{эл}} = \varphi_{0\text{эл}} + \varphi_{\text{эл}} = \omega_{0\text{эл}} t - \omega_{\text{эл}} t.$$

Для анализа переменные СД приводятся к координатной системе  $dq$ , которая вращается с синхронной скоростью  $\omega_{0\text{эл}}$ . После преобразования:

$$\left. \begin{aligned} U_{1m} \sin \theta_{\text{эл}} &= R_1 i_{1d} + \frac{d\psi_{1d}}{dt} - \omega_{\text{эл}} \psi_{1q} \\ -U_{1m} \cos \theta_{\text{эл}} &= R_1 i_{1q} + \frac{d\psi_{1q}}{dt} + \omega_{\text{эл}} \psi_{1d} \\ u_{\text{в}} &= R_{\text{в}} i_{\text{в}} + \frac{d\psi_{\text{в}}}{dt} \\ M &= p_{\text{д}} (\psi_{1d} i_{1q} - \psi_{1q} i_{1d}) \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

Потокосцепление статорных обмоток:  $\psi_{1d} = L_{1d} \cdot i_{1d} - L_{12} \cdot i_{\text{в}}$ ,  
 $\psi_{1q} = L_{1q} \cdot i_{1q}$ .

Для описания статического режима принимаем:  $\frac{d\psi}{dt} = 0$ ,  $\omega_{0\text{эл}} = \omega_{\text{эл}}$ ,  
 $i_{\text{в}} = I_{\text{в}} = \text{const}$ . Поскольку  $L_{1d}$  и  $L_{1q}$  полные индуктивности, то обычно  $X_1 \gg R_1$  и активным сопротивлением можно пренебречь. Амплитуда ЭДС, наводимая в обмотке статора  $E_m = \omega_{0\text{эл}} I_{\text{в}} L_{12}$ . Теперь уравнения запишутся:

$$\left. \begin{aligned} U_{1m} \sin \theta_{\text{эл}} &= -\omega_{0\text{эл}} I_{1q} L_{1q} = -I_{1q} X_{1q} \\ -U_{1m} \cos \theta_{\text{эл}} &= \omega_{0\text{эл}} I_{1d} L_{1d} - \omega_{0\text{эл}} I_{\text{в}} L_{12} = I_{1d} X_{1d} - E_m \\ M &= p_{\text{д}} (L_{1d} I_{1d} I_{1q} - L_{1q} I_{1q} I_{1d} - L_{12} I_{\text{в}} I_{1q}) \end{aligned} \right\}$$

где  $I_{1q}$  и  $I_{1d}$  - действующие значения токов статора. Выражая их из первых уравнений и подставляя в третье:

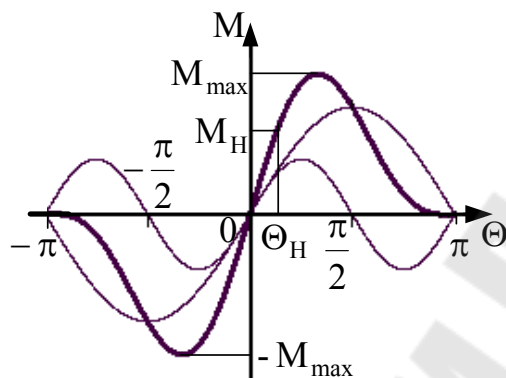
$$M = p_{\text{д}} \left[ \frac{E_m U_{1m}}{\omega_0 X_{1d}} \sin \theta_{\text{эл}} + \frac{U_{1m}^2}{2\omega_{0\text{эл}}} \left( \frac{1}{X_{1q}} - \frac{1}{X_{1d}} \right) \sin 2\theta_{\text{эл}} \right].$$

Переходя к переменным трехфазного СД:

$$M = \frac{3EU_1}{\omega_0 X_{1d}} \sin \theta_{\text{эл}} + \frac{3U_1^2}{2\omega_0} \left( \frac{1}{X_{1q}} - \frac{1}{X_{1d}} \right) \sin 2\theta_{\text{эл}}, \quad (3.24)$$

где  $X_{1d}, X_{1q}$  - индуктивные сопротивления статора по продольной и поперечной осям.

(3.24) представляет собой зависимость  $M(\theta_{эл})$  и называется угловой характеристикой. Электромагнитный момент состоит из 2-х составляющих: первая - определяется взаимодействием вращающегося поля статора с полем ротора, вторая – представляет реактивный момент, обусловленный явнополюсным исполнением ротора. Примерный вид угловой характеристики:

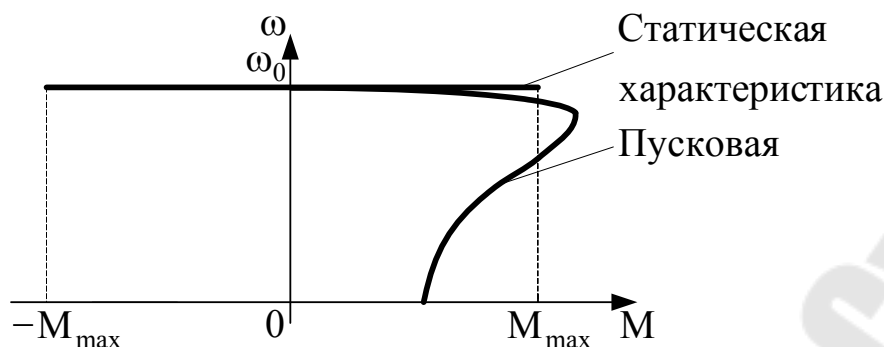


В номинальном режиме  $\theta_{элН} = 20 \div 30^\circ$ , а перегрузочная способность  $\lambda = M_{max}/M_H = 2 \div 3$  и она в меньшей степени зависит от напряжения, чем у АД.

Для неявнополюсного СД:  $X_{ld} = X_{lq}$  и

$$M = \frac{3EU_1}{\omega_0 X_1} \cdot \sin\theta_{эл}.$$

При работе СД в статическом режиме на устойчивом участке угловой характеристики среднее значение скорости  $\omega_{cp} = \omega_0$  и механическая характеристика в пределах  $-M_{max} < M < M_{max}$  абсолютно жесткая. Для пуска ЭД используется обмотка типа “беличья клетка”. В результате при скорости отличной от синхронной СД обладает характеристикой подобной АД. Механические характеристики:



### 3.18. Динамические свойства синхронного двигателя

Между постоянным магнитом, которым является возбужденный ротор, и вращающимся полем статора возникают силы электромагнитного взаимодействия. При малом значении угла  $\theta_{эл}$  и его увеличении, силы возрастают по закону, близкому к линейному. Они подобны упругой связи. Рабочий участок угловой характеристики с достаточной для практики точностью можно заменить линейной зависимостью:

$$M = c_{ЭМ} \cdot \theta_{эл},$$

где  $c_{ЭМ} = M_H / \theta_H$  - коэффициент жесткости упругой электромагнитной связи.

Дифференцируя, получаем приближенное уравнение динамической характеристики:

$$\frac{dM}{dt} = c_{ЭМ} \cdot (\omega_0 - \omega).$$

Наличие пусковой или аналогичной по конструкции демпферной обмотки (при отсутствии первой) приводит к проявлению в динамических режимах асинхронной составляющей момента. Пренебрегая влиянием на эту составляющую электромагнитной инерционности, результирующий момент СД в динамических режимах можно представить:

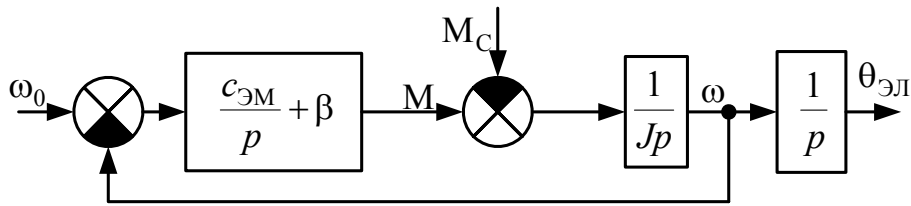
$$M = c_{ЭМ} \theta + \beta(\omega_0 - \omega),$$

или в операторной форме:

$$M = \left( \frac{c_{ЭМ}}{p} + \beta \right) \cdot (\omega_0 - \omega), \quad (3.25)$$

где  $\beta$  - модуль жесткости асинхронной характеристики СД.

В соответствии с (3.25) структурная схема:



СД можно управлять по каналам частоты  $f_1$ , напряжения  $U_1$  и возбуждения  $i_B$ . В статическом режиме изменение  $f_1$  позволяет регулировать скорость, а  $I_B$  - перегрузочную способность.

## 4. Энергетика электропривода

### 4.1. Потери энергии в статических режимах

При работе в ЭД происходят потери энергии, которые вызывают нагрев его частей. Полные потери мощности разделяют на постоянные  $\Delta p_c$  и переменные  $\Delta p_v$ :

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_c + \Delta p_v.$$

К постоянным относят потери в стали  $\Delta p_{ст}$  и механические  $\Delta p_{мех}$ :

$$\Delta p_c = \Delta p_{ст} + \Delta p_{мех}.$$

В ДПТ НВ и СД к ним добавляют и потери в ОВ:

$$\Delta p_c = \Delta p_{ст} + \Delta p_{мех} + I_B^2 R_B.$$

Переменные потери определяются током, зависящем от нагрузки, а они рассчитываются:

$$\Delta p_v = \begin{cases} I^2_{Я} R_{Яд} - \text{ДПТ} \\ 3I^2_1 R_1 - \text{СД} \\ 3I^2_1 R_1 + 3I'^2_2 R'_2 - \text{АД} \end{cases}$$

При работе АД на участке  $|s| < s_k$  можно считать  $\varphi_2 = 0$ , а  $I_{\mu} = \text{const}$ . Учитывая что  $I^2_1 = I^2_m + I'^2_2$ , то потери от тока намагничивания, относят к постоянным. Таким образом, для АД:

$$\Delta p_c = \Delta p_{ст} + \Delta p_{мех} + I^2_{\mu} R_1, \Delta p_v = 3I'^2_2 (1 + \frac{R_1}{R'_2}) R'_{2\Sigma}. \quad (4.1)$$

Когда ЭД работают в номинальных режимах и на естественной характеристике переменные потери  $\Delta p_{vH}$  можно определить по паспортным и каталожным данным. Если обозначить отношения токов:

$$\beta = \begin{cases} I_{Я}/I_H - \text{ДПТ} \\ I_1/I_{1H} - \text{СД} \\ I'_2/I'_{2H} - \text{АД} \end{cases},$$

то кратность переменных потерь в текущем режиме по отношению к номинальным:  $\Delta p_v = \beta^2 \Delta p_{vH}$ . Представляя отношение постоянных потерь

к переменным в номинальном режиме через  $\alpha = \frac{\Delta p_c}{\Delta p_{vH}}$ , получим

выражение для полных потерь:

$$\Delta p_{\Sigma} = (\alpha + \beta^2) \cdot \Delta p_{vH}, \quad (4.2)$$

причем  $\alpha = 0.5 \div 2$ .

Для АД и ДПТ НВ переменные потери можно представить через электромагнитный момент и скольжение  $s$  или статизм характеристики  $s_x$ . Так, для ДПТ потребляемая мощность  $P_1 = U \cdot I_{Я} = \omega_0 \cdot M$ , а электромагнитная  $P_{ЭМ} = \omega M$ , то теперь

$$\Delta p_v = P_1 - P_{ЭМ} = M \cdot (\omega_0 - \omega) = \omega_0 M s_x = P_1 s_x. \quad (4.3)$$

Для АД в соответствии со схемой замещения и (4.1)

$$\Delta p_v = \omega_0 M s (1 + R_1/R'_2). \quad (4.4)$$

При выборе регулируемого варианта ЭП так же анализируют потери, потому что на экономичность системы оказывают влияние не только капитальные затраты и эксплуатационные расходы, но и стоимость потребляемой энергии. Поэтому представляя с энергетической точки зрения регулирование ЭД (ЭП) как изменение мощности механической энергии можно выделить несколько подходов:

А. Производить отбор электрической энергии у ЭД, которую затем расходовать на тепло либо отдавать на вал или в сеть. Первый вариант представляет реостатное регулирование и принцип наложения характеристик. При втором варианте применяют т.н. каскадные схемы включения АД, в которых энергию скольжения из фазного ротора

возвращают в сеть или преобразовывают в механическую и отдают на вал. Второй вариант более экономичен.

**Б.** К ЭД подводится электрическая энергия с мощностью, которая требуется для ИМ и для покрытия потерь в самом двигателе. Данный подход реализуется в системах УП-Д.

При расчетах потерь мощности в регулируемых ЭП следует учитывать механическую характеристику нагрузки  $M_C(\omega)$ .

## 4.2. Потери энергии в переходных процессах

Потребляемая электрическая энергия из сети в течении переходного процесса расходуется на накопление электромагнитной и кинетической энергий в самой системе ЭП на работу, совершаемую при преодолении статического момента, и на потери.

Суммарные потери энергии за время переходного процесса  $t_{\text{пп}}$  определяются интегральным выражением:

$$\Delta A_{\text{пп}} = \int_0^{t_{\text{пп}}} [\Delta p_c(t) + \Delta p_v(t)] dt = \Delta A_{\text{ппс}} + \Delta A_{\text{ппв}}.$$

В нерегулируемых ЭП в переходных процессах токи превышают номинальные значения, поэтому обычно доля постоянных потерь мощности незначительна. Для цепей якоря ДПТ НВ и ротора АД на основании (4.3):

$$\Delta A_{\text{пп}} = \int_0^{t_{\text{пп}}} \omega_0 M_s dt = \int_0^{t_{\text{пп}}} (\omega_0 - \omega) M dt. \quad (4.5)$$

Рассмотрим прямой пуск, который представляет включение на напряжении сети, т.е. ступенчатое изменение  $\omega_0$ . При  $M_c=0$  используем

уравнение движения  $M = J \frac{d\omega}{dt}$  в подынтегральном выражении (4.5):

$$\Delta A_{\text{пп}} = \int_0^{t_{\text{пп}}} J \left( \omega_0 \frac{d\omega}{dt} - \omega \frac{d\omega}{dt} \right) dt = \int_{\omega_{\text{нач}}}^{\omega_{\text{кон}}} J \omega_0 d\omega - \int_{\omega_{\text{нач}}}^{\omega_{\text{кон}}} J \omega d\omega.$$

Таким образом, потери энергии не зависят от длительности процесса, а определяются разностью количеств движения при скоростях  $\omega_0$  и текущей  $\omega$ . После интегрирования получим:

$$\Delta A_{\text{пп}} = J\omega_0(\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}}) - J \frac{\omega_{\text{кон}}^2 - \omega_{\text{нач}}^2}{2} = \frac{J\omega_0^2}{2} (s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2). \quad (4.6)$$

В итоге при прямом пуске (для ДПТ с пусковым сопротивлением) когда,  $s_{\text{нач}} = 1$  и  $s_{\text{кон}} = 0$  и потери энергии:

$$\Delta A_{\text{пуск}} = \frac{J\omega_0^2}{2}.$$

Они равны накапливаемой кинетической энергии и не зависят от наличия сопротивлений в цепях ЭД.

При реверсе  $s_{\text{нач}} = 2$  и  $\Delta A_{\text{рев}} = 4 \frac{J\omega_0^2}{2}$ , причем на торможение приходится:  $\Delta A_{\text{T}} = 3 \frac{J\omega_0^2}{2}$ .

При наличии нагрузки уравнение движения  $M = M_{\text{C}} + J \cdot \frac{d\omega}{dt}$  и на основании (4.5) потери энергии (4.6):

$$\Delta A_{\text{пп}} = \frac{J\omega_0^2}{2} (s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2) + \int_0^{t_{\text{пп}}} M_{\text{C}} (\omega_0 - \omega) dt = \Delta A_{\text{ппх}} + \Delta A_{\text{ппм}}. \quad (4.7)$$

Второе слагаемое в (4.7) зависит от механической характеристики нагрузки.

Если для АД необходимо учесть потери в обмотке статора, то:

$$\Delta A_{\text{пп}} = (\Delta A_{\text{ппх}} + \Delta A_{\text{ппм}}) \cdot (1 + R_1/R'_{2\Sigma})$$

и только в ЭД:

$$\Delta A_{\text{пп}} = (\Delta A_{\text{ппх}} + \Delta A_{\text{ппм}}) \cdot (1 + R_1/R'_{2\Sigma} - R_{\text{доб}}/R'_{2\Sigma}).$$

В системе УП-Д при пуске или регулировании скорости закон  $\omega_0(t)$  задается системой управления, причем значение  $\omega_0$  изменяется плавно, а не ступенчато. Поэтому для определения потерь энергии в (4.5) надо ввести  $\omega_0(t)$  и  $M(t)$ . Но обычно для регулируемых ЭП производят расчет переходных процессов с получением зависимостей  $\omega(t)$ ,  $i(t)$  и  $M(t)$ . И по ним непосредственно можно производить расчет. Для рассмотрения влияния зависимости  $\omega_0(t)$  возьмем частный случай многоступенчатого пуска. Представим (4.6) в виде суммы потерь энергии на каждой из  $k$ -ступеней:

$$\Delta A_{\text{пп}} = \sum_1^k \left[ J\omega_{0i}(\omega_{\text{кон}i} - \omega_{\text{нач}i}) - J \frac{\omega_{\text{кон}i}^2 - \omega_{\text{нач}i}^2}{2} \right]. \quad (4.8)$$

Представим изменение скорости на  $i$ -й ступени пуска через значение  $\omega_0$ , соответствующее окончанию процесса:  $\Delta\omega_i = (\omega_{\text{кон}i} - \omega_{\text{нач}i}) = \frac{\omega_0}{k}$ , а

$\omega_{0i} = \frac{\omega_0}{k} i$  - скорость идеального холостого хода на  $i$ -ой ступени.

Начальное значение скорости на каждой ступени  $\omega_{\text{нач}i} = \frac{\omega_0}{k} (i-1)$ ,

разность квадратов:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{кон}i}^2 - \omega_{\text{нач}i}^2 &= (\omega_{\text{кон}i} - \omega_{\text{нач}i})(\omega_{\text{кон}i} + \omega_{\text{нач}i}) = \\ &= \frac{\omega_0}{k} \left[ \frac{\omega_0}{k} + 2 \frac{\omega_0}{k} (i-1) \right] = \frac{\omega_0}{k} \cdot \left( \frac{\omega_0}{k} + 2 \frac{\omega_0}{k} i - 2 \frac{\omega_0}{k} \right) = \frac{\omega_0^2}{k^2} (2i-1) \end{aligned}$$

Теперь (4.8) примет вид

$$\Delta A_{\text{ппк}} = \sum_1^k \left[ \frac{J\omega_0^2}{k^2} i - \frac{J\omega_0^2}{2k^2} \cdot (2i-1) \right] = \frac{J\omega_0^2}{2k^2} \sum_1^k (2i-2i+1) = \frac{J\omega_0^2}{2} \cdot \frac{1}{k}.$$

Таким образом, при пуске в  $k$  ступеней изменения  $\omega_0$  потери энергии меньше в  $k$  раз, чем при одноступенчатом пуске.

### 4.3. Нагрев и охлаждение электродвигателей

Процесс преобразования энергии в ЭД происходит с ее потерей, что вызывает нагрев машины. Материалы, применяемые в электрических машинах, имеют определенную термическую стойкость. Поэтому температура частей ЭД не должна превышать допустимое значение, определяемое наименее термостойким элементом - изоляцией. В зависимости от входящих компонентов изоляция разделяется на классы по допустимой температуре  $t_{\text{доп}}$ . Однако рабочая температура  $t_{\text{раб}}$  из-за погрешностей при расчетах и измерениях принята меньшей. Основу изоляции, применяемую в ЭД, составляют слюда, асбест, стекловолокно. Остальные компоненты приведены в таблице:

| Класс изоляции | Связующие материалы | $t_{\text{доп}}$ , °С | $t_{\text{раб}}$ , °С |
|----------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| В              | органические        | 130°                  | 120°                  |
| F              | синтетические       | 155°                  | 140°                  |
| Н              | кремнийорганические | 180°                  | 165°(серия"Д"-160°)   |



Нагрев ЭД определяется также и температурой окружающей среды, для которой за стандартное значение принята  $t_0 = 40^{\circ}\text{C}$ . И при анализе тепловых процессов оперируют понятием “превышение температуры” -  $\tau = t - t_0$ . Допустимое значение превышения температуры для изоляции определяется  $\tau_{\text{доп}} = t_{\text{раб}} - 40^{\circ}$ .

Тепловые процессы по-разному протекают в различных частях ЭД. Подробный анализ процессов проводится во время опытно-конструкторских работ. В инженерной практике достаточно оценить режим работы ЭД с целью проверки на превышение допустимого значения температуры. Поэтому используется упрощенный анализ на основе следующих допущений:

1. ЭД представляется однородным твердым телом с бесконечно большой теплопроводностью.

2. Теплоотдача в окружающую среду пропорциональна разности  $t - t_0$  в первой степени при  $t_0 = \text{const}$ .

Исходя из допущений уравнение теплового баланса:

$$Cd\tau + A \cdot \tau \cdot dt = \Delta p dt,$$

где:  $C$  - теплоемкость, т.е. количество тепла, необходимая для нагрева ЭД на  $1^{\circ}\text{C}$ ,  $\frac{\text{Дж}}{^{\circ}\text{C}}$ ;  $A$  - теплоотдача - количество тепла выделяемого в окружающую среду за единицу времени при разности температур в  $1^{\circ}\text{C}$ ,  $\frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot ^{\circ}\text{C}}$ ,  $\Delta p$  - потери мощности в ЭД.

Разделив переменные, получим уравнение нагрева:

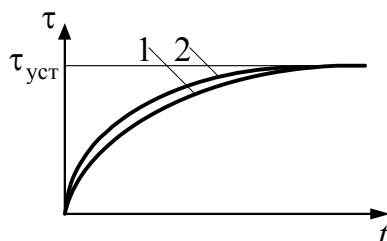
$$\frac{C}{A} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \tau = \frac{\Delta p}{A} \quad \text{или} \quad T_n \cdot \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_{\text{уст}}, \quad (4.9)$$

где:  $T_n = \frac{C}{A}$  - постоянная времени нагрева ЭД, которая в зависимости от типоразмера ЭД может иметь значение от десятка минут до нескольких часов;  $\tau_{\text{уст}} = \frac{\Delta p}{A}$  - установившееся значение превышения температуры.

Решение (4.9) даёт экспоненциальный закон изменения температуры во времени:

$$\tau = \tau_{уст} - (\tau_y - \tau_{нач}) \cdot e^{-\frac{t}{T_H}}. \quad (4.10)$$

Графически, при пуске с холодного состояния, решение (4.10) представляется кривой 1:



Обмотки нагреваются более интенсивно в начале пуска - кривая 2. Экспоненциальный характер изменения температуры сохраняется при охлаждении и при колебаниях нагрузки (колебаниях потерь мощности).

При анализе тепловых процессов необходимо учитывать, что с изменением скорости изменяется теплоотдача. Это учитывается коэффициентом ухудшения условий охлаждения:

$$\beta_i = \frac{A_i}{A}, \quad (4.11)$$

где:  $A$  - теплоотдача при номинальной скорости  $\omega_H$ , а  $A_i$  - при текущей  $\omega_i$ .

При неподвижном роторе коэффициент  $\beta_0$  принимает значения:

- $\beta_0 = 1$  - для ЭД закрытого исполнения с независимой вентиляцией;
- $\beta_0 = 0.95 \div 0.98$  - закрытого исполнения без принудительного охлаждения;
- $\beta_0 = 0.45 \div 0.55$  - закрытого исполнения с самовентиляцией;
- $\beta_0 = 0.25 \div 0.35$  - защищенного с самовентиляцией.

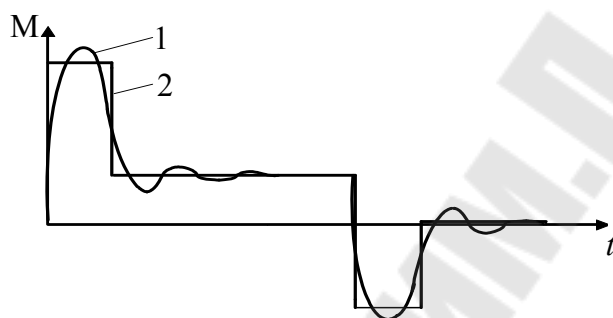
Для последних 3-х исполнений из-за уменьшения теплоотдачи при остановке  $T_{охл} > T_H$ .

На практике наиболее часто сталкиваются с изменением теплоотдачи при пуске и торможении. Принимая, что скорость изменяется линейно:  $\beta_H = \beta_T = (1 + \beta_0) / 2$ .

#### 4.4. Нагрузочные диаграммы

В соответствии с уравнением движения  $M(t) = M_C(t) + J \frac{d\omega}{dt}$  или  $M(t) = M_C(t) + M_D(t)$ . И нагрузочной диаграммой называют временную зависимость  $M(t)$ . В статических режимах она совпадает с зависимостью  $M_C(t)$ , которая представляет собой нагрузочную диаграмму ИМ или

диаграмму нагрузки. В динамических режимах они отличаются на зависимость динамического момента  $M_D(t)$ . При необходимости нагрузочные диаграммы представляются зависимостями  $P(t), i(t), \Delta p(t)$ . Поскольку тепловые процессы обладают значительной инерционностью, то нагрузочные диаграммы переходных процессов усредняют с учетом равенства недостающих и добавляемых площадей. Так, к примеру, если цикл работы состоит из участков пуска, установившегося движения, торможения и остановки с действительной диаграммой по кривой - 1, то для анализа тепловых процессов используют усредненную (ступенчатую) – 2:



#### 4.5. Общий порядок выбора электродвигателей

1. На основании технико-экономического анализа нескольких вариантов систем электроприводов выбирают одну, наиболее полно обеспечивающую технические требования с учетом наилучших экономических показателей, т.е. проводится выбор ЭД по роду тока на основании электромеханических (пускорегулировочных) свойств.

2. По параметрам технологического процесса строят диаграмму нагрузки.

3. По средней мощности или по среднему моменту, которые определяются по диаграмме нагрузки, предварительно выбирают типоразмер ЭД с учетом обеспечения рабочих скоростей.

4. Для предварительно выбранного ЭД строят упрощенную нагрузочную диаграмму, допуская, что в переходных процессах скорость изменяется линейно, а момент или ток неизменны и  $\varepsilon = const$ .

5. По упрощенной диаграмме проводят проверку ЭД по нагреву и перегрузочной способности.

6. Если он не проходит проверку или запас оказывается значительным (в зависимости от номенклатуры серии ЭД отличие на 20%-30% от  $P_H$  или  $M_H$  и более), то выбирают больший или меньший ближайший типоразмер и п.п. 4 и 5 повторяют.

7. Если ЭД проходит проверку, то производят синтез и анализ ЭП.

8. При анализе рассчитываются переходные процессы. Используя результаты расчетов, строят уточненную нагрузочную диаграмму с учетом реальных изменений переменных.

9. По диаграмме проводят окончательно проверку по нагреву и др. показателям. Если ЭД не проходит проверку, то выбирают следующий двигатель и возвращаются к п. 4.

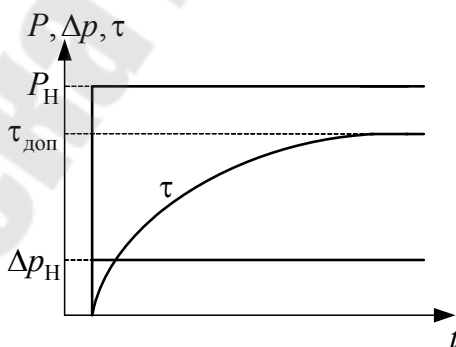
Такой подход к выбору ЭД называется методом последовательных приближений. На практике иногда пользуются более простыми, но менее точными т.н. инженерными методами. Они основаны на различного рода удельных показателях.

#### 4.6. Номинальные режимы электродвигателей

В рабочих машинах режимы ЭД различны по изменению нагрузки, скорости, длительности и по другим факторам. С учетом всего разнообразия для серийных ЭД разработано 8 номинальных режимов. В справочниках и каталогах приводятся данные двигателей с указанием нормированных значений параметров режима. Поэтому, при выборе конкретного типоразмера переменные, определяемые по нагрузочным диаграммам реального режима, приводят к нормированным параметрам одного из номинальных.

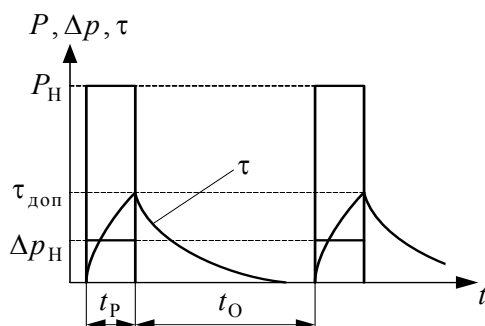
К основным номинальным режимам относятся:

**S1. Продолжительный номинальный режим работы.** Это режим при неизменной номинальной нагрузке такой длительности, что превышение температуры всех частей электрической машины достигают установившихся значений. Диаграммы изменения переменных для режима S1:

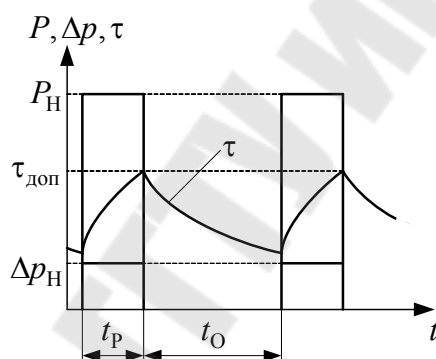


**S2. Кратковременный номинальный режим работы.** В данном режиме периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения. При этом периоды нагрузки не настолько длительны, чтобы превышения температуры частей электрической машины могли достигнуть установившихся значений, а периоды отключения настолько длительны, что все части машины охлаждаются до

температуры окружающей среды. Нормированные значения времени работы  $t_p = 15, 30, 60, 90$  мин. Диаграммы:



**S3. Повторно-кратковременный номинальный режим.** Режим, при котором периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения. Причем, как рабочие периоды, так и периоды отключения не настолько длительны, что превышения температур частей электрической машины могли достигнуть установившихся значений. Диаграммы:



Режим характеризуется коэффициентом продолжительности включения:

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\% = \frac{t_p}{t_{ц}} \cdot 100\%,$$

и длительностью цикла  $t_{ц} \leq 10$  мин. Нормированные значения  $ПВ_{н} = 15, 25, 40$  и  $60\%$ . Если для реального режима  $t_{ц} > 10$  мин, то его надо приводить к какому-либо продолжительному. Когда  $ПВ < 15\%$ , то его часто приводят к S2.

Режимы S1-S3 являются основными и чаще всего реальные приводят к ним. Остальные S4-S8 являются вспомогательными и служат для расширения номенклатуры:

S4. Повторно-кратковременный номинальный режим с частыми пусками.

S5 Повторно-кратковременный номинальный режим с частыми пусками и электрическим торможением.

S6 Перемежающийся номинальный режим (в отличие от S3 вместо периодов отключения присутствуют периоды холостого хода и он характеризуется коэффициентом продолжительности нагрузки – ПН).

S7 Перемежающийся номинальный режим с частыми реверсами.

S8 Перемежающийся номинальный режим с двумя и более скоростями.

#### 4.7. Методы выбора электродвигателей по мощности

В соответствии с уравнением теплового баланса потери мощности однозначно определяют превышение температуры ЭД. Для основной массы режимов электроприводов рабочих машин среднее значение температуры двигателя незначительно отличается от максимального значения, т.к. обычно длительность участков с различной нагрузкой  $t_p < T_n$ . Поэтому при выборе и проверке ЭД достаточно определить среднее значение  $\tau_{cp}$ , которое не должно превысить допустимое  $\tau_{доп}$ . Используя линейную модель нагрева:

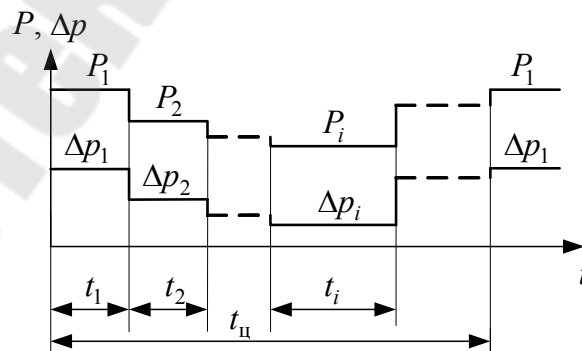
$$\tau_{cp} = \frac{\Delta p_{cp}}{A} \leq \tau_{доп} = \frac{\Delta p_H}{A},$$

где  $\Delta p_{cp}$  - средние потери в реальном режиме, а  $\Delta p_H$  - потери в номинальном режиме для выбранного ЭД.

Таким образом, для правильного выбора необходимо выполнение условия:

$$\Delta p_{cp} \leq \Delta p_H.$$

Имея нагрузочную диаграмму в виде зависимости  $P(t)$



можно рассчитать потери мощности на каждом участке  $\Delta p_i$  для предварительно выбранного ЭД и определить:

$$\Delta p_{\text{ср}} = \frac{\sum_i \Delta p_i \cdot t_i}{t_{\text{ц}}} \quad (4.12)$$

Для правильного выбора:

$$\Delta p_{\text{ср}} \leq \Delta p_{\text{н}} = P_{\text{н}} \cdot \left( \frac{1}{\eta_{\text{н}}} - 1 \right) \quad (4.13)$$

Данный метод называют методом средних потерь. Порядок его применения:

1. По нагрузочной диаграмме исполнительного механизма определяется средняя мощность или средний момент:

$$P_{\text{ср}} = \frac{\sum_i P_{\text{Ci}} \cdot t_i}{t_{\text{ц}}} \quad \text{или} \quad M_{\text{ср}} = \frac{\sum_i M_{\text{Ci}} \cdot t_i}{t_{\text{ц}}},$$

где  $P_{\text{Ci}}$ ,  $M_{\text{Ci}}$  - статическая нагрузка на  $i$ -м участке диаграммы.

2. Предварительно выбирают ЭД из условия

$$P_{\text{н}} \geq k_{\text{зд}} \cdot P_{\text{ср}}, \quad \text{или} \quad \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} \geq k_{\text{зд}} \cdot M_{\text{ср}},$$

где  $k_{\text{зд}} = 1.1 \dots 1.3$  коэффициент запаса, учитывающий динамические потери.

3. Строится упрощенная диаграмма ЭД  $P(t)$  или  $M(t)$  принимая, что в переходных процессах скорость меняется линейно, а динамический момент на этих участках:  $M_{\text{Ди}} = \text{const}$ , или  $P_{\text{Ди}} = P_{\text{Ci}} + M_{\text{Ди}} \cdot \frac{\omega_{\text{нач}} + \omega_{\text{кон}}}{2}$ .

4. По зависимости  $\eta(P_2)$  или другим методом находят потери мощности на каждом участке  $\Delta p_i$ . Зависимость  $\eta(P_2)$  в каталогах иногда приводится в виде значений КПД при различной загрузке ЭД.

5. По (4.12) определяют средние потери и сравнивают с номинальными. Если (4.13) выполняется с большим запасом, то ЭД недоиспользуется. При невыполнении он будет работать с перегревом. В обоих случаях выбирают другой типоразмер и расчет повторяют.

Рассмотрим другие методы.

**Метод эквивалентного тока.** Его применяют, когда постоянные потери неизменны:  $\Delta p_c = \text{const}$ , а полные потери определить трудно. Средние потери за время цикла работы можно представить:

$$\Delta p_{cp} = \Delta p_c + I_3^2 \cdot R,$$

где  $I_3$  - эквивалентный по условиям нагрева ток.

В соответствии с (4.12) запишем:

$$\Delta p_{cp} = \frac{\sum_i \Delta p_i \cdot t_i}{t_{ц}} = \frac{\sum_i (\Delta p_c + I_i^2 \cdot R)}{t_{ц}}.$$

Если постоянные потери  $\Delta p_c = const$ , то

$$\Delta p_c + I_3^2 \cdot R = \frac{\sum_i \Delta p_c t_i}{t_{ц}} + R \frac{\sum_i I_i^2 t_i}{t_{ц}}.$$

Таким образом:

$$I_3 = \sqrt{\frac{\sum_i I_i^2 \cdot t_i}{t_{ц}}}, \quad (4.14)$$

или при учете зависимости  $i(t)$  в переходных процессах:

$$I_3 = \sqrt{\frac{1}{t_{ц}} \cdot \int_0^{t_{ц}} i^2(t) dt}.$$

ЭД выбран правильно если  $I_3 \leq I_H$ .

**Метод эквивалентного момента.** При постоянном магнитном потоке ( $\Phi = const$ ) момент ЭД пропорционален потоку:  $M = cI$ . И при сохранении ограничения для предыдущего метода ограничения ( $\Delta p_c = const$ ), на основании (4.14) можно записать:

$$M_3 = \sqrt{\frac{\sum_i M_i^2 \cdot t_i}{t_{ц}}}. \quad (4.15)$$

Когда  $M_3 \leq M_H$ , то ЭД выбран правильно.

**Метод эквивалентной мощности.** Если ЭД обладает жесткой механической характеристикой и допустимо считать скорость неизменной  $\omega = const$ , то при сохранении условий для предыдущих методов мощность пропорциональна моменту, а эквивалентная за цикл определяется как:



$$P_9 = \sqrt{\frac{\sum_i P_i^2 \cdot t_i}{t_{\text{ц}}}}. \quad (4.16)$$

Для правильного выбора необходимо выполнение условия  $P_9 \leq P_H$ . У АД ток статора не пропорционален току ротора, поэтому использование данного метода требует учета изменения  $\cos \varphi$  и  $\eta$ .

#### 4.8. Учет ухудшения условий охлаждения

При работе ЭД с переменной скоростью ухудшаются условия охлаждения, уменьшается теплоотдача, а постоянная времени нагрева увеличивается. В результате увеличивается среднее значение превышения температуры  $\tau_{\text{ср}}$  за цикл. В соответствии с линейной моделью в установившемся тепловом режиме:

$$\sum_i \Delta p_i t_i = \left( \sum_i A t_i \right) \tau'_{\text{ср}},$$

где  $\tau'_{\text{ср}}$  - среднее превышение температуры за цикл с учетом ухудшения условий охлаждения. Т.о. количество тепла выделяемого в ЭД равно количеству тепла, отдаваемому в окружающую среду.

В соответствии с определением:  $A_i = \beta_i \cdot A$ , можно представить что:

$$\tau'_{\text{ср}} = \frac{\sum_i \Delta p_i \cdot t_i}{\sum_i \beta_i \cdot t_i}.$$

И для правильного выбора необходимо  $\tau'_{\text{ср}} \leq \tau_{\text{доп}}$ .

Теперь, учитывая ухудшение условий охлаждения, длительность цикла рассчитывается:

$$t_{\text{ц}} = \sum \beta_i \cdot t_i, \quad (4.17)$$

где в общем случае

$$\beta_i = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \frac{\omega_i}{\omega_H}. \quad (4.18)$$

При пуске до скорости  $\omega_i$  и торможении с нее  $\beta_{\text{ли}} = \beta_{\text{ти}} = (\beta_i + \beta_0) / 2$ .

Таким образом, если в цикле работы имеются участки со скоростью отличной от номинальной, то для (4.14)-(4.16) знаменатель определяется по (4.17).

#### 4.9. Выбор электродвигателя для продолжительного режима

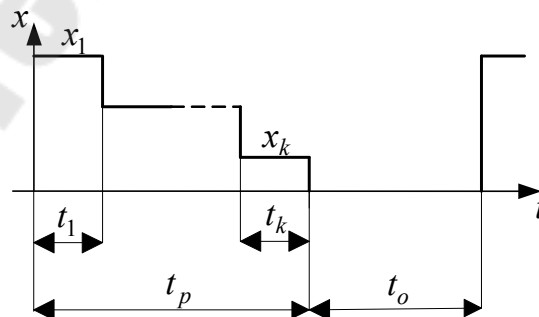
К продолжительным относят режимы, для которых время работы  $t_p > 3T_n$  и при меньших значениях  $t_p$ , но с  $t_{ц} > 10$  мин, или с ПВ > 60%. На практике может возникнуть и такая ситуация, когда имеются номинальные данные ЭД только для режима S1. Во всех указанных случаях реальные режимы приводятся к продолжительному.

Если в процессе работы нагрузка ЭД не изменяется (компрессоры, насосы, вентиляторы без регулирования производительности) то мощность ЭД определяется мощностью, требуемой исполнительному механизму:  $P_H \geq P_C$ , или  $M_H \geq M_C$  при рабочей скорости отличной от номинального значения.

При переменной нагрузке ЭД обязательно **проверяется по перегрузочной способности**. А по нагреву выбирается и проверяется рассмотренными методами с учетом накладываемых на них ограничений. При выборе типоразмера определяются и с конструктивным исполнением. Поэтому проверку проводят с учетом ухудшения условий охлаждения по (4.17).

#### 4.10. Выбор электродвигателя для кратковременного режима

Когда нагрузка переменная, то **обязательна проверка ЭД по перегрузочной способности**. При непрямоугольной нагрузочной диаграмме её разбивают на участки с усреднением переменной. Затем многоучастковую диаграмму приводят к одноучастковой, определяя **эквивалентную величину за время работы** (если рассматривается диаграмма уже для выбранного ЭД, то при приведении обязательно учитывается ухудшение охлаждения). Например, получена диаграмма  $x(t)$  в виде:



$x$  - переменная, используемая в диаграмме ( $i, M, P$ ),  $k$  - число рабочих участков.

Тогда эквивалентная величина для данного режима за время работы:

$$X_{\text{э.р}} = \sqrt{\frac{\sum_1^k x^2_i \cdot t_i}{\sum_1^k \beta_i \cdot t_i}}$$

Знаменатель представляет время работы с учетом ухудшения условий охлаждения:  $t'_p = \sum_1^k \beta_i \cdot t_i$ .

Когда для реального режима выбирается ЭД с номинальным режимом S1, то его можно перегрузить, но за время работы его температура не должна превысить допустимое значение. В соответствии с решением уравнения теплового баланса

$$\tau_{\text{доп}} \geq \tau_{\text{уст}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t'_p}{T_H}}\right),$$

и так как  $\tau_{\text{доп}} = \frac{\Delta p_H}{A}$  а  $\tau_{\text{уст}} = \frac{\Delta p_{\text{э.р}}}{A}$ , то ЭД выбирают и проверяют по условию:

$$\Delta p_{\text{э.р}} \leq \frac{\Delta p_H}{\left(1 - e^{-\frac{t'_p}{T_H}}\right)},$$

где  $\Delta p_{\text{э.р}}$  - средние потери мощности, рассчитанные за время работы для реальной нагрузки вала ЭД.

Если для ЭД с режимом S2 время работы  $t_p \ll T_H$  и нормированное значение  $t_{pH} \ll T_H$ , то в первом приближении можно считать, что температура изменяется линейно и не превысит допустимое значение при

$$\Delta p_{\text{э.р}} \frac{t'_p}{T_H} \leq \Delta p_H \cdot \frac{t_{pH}}{T_H} \text{ или } \Delta p_{\text{э.р}} \leq \Delta p_H \cdot \frac{t_{pH}}{t_p}.$$

Для методов эквивалентных величин

$$X_{\text{э.р}} \leq X_{\text{н}} \cdot \sqrt{\frac{t_{\text{рн}}}{t'_{\text{р}}}}$$

Когда время работы соизмеримо с постоянной времени нагрева, то пренебрегать экспоненциальной зависимостью нельзя и условия правильного выбора запишутся:

$$\Delta p_{\text{э.р}} \leq \frac{\Delta p_{\text{н}} \cdot (1 - e^{-\frac{t_{\text{рн}}}{T_{\text{н}}}})}{(1 - e^{-\frac{t'_{\text{р}}}{T_{\text{н}}}})}, \quad X_{\text{э.р}} \leq X_{\text{н}} \cdot \sqrt{\frac{(1 - e^{-\frac{t_{\text{рн}}}{T_{\text{н}}}})}{(1 - e^{-\frac{t'_{\text{р}}}{T_{\text{н}}}})}}$$

#### **4.11. Выбор электродвигателя для повторно-кратковременного режима**

Выбор и проверка ЭД с номинальным режимом S1 проводится, как и для продолжительного режима с переменной нагрузкой.

Для ЭД с номинальным режимом S3, как и в кратковременном режиме, диаграмма приводится к одночастковой. Средние потери и эквивалентная величина не должны вызывать недопустимый нагрев. Принимая, что при  $t_{\text{н}} < 10$  мин время работы много меньше постоянной времени нагрева, условие правильного выбора может быть записано:

$$\Delta p_{\text{э.р}} \leq \frac{\Delta p_{\text{н}} \cdot \text{ПВ}_{\text{н}}}{\text{ПВ}}, \quad \text{или} \quad X_{\text{э.р}} \leq X_{\text{н}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{н}}}{\text{ПВ}}},$$

где  $\text{ПВ}_{\text{н}}$  - нормированное значение продолжительности включения,

$\text{ПВ} = \frac{t_{\text{р}}}{t'_{\text{р}} + t_0} 100\%$  - действительное значение для рассматриваемого режима.

## **5. Разомкнутая электромеханическая система**

### **5.1. Уравнения и структурные схемы**

Электромеханическая система (ЭМС), включающая электромеханический преобразователь и механическую часть, применяется в виде разомкнутого ЭП или объекта регулирования в АЭП.

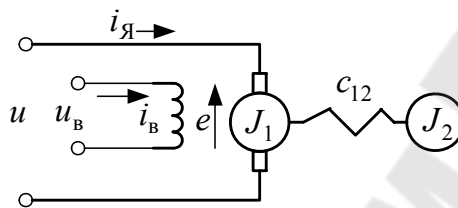
Математическое описание ЭМС включает уравнение движения ЭП и уравнение механической характеристики электромеханического преобразователя. Если в качестве базовой принять двухмассовую механическую часть, то уравнение движения:

$$\left. \begin{aligned} M - M_{12} - M_{C1} &= J_1 p \omega_1 \\ M_{12} - M_{C2} &= J_2 p \omega_2 \\ p M_{12} &= c_{12} (\omega_1 - \omega_2) \end{aligned} \right\}$$

где:  $M_{12} = c_{12} (\varphi_1 - \varphi_2)$  - момент упругого взаимодействия, определяемый жесткостью связи между 1-й и 2-й массами.

Рассмотрим представление системы с различными типами электродвигателей.

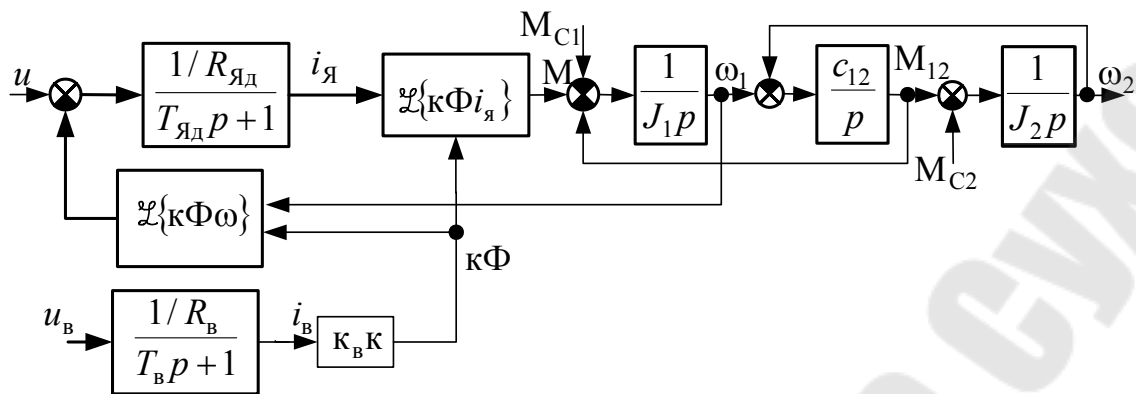
ЭМС с ДПТ НВ. Упрощенная схема:



$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \frac{k_B / R_B}{T_B p + 1} u_B \\ i_Я &= \frac{1 / R_{Яд}}{T_{Яд} p + 1} (u - e) \\ M - M_{12} - M_{C1} &= J_1 p \omega_1 \\ M_{12} - M_{C2} &= J_2 p \omega_2 \\ p M_{12} &= c_{12} (\omega_1 - \omega_2) \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

где:  $k_B = \Delta\Phi / \Delta I_B = \text{var-}$  коэффициент, определяемый по кривой намагничивания;  $e = \mathcal{L} \{k\Phi\omega\}$ ;  $M = \mathcal{L} \{k\Phi i_Я\}$ ;  $\mathcal{L} \{ \}$  - изображение по Лапласу произведения переменных.

Полная структурная схема ЭМС:



При  $\Phi = \text{var}$  система (5.1) нелинейна и при анализе динамики необходимо использовать ВТ или линеаризовать в окрестностях рабочей точки.

При  $\Phi = \text{const}$  первое уравнение исключается и (5.1) становится линейной, а произведение  $k\Phi$  выступает как постоянный коэффициент.

Для ЭМС с АД часто представляют механическую характеристику в координатной системе  $XU$ . При этом математическое описание в дифференциальной форме:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_1 &= R_1 \bar{i}_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + j\omega_{0эл} \bar{\Psi}_1 \\ 0 &= R_2' \bar{i}_2' + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + j(\omega_{0эл} - \omega_{1эл}) \bar{\Psi}_2 \\ p_d L_{12} \text{Im}(\bar{i}_1 \cdot \bar{i}_2'^*) - M_{C1} - M_{12} &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt} \\ M_{12} - M_{C2} &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt} \\ \frac{dM_{12}}{dt} &= c_{12}(\omega_1 - \omega_2) \end{aligned} \right\} (5.2)$$

где потокоцепления обмоток  $\bar{\Psi}_1 = L_1 \bar{i}_1 + L_{12} \bar{i}_2'$ ;  $\bar{\Psi}_2 = L_{12} \bar{i}_1 + L_2' \bar{i}_2'$ .

Из-за наличия произведения переменных (5.2) также нелинейна, но может использоваться для анализа динамики в “большом”. Если рассматриваются процессы на рабочем участке механической характеристики, то достаточно использовать ее линеаризованное представление:  $M(T_\Theta p + 1) = \beta(\omega_0 - \omega_1)$ .

ЭМС с СД при представлении уравнений механической характеристики в координатной системе  $dq$ , связанной с явнополюсным ротором, имеющим обмотку возбуждения, описывается следующими уравнениями

$$\left. \begin{aligned}
 u_{1d} &= R_1 i_{1d} + \frac{d\psi_{1d}}{dt} - \omega_{1эл} \psi_{1q} \\
 u_{1q} &= R_1 i_{1q} + \frac{d\psi_{1q}}{dt} + \omega_{1эл} \psi_{1d} \\
 u_{\epsilon} &= R_{\epsilon} i_{\epsilon} + \frac{d\psi_{2d}}{dt} \\
 p_d (\psi_{1d} i_{1q} - \psi_{1q} i_{1d}) + \beta(\omega_0 - \omega_1) - \\
 - M_{12} - M_{C1} &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt} \\
 M_{12} - M_{C2} &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt} \\
 \frac{dM_{12}}{dt} &= c_{12}(\omega_1 - \omega_2)
 \end{aligned} \right\}$$

Потокосцепление обмоток:  $\psi_{1d} = L_{1d} i_{1d} - L_{12d} i_{\epsilon}$ ;  $\psi_{1q} = L_{1q} i_{1q}$ ;  $\psi_{\epsilon} = L_{\epsilon} i_{\epsilon} + L_{12d} i_{1d}$ .  $\beta(\omega_0 - \omega_1)$  - асинхронная составляющая момента, обусловленная действием пусковой или демпферной обмотки.

Вычислительная техника позволяет при анализе динамики использовать и более сложные описания. Например, необходимо учесть реальные формы токов и напряжений при питании АД от вентильного преобразователя. В этом случае используют модель ЭМС в фазных координатах АВС.

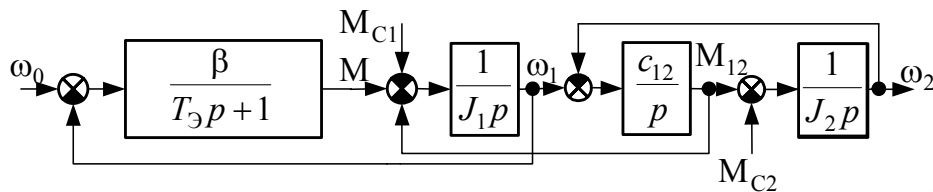
## 5.2. Обобщенная электромеханическая система с линеаризованной характеристикой

Для ДПТ НВ и АД при линеаризации механических характеристик на рабочих участках они описываются однотипным выражением  $M(T_{\Delta} p + 1) = \beta(\omega_0 - \omega_1)$ . Отличие заключается в определении  $T_{\Delta}$  и  $\beta$ .

Теперь математическое описание ЭМС с линейной или линеаризованной характеристикой

$$\left. \begin{aligned}
 M(T_{\Delta} p + 1) &= \beta(\omega_0 - \omega_1) \\
 M - M_{12} - M_{C1} &= J_1 p \omega_1 \\
 M_{12} - M_{C2} &= J_2 p \omega_2 \\
 p M_{12} &= c_{12}(\omega_1 - \omega_2)
 \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

Структурная схема ЭМС:



(5.3) наиболее полно отвечает ДПТ НВ с компенсационной обмоткой. Для АД она может использоваться только на рабочем участке механической характеристики. Для ДПТ ПВ (5.3) можно применять при анализе свойств в окрестностях рабочей точки статического равновесия и с увеличением насыщения область соответствия объекту расширяется. Для СД первое уравнение в (5.3) должно записываться с учетом суммы 2-х составляющих момента. При линейной аппроксимации угловой характеристики в виде

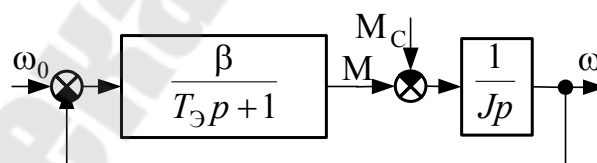
$$M = c_{ЭМ} \theta.$$

Уравнение механической характеристики:

$$M = \left( \frac{c_{ЭМ}}{p} + \beta \right) \cdot (\omega_0 - \omega_1).$$

В большинстве практических случаев влияние упругих колебаний на движение первой массы незначительно, т.е. для двигателя можно считать  $c_{12} = \infty$ , а механическую часть представить одномассовой схемой. При этом описание и структурная схема:

$$\left. \begin{aligned} M(T_{\text{э}} p + 1) &= \beta(\omega_0 - \omega) \\ M - M_C &= J p \omega \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$



(5.4) позволяет проводить анализ динамики большинства разомкнутых ЭП.

### 5.3. Динамические свойства электромеханической системы с линеаризованной характеристикой

На основании (5.4) передаточные функции для ЭМС:

- по управляющему воздействию



$$W(p) = \frac{\omega(p)}{\omega_0(p)} = \frac{1}{T_M T_\Omega p^2 + T_M p + 1}; \quad (5.5)$$

- по возмущению

$$W'(p) = \frac{\omega(p)}{M_C(p)} = -\frac{T_\Omega p + 1}{\beta} \cdot \frac{1}{T_M T_\Omega p^2 + T_M p + 1}, \quad (5.6)$$

где:  $T_M = J/\beta$  - электромеханическая постоянная времени.

Характеристическое уравнение  $T_M T_\Omega p^2 + T_M p + 1 = 0$  имеет корни

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2T_\Omega} \pm \sqrt{\frac{1}{4T_\Omega^2} - \frac{1}{T_M T_\Omega}} = \frac{1}{T_M} \left( -\frac{m}{2} \pm \sqrt{\frac{m^2}{4} - m} \right),$$

где  $m = T_M / T_\Omega$  - коэффициент соотношения постоянных времени.

Рассмотрим влияние  $m$  на динамические свойства.

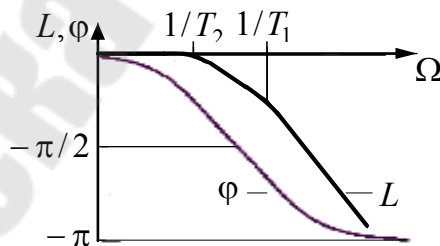
1.  $m > 4$  ( $T_M > 4T_\Omega$ ). Корни  $p_1 = -\alpha_1$ ,  $p_2 = -\alpha_2$ . (5.5) преобразовывается к виду

$$W(p) = \frac{1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)},$$

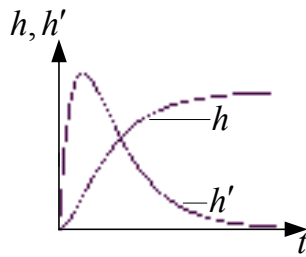
где:  $T_1 = 1/\alpha_1$ ,  $T_2 = 1/\alpha_2$ .

Таким образом, при  $T_M > 4T_\Omega$  ЭМС можно представить двумя последовательно соединенными апериодическими звеньями.

Логарифмические частотные характеристики:



Переходная характеристика  $h(t)$  для ЭМС соответствует изменению скорости при ступенчатом воздействии управления  $\omega_0(t)$ , т.е. для ДПТ это подача напряжения  $U$  на якорь, а для АД – изменение частоты тока статора  $f_1$ . Весовая характеристика  $h'(t)$  по уравнению движения при  $M_C=0$ :  $d\omega/dt = M/J$  характеризует изменение момента  $M(t)$ . Вид характеристик:



С увеличением  $U$  или  $f_1$  в скачке максимумы весовой характеристики и момента возрастают, что требует ограничения задания.

2.  $m=4$  ( $T_M = 4T_\Theta$ ). Корни характеристического уравнения:  $p_{1,2} = -\alpha = -\frac{1}{2T_\Theta}$ . При этом (5.5) запишется в виде

$$W(p) = \frac{1}{(2T_\Theta p + 1)^2},$$

и ЭМС обладает свойствами аналогичными, как и в предыдущем случае.

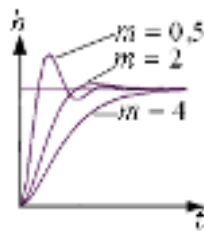
3.  $m < 4$  ( $T_M < 4T_\Theta$ ). Корни характеристического уравнения:  $p_{1,2} = -\alpha \pm j\Omega_p$ . При этом передаточную функцию (5.5) можно представить

$$W(p) = \frac{1}{T_M T_\Theta p^2 + T_M p + 1} = \frac{1}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1},$$

где  $T_1 = \sqrt{T_M T_\Theta}$ ;  $\xi = \frac{T_M}{2T_1} = \frac{\sqrt{m}}{2} < 1$  - коэффициент затухания.

С уменьшением  $m$  увеличивается колебательность и при  $m < 2$  ( $\xi < 0,71$ ) в частотной характеристике появляется резонансный пик.

Вид переходных характеристик при различных значениях  $m$ :



При сравнении передаточных функций по управляющему воздействию (5.5) и по возмущению (5.6) можно отметить, что электромагнитная инерционность ( $T_\Theta$ ) при скачке МС вызовет более значительную амплитуду колебаний скорости в области резонанса из-за форсирующего звена.

Анализируя вышеприведенное можно отметить:

1. Для разомкнутых ЭП с  $m > 4$  при анализе динамики можно не учитывать электромагнитную инерционность, т.е. принять  $T_Э = 0$ .

2. Для основной массы промышленных ЭП  $m \geq 0,5$ . В этой границе, даже если ЭМС колебательное звено, то резонансное усиление невелико ( $\xi \geq 0,4$ ), и в упрощенных расчетах колебательное звено заменяют двумя апериодическими

$$W(p) = \frac{1}{(\sqrt{T_M T_Э} p + 1)^2}.$$

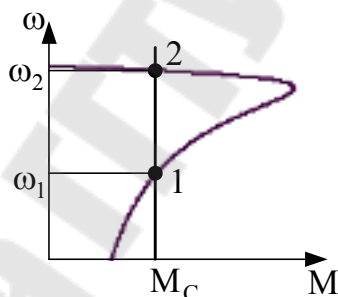
При этом погрешность в сторону уменьшения амплитуды колебаний не более 3дБ.

#### 5.4. Устойчивость статического режима

В статическом режиме уравнение движения записывается

$$M = M_C.$$

Рассмотрим возможные статические режимы ЭП с АД. В качестве нагрузки возьмем сухое трение  $M_C = const$  (станки, подъемно-транспортные машины). Характеристики:



При таком расположении характеристик условие статического режима выполняется в только в одной точке.

В точке 1 незначительное отклонение скорости от значения  $\omega_1$  приводит к росту отклонения: при уменьшении  $\omega$  возникает динамический момент  $M_D = M - M_C < 0$ , что вызывает торможение. При увеличении скорости  $M_D > 0$  приводит к ускорению.

В точке 2 отклонение скорости от значения  $\omega_2$  вызывает динамический момент, направленный на уменьшения отклонения, что и соответствует статическому режиму.

Таким образом, при  $M_C = const$  условие статической устойчивости:

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} < 0.$$

В общем случае  $M_C = f(\omega)$  и тогда условие статического режима:

$$\beta - \beta_{\text{МЕХ}} < 0.$$

Представленный анализ не учитывает электромагнитную инерционность. В целом, проверку на статическую устойчивость необходимо проводить с учетом динамической устойчивости в рабочей точке (например, по корням характеристического уравнения или частотными методами).

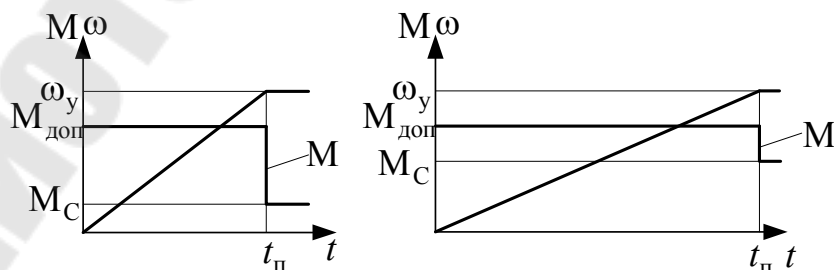
## 6. Электромеханические переходные процессы

### 6.1. Виды процессов и методы их анализа

В электромеханической системе электромагнитный момент ЭД зависит от механической координаты – скорости ротора из-за электромеханической связи (внутренней обратной связи по скорости в ЭМП). В результате, изменение какой-либо переменной в любой части ЭП приводит к изменению всех его координат. Таким образом, необходимо взаимосвязано рассматривать все процессы в ЭП.

Одной из задач ЭП является обеспечение требуемого закона движения рабочего органа в статических и динамических режимах. Переход из одного установившегося состояния в другое может происходить по разным траекториям изменения переменных, т.е. процессы могут отличаться количеством потребляемой энергии и ее потерями, длительностью и т.д. При синтезе ЭП необходимо выбрать наиболее оптимальную траекторию. С этой точки зрения в промышленных установках чаще всего используются следующие виды процессов:

1. Оптимальный по быстродействию с ограничением момента. Применяется для механизмов подачи металлорежущих станков. Временные диаграммы момента и скорости при пуске:

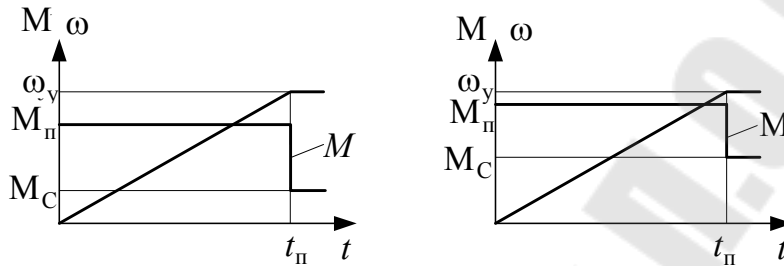


Длительность процесса определяется значениями допустимого момента ЭД  $M_{\text{доп}}$  и нагрузкой  $M_C$ .

2. Оптимальный по быстродействию с ограничением ускорения. Используется в главных приводах средних и тяжелых станков, в подъемно-транспортных машинах. Из уравнения движения:

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{\text{доп}} = \frac{M_{\text{п}} - M_{\text{с}}}{J} = \text{const}, \text{ и } M_{\text{п}} = f(M_{\text{с}}, J).$$

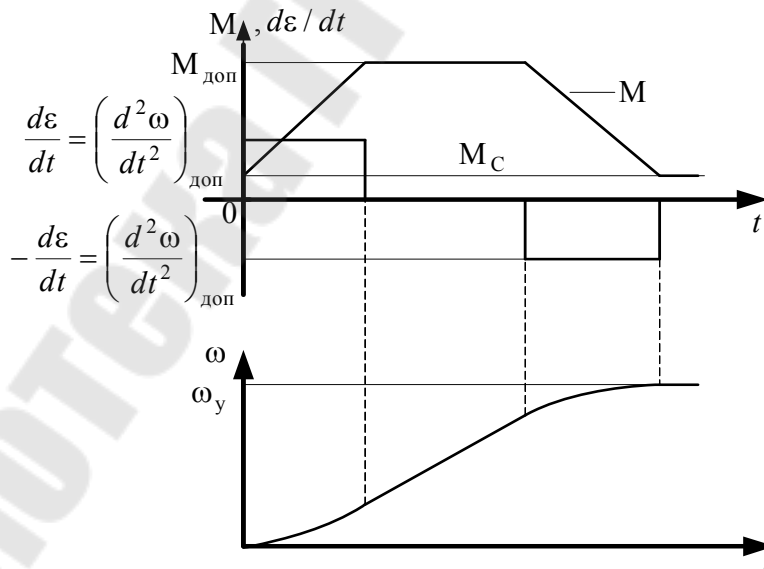
Временные диаграммы:



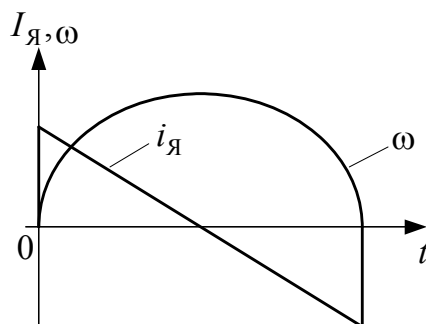
3. Оптимальный по быстродействию с ограничением момента или ускорения и рывка. Требуется такая диаграмма для скоростных лифтов, для механизмов с упругими связями с целью уменьшения динамической нагрузки. По уравнению движения:

$$\frac{d}{dt} \left( J \frac{d\omega}{dt} \right)_{\text{доп}} = \frac{d}{dt} (M_{\text{доп}} - M_{\text{с}}).$$

Диаграммы для процесса пуска при  $M_{\text{с}} = \text{const}$ :



4. Оптимальный по быстродействию и минимуму потерь энергии. Для ДПТ НВ при  $\Phi = \text{const}$  диаграммы:



Данный режим желателен для ЭП с частыми пусками и торможениями, т.е. когда производительность ограничивается потерями энергии в переходных процессах.

Электромеханические системы в общем случае являются нелинейными, что может быть вызвано нелинейностью характеристик или произведением переменных. Вычислительная техника позволяет анализировать процессы с учетом всех особенностей, но на практике иногда требуются аналитические и графоаналитические методы. Для решения нелинейных уравнений используют следующие методы:

1. Кусочно-линейной аппроксимации.
2. Фазовой плоскости.
3. Гармонической линеаризации.
4. Конечных приращений.
5. Разложение в ряд Тейлора.

Методы 2 и 4 применяются для существенно нелинейных систем: 2-й – графоаналитический, а 4-й – численный. 3-й удобен для анализа колебательных процессов. 1-й применяется, когда нелинейные характеристики можно аппроксимировать небольшим числом отрезков прямых. 5-й применяется при наличии произведения переменных и допускает анализ динамики только в малом. После линеаризации системы для аналитического решения применяют классический или операторный методы.

## **6.2. Переходные процессы при линейной механической характеристике ЭП**

Для анализа используем одномассовую схему механической части. Исходная система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} T_{\mathcal{E}} \frac{dM}{dt} + M &= \beta(\omega_0 - \omega) \\ M - M_C &= J \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

Рассмотрим процессы при ступенчатом управляющем воздействии или возмущении:

$$\omega_0(+0) = const; \quad M_C(+0) = const.$$

Из 2-ого уравнения выразим  $M$  и подставим в 1-ое:

$$\begin{aligned} M &= J \frac{d\omega}{dt} + M_C, \\ JT_{\mathcal{E}} \frac{d^2\omega}{dt^2} + J \frac{d\omega}{dt} + M_C &= \beta\omega_0 - \beta\omega. \end{aligned}$$

Разделив на  $\beta$ , получим дифференциальное уравнение для скорости:

$$T_M T_{\mathcal{E}} \frac{d^2\omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_y, \quad (6.2)$$

где  $T_M = \frac{J}{\beta}$  - электромеханическая постоянная времени;  $\omega_y = \omega_0 - \frac{M_C}{\beta}$  -

установившееся значение скорости.

Из 1-ого уравнения (6.1) выделяем  $\omega$

$$\omega = \omega_0 - \frac{T_{\mathcal{E}}}{\beta} \frac{dM}{dt} - \frac{M}{\beta}$$

и подставляем во второе. После разделения переменных получим дифференциальное уравнение для электромагнитного момента ЭД:

$$T_M T_{\mathcal{E}} \frac{d^2M}{dt^2} + \frac{dM}{dt} + M = M_C. \quad (6.3)$$

Аналитически решение для (6.2) и (6.3) ищутся в виде суммы частных решений, определяемых правой частью и свободных решений однородных уравнений, т.е. левой частью. Для определения вида свободного решения используется характеристическое уравнение системы  $T_M T_{\mathcal{E}} p^2 + T_M p + 1 = 0$ . Влияние соотношения постоянных времени на динамические свойства проанализировано в главе 5. Получим аналитические решения при разных соотношениях.

А.  $m < 4$ . Корни характеристического уравнения:

$$p_{1,2} = -\alpha \pm j\Omega_p.$$

Полное решение для (6.2) представляется в виде:

$$\omega(t) = \omega_y + (A \cos \Omega_p t + B \sin \Omega_p t) e^{-\alpha t}. \quad (6.4)$$

С целью получения второго уравнения для нахождения коэффициентов  $A$  и  $B$  продифференцируем (6.4):

$$\omega'(t) = -\alpha(A \cos \Omega_p t + B \sin \Omega_p t) e^{-\alpha t} + \Omega_p(-A \sin \Omega_p t + B \cos \Omega_p t) e^{-\alpha t}. \quad (6.4a)$$

Начальные условия:  $\omega(0) = \omega_{\text{нач}}$ ,  $M(0) = M_{\text{нач}}$ . Начальные значения производных определяются по уравнениям (6.1)

$$\frac{dM}{dt}(0) = \frac{\beta \Delta \omega_{\text{нач}} - M_{\text{нач}}}{T_\Theta}, \quad \frac{d\omega}{dt}(0) = \frac{M_{\text{нач}} - M_C}{J}, \quad \Delta \omega_{\text{нач}} = \omega_0(0) - \omega(0).$$

Теперь (6.4) и (6.4a) записываются при  $t=0$ :

$$\left. \begin{aligned} \omega_{\text{нач}} &= \omega_y + A \\ \frac{M_{\text{нач}} - M_C}{J} &= -\alpha A + \Omega_p B \end{aligned} \right\}$$

Откуда

$$A = (\omega_{\text{нач}} - \omega_y), \quad \text{а} \quad B = \frac{(M_{\text{нач}} - M_C) + \alpha J (\omega_{\text{нач}} - \omega_y)}{\Omega_p J}.$$

Теперь аналитическое решение для скорости запишется:

$$\omega(t) = \omega_y + \left[ (\omega_{\text{нач}} - \omega_y) \cos \Omega_p t + \frac{(M_{\text{нач}} - M_C) + \alpha J (\omega_{\text{нач}} - \omega_y)}{\Omega_p J} \sin \Omega_p t \right] e^{-\alpha t}. \quad (6.5)$$

Для (6.3) решение имеет вид

$$M(t) = M_C + (C \cdot \cos \Omega_p t + D \sin \Omega_p t) e^{-\alpha t},$$

а производная:

$$M'(t) = \left[ -\alpha (C \cdot \cos \Omega_p t + D \sin \Omega_p t) + \Omega_p (-C \sin \Omega_p t + D \cos \Omega_p t) \right] e^{-\alpha t}.$$

При  $t = 0$  записываем:



$$\left. \begin{aligned} M_{\text{нач}} &= M_C + C \\ \frac{\beta \Delta \omega_{\text{нач}} - M_{\text{нач}}}{T_{\text{Э}}} &= -\alpha C + \Omega_p D \end{aligned} \right\}$$

$$\text{и } C = M_{\text{нач}} - M_C, \quad D = \frac{(\beta \Delta \omega_{\text{нач}} - M_{\text{нач}}) + \alpha T_{\text{Э}} (M_{\text{нач}} - M_C)}{\Omega_p T_{\text{Э}}}.$$

Аналитическое решение для момента принимает вид:

$$M(t) = M_C + \left[ \begin{aligned} & (M_{\text{нач}} - M_C) \cos \Omega_p t + \\ & + \frac{(\beta \Delta \omega_{\text{нач}} - M_{\text{нач}}) + \alpha T_{\text{Э}} (M_{\text{нач}} - M_C)}{\Omega_p T_{\text{Э}}} \sin \Omega_p t \end{aligned} \right] e^{-\alpha t}. \quad (6.6)$$

**В.  $m > 4$ .** Корни характеристического уравнения:

$$p_1 = -\alpha_1, \quad p_2 = -\alpha_2.$$

При этом полное решение для (6.2)

$$\omega(t) = \omega_y + A_1 e^{-\alpha_1 t} + B_1 e^{-\alpha_2 t}$$

и производная

$$\omega'(t) = -\alpha_1 A_1 e^{-\alpha_1 t} - \alpha_2 B_1 e^{-\alpha_2 t}.$$

Аналогично, как в предыдущем случае, и при тех же начальных условиях получаем коэффициенты:

$$A_1 = (\omega_{\text{нач}} - \omega_y) - \frac{(M_{\text{нач}} - M_C) + \alpha_1 J(\omega_{\text{нач}} - \omega_y)}{J(\alpha_1 - \alpha_2)},$$

$$B_1 = \frac{(M_{\text{нач}} - M_C) + \alpha_1 J(\omega_{\text{нач}} - \omega_y)}{J(\alpha_1 - \alpha_2)}.$$

И окончательно:

$$\omega(t) = \omega_y + (\omega_{\text{нач}} - \omega_y) e^{-\alpha_1 t} - \left[ \frac{(M_{\text{нач}} - M_C) + \alpha_1 J(\omega_{\text{нач}} - \omega_y)}{J(\alpha_1 - \alpha_2)} \right] (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}). \quad (6.7)$$

Представляя полное решение (6.3) в виде:

$$M(t) = M_C + C_1 e^{-\alpha_1 t} + D_1 e^{-\alpha_2 t},$$

И как в предыдущих случаях, определяя коэффициенты  $C_1$  и  $D_1$ , окончательно получаем:

$$M(t) = M_C + (M_{\text{нач}} - M_C) e^{-\alpha_1 t} - \left[ \frac{(\beta \Delta \omega_{\text{нач}} - M_{\text{нач}}) + \alpha_1 T_{\Theta} (M_{\text{нач}} - M_C)}{T_{\Theta} (\alpha_1 - \alpha_2)} \right] (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}). \quad (6.8)$$

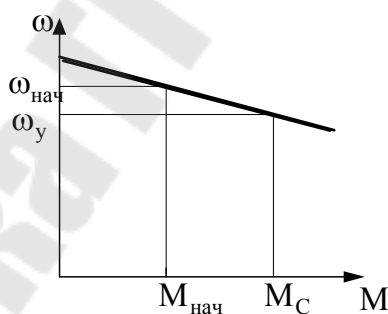
При необходимости, аналогично, можно найти аналитические решения для соотношения  $m=4$ .

(6.5) – (6.8) позволяют производить анализ переходных процессов в конкретных условиях.

В случае замкнутой системы вместо (6.1) записывается ее полное описание, из которого получают соответствующее характеристическое уравнение. С помощью исходной системы уравнений, начальных условий и по статистическим характеристикам замкнутой системы определяют коэффициенты и установившиеся значения (т.е. вынужденные решения). Рассмотрим отдельные примеры.

### 6.3. наброс нагрузки

Возьмем случай, когда  $m < 4$ . Начальные и установившиеся значения получим на основании статических характеристик:



До наброса нагрузки двигатель работал с моментом  $M_{\text{нач}} = M_{C_{\text{нач}}}$  при  $\omega_{\text{нач}}$ . При  $t=0$  нагрузка скачком изменилась до значения  $M_C$ . Упростим теперь (6.5) вынеся за скобки  $(\omega_{\text{нач}} - \omega_y)$  и учитывая, что  $T_M = \frac{J}{\beta}$  и

$\frac{M_{\text{нач}} - M_C}{\omega_{\text{нач}} - \omega_y} = -\beta$ , получаем коэффициент при синусоидальной составляющей:

$$\frac{M_{\text{нач}} - M_C}{\Omega_p J(\omega_{\text{нач}} - \omega_y)} + \frac{\alpha}{\Omega_p} = -\frac{1}{\Omega_p T_M} + \frac{\alpha}{\Omega_p} = -\frac{1 - \alpha T_M}{\Omega_p T_M}.$$

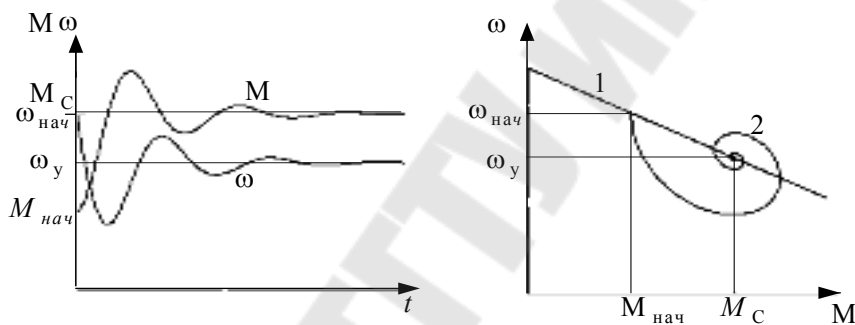
В результате:

$$\omega(t) = \omega_y + (\omega_{\text{нач}} - \omega_y) \left[ \cos \Omega_p t - \frac{1 - \alpha T_M}{\Omega_p T_M} \sin \Omega_p t \right] e^{-\alpha t}.$$

(6.6) упростим, вынося за скобки  $(M_{\text{нач}} - M_C)$  и учитывая, что:  $\beta \Delta \omega_{\text{нач}} = \beta(\omega_0 - \omega_{\text{нач}}) = M_{\text{нач}}$ , получим:

$$M(t) = M_C + (M_{\text{нач}} - M_C) \left[ \cos \Omega_p t + \frac{\alpha}{\Omega_p} \sin \Omega_p t \right] e^{-\alpha t}.$$

Временные диаграммы  $\omega(t)$ ,  $M(t)$  переходного процесса и статическая(1) и динамическая (фазовая траектория-2) механические характеристики:



При набросе нагрузки начинает уменьшаться скорость с инерционностью определяемой отдачей кинетической энергии, которая учитывается с помощью электромеханической постоянной времени. С уменьшением скорости ротора начинает уменьшаться ЭДС и с запаздыванием, определяемым электромагнитной инерционностью возрастают ток и момент. При увеличении жесткости механической характеристики уменьшается электромеханическая постоянная времени и увеличивается коэффициент при синусоидальной составляющей в (6.5). В результате скорость изменяется более интенсивно и амплитуда колебаний увеличивается.

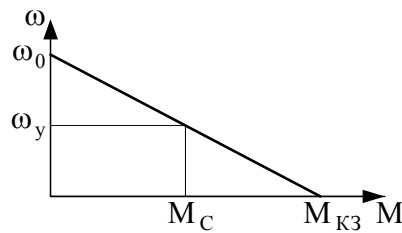
#### 6.4. Скачок задания

Здесь можно рассмотреть 2 случая:

А. При питании от управляемого преобразователя в разомкнутом ЭП с ограничением задания из расчета не превышения током и моментом допустимых значений и с  $T_{\Theta} \neq 0$ .

Б. Прямое включение в сеть с введением пускового сопротивления (реостатный пуск). При этом  $m > 4$  и можно принять  $T_{\text{Э}} = 0$ .

**Прямой пуск при  $T_{\text{Э}} \neq 0$ .** Механическая характеристика:



Если пуск производится при реактивном моменте  $M_C \neq 0$  с начальными значениями  $\omega = 0$  и  $M = 0$ , то тех пор пока  $M \leq M_C$  ротор остается неподвижным и протекает только электромагнитный процесс. С момента, когда  $M > M_C$  ротор начинает разворачиваться и начинается электромеханический процесс, т.е. пуск протекает в два этапа:

1 Этап:  $M \leq M_C$ . (6.1) записывается следующим образом:

$$T_{\text{Э}} \frac{dM}{dt} + M = \beta \omega_0 = M_{\text{КЗ}}.$$

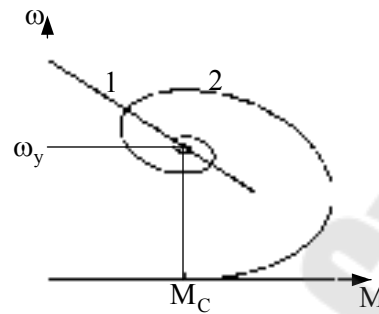
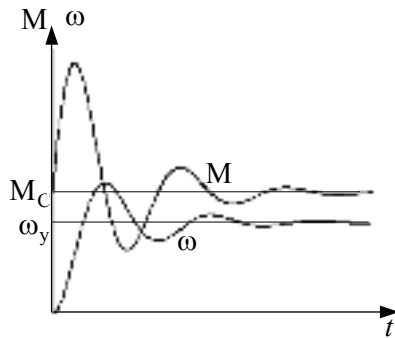
Решение уравнения  $M = M_{\text{КЗ}}(1 - e^{-t/T_{\text{Э}}})$ , а длительность электромагнитного процесса  $t_1 = T_{\text{Э}} \ln \left( \frac{M_{\text{КЗ}}}{M_{\text{КЗ}} - M_C} \right)$ .

2 Этап. Начало электромеханического процесса ( $t=0$ ) переносим в момент времени  $t_1$ . Начальные условия:  $\omega_{\text{нач}} = 0$ ,  $M_{\text{нач}} = M_C$ .

Запишем теперь (6.5) и (6.6) для данного случая с учетом, что  $\beta \Delta \omega_{\text{нач}} = \omega_0 - \omega_{\text{нач}} = M_{\text{КЗ}}$ :

$$\begin{cases} \omega(t) = \omega_y - \omega_y e^{-\alpha t} \left( \cos \Omega_p t + \frac{\alpha}{\Omega_p} \sin \Omega_p t \right) \\ M(t) = M_C + \frac{M_{\text{КЗ}} - M_C}{\Omega_p T_{\text{Э}}} \cdot \sin \Omega_p t \cdot e^{-\alpha t} \end{cases}$$

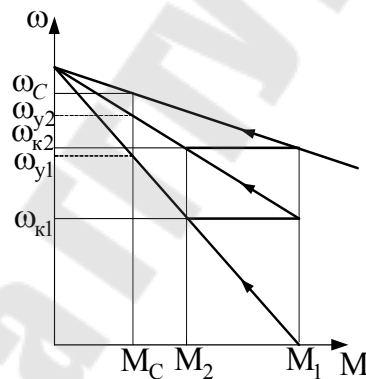
Диаграммы переходного процесса  $\omega(t)$ ,  $M(t)$ , статическая (1) и динамическая (фазовая траектория -2) механические характеристик:



Увеличение электромагнитного момента  $M$  вызывает рост скорости, но это происходит с запаздыванием из-за механической инерционности.

**Реостатный пуск.** При введении пускового сопротивления  $R_{\text{п}}$  в цепь якоря ДПТ или ротора АД электромагнитная постоянная времени  $T_{\text{Э}} \frac{L_{\text{Яд}}}{R_{\text{Яд}} + R_{\text{п}}}$  уменьшается. Практически для всех ступеней  $m > 4$  и можно принять  $T_{\text{Э}} = 0$ . Рассмотрим процесс на примере пуска в две ступени.

Механические характеристики:



При включении в сеть или при шунтировании очередной пусковой ступени, когда  $T_{\text{Э}}=0$  момент скачком возрастает до значения  $M_1$ , а (6.1) будет записываться:

$$\left. \begin{aligned} M &= \beta(\omega_0 - \omega) \\ M - M_C &= J \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\}$$

Разгон на пусковых характеристиках должен происходить до установившихся скоростей  $\omega_{yi}$  ( $i$ -номер ступени пуска), однако при скоростях  $\omega_{ki}$ , когда ( $M=M_2$ ) происходит: шунтирование очередной ступени, переход двигателя на следующую характеристику и начало нового этапа пуска. Аналитические решения для каждой ступени записываются:

$$\omega(t) = \omega_{yi} - (\omega_{начi} - \omega_{yi}) e^{-\frac{t}{T_{Mi}}}$$

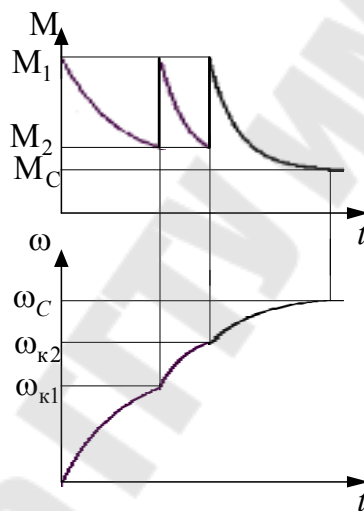
$$M(t) = M_C - (M_1 - M_C) e^{-\frac{t}{T_{Mi}}}$$

где  $T_{Mi} = \frac{J}{\beta_i}$ .

С уменьшением пускового сопротивления модуль жесткости  $\beta_i$  возрастет, а  $T_{Mi}$  убывает. Время разгона на  $i$ -ой ступени:

$$t_i = T_{Mi} \cdot \ln \frac{\omega_{yi} - \omega_{начi}}{\omega_{yi} - \omega_{ки}} = T_{Mi} \cdot \ln \frac{M_1 - M_C}{M_1 - M_2}$$

Временные диаграммы:



### 6.5. Переходные процессы, при управляющем воздействии, изменяющемся во времени: $\omega_0=f(t)$

В замкнутых системах ЭП задающее воздействие  $\omega_0$  вырабатывается системой регулирования как функция времени, что позволяет формировать наиболее близкие к оптимальным траекториям переходные процессы. Характерные законы изменения сигнала задания:

- линейный  $\omega_0(t) = \omega_{0нач} + \varepsilon_0 t$ ,
- экспоненциальный  $\omega_0(t) = \omega_{0у} (1 - e^{-t/T_n})$ ,

где  $\varepsilon_0 = d\omega_0 / dt$  - заданное ускорение, а  $T_n$  - постоянная времени, определяющая темп изменения сигнала задания.

При линейном законе дифференциальные уравнения (6.2) и (6.3), описывающие динамику ЭМС, принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} T_M T_\varepsilon \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega &= (\omega_{0\text{нач}} - \Delta\omega_C) + \varepsilon_0 t \\ T_M T_\varepsilon \frac{d^2 M}{dt^2} + T_M \frac{dM}{dt} + M &= M_C + \varepsilon_0 J \end{aligned} \right\} \quad (6.9)$$

где:  $\Delta\omega_C = \frac{M_C}{\beta} = (\omega_0 - \omega_C)$  и при  $M_C = \text{const}$  так же и  $\Delta\omega_C = \text{const}$ .

Частное решение для первого уравнения (6.9) ищется в виде:  $\omega^* = a + bt$ . Принимая для облегчения анализа  $T_\varepsilon = 0$ , подставляем частное решение в левую часть

$$b \cdot T_M + a + bt = (\omega_{0\text{нач}} - \Delta\omega_C) + \varepsilon_0 t$$

Слагаемому  $bt$  в левой части соответствует слагаемое  $\varepsilon_0 t$  в правой, т.е.  $b = \varepsilon_0$ . Теперь находим:

$$a = \omega_{0\text{нач}} - \Delta\omega - \varepsilon_0 T_M,$$

а полное решение:  $\omega(t) = \omega^* + Ae^{-t/T_M}$ .

Определяя  $A$  по начальным условиям при  $t=0$ , получим:

$$\omega(t) = \varepsilon_0 t + \omega_{\text{нач}} e^{-t/T_M} + (\omega_{0\text{нач}} - \Delta\omega_C - \varepsilon_0 T_M) (1 - e^{-t/T_M}). \quad (6.10)$$

Частное решение для 2-ого уравнения системы:

$$M^* = M_C + \varepsilon_0 J,$$

полное решение:  $M(t) = M^* + Be^{-t/T_M}$ .

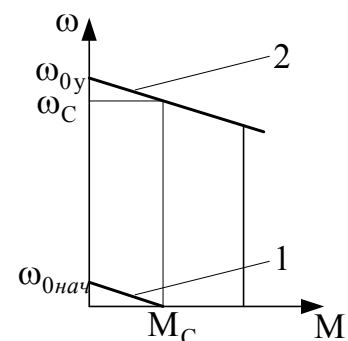
После определения  $B$  закон изменения момента:

$$M(t) = (M_C + \varepsilon_0 J) + (M_{\text{нач}} - M_C - \varepsilon_0 J) e^{-t/T_M}. \quad (6.11)$$

Рассмотрим на примере пуска при постоянной нагрузке.  $M_C = \text{const}$ .

На 1-ом этапе пуска, когда момент двигателя  $M \leq M_C$ , ротор неподвижен и момент двигателя изменился по закону:  $M(t) = \beta\omega_0(t) = \beta\varepsilon_0 t$ .

Когда момент ЭД начинает превышать нагрузку, т.е.  $M > M_C$  начинается 2-ой этап. Начальные условия для 2-ого этапа в соответствии со статической характеристикой 1.



$$\omega_{\text{нач}} = 0; \quad \omega_{0\text{нач}} - \Delta\omega_C = 0;$$

$$M_{\text{нас}} = M_C.$$

С их учетом (6.10) и (6.11) записываются:

$$\omega(t) = \varepsilon_0 t - \varepsilon_0 T_M (1 - e^{-t/T_M})$$

$$M(t) = M_C + \varepsilon_0 J (1 - e^{-t/T_M})$$

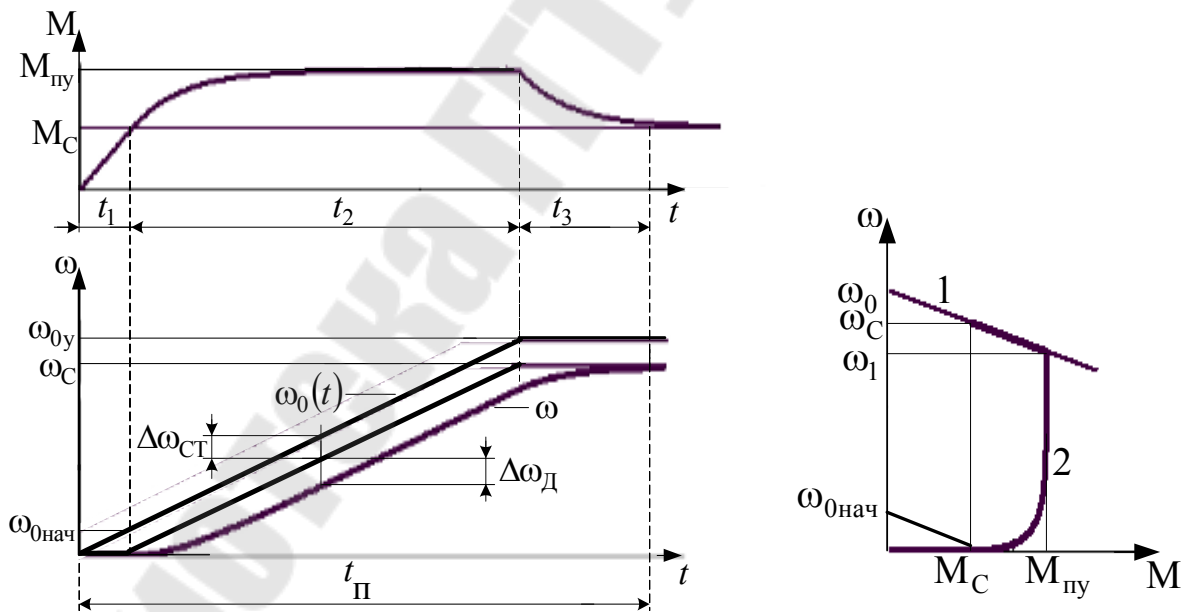
2-ой этап закончится тогда, когда управляющее воздействие достигнет установившегося значения  $\omega_{0y}$  (статическая характеристика **2**).

На 3-ем этапе разгон по статической характеристике **2** при постоянных воздействиях и изменение скорости и момента происходит по экспоненте:

$$\omega(t) = \omega_C + (\omega_1 - \omega_C) e^{-t/T_M}$$

$$M(t) = M_C + (M_{\text{пу}} - M_C) e^{-t/T_M}$$

Диаграммы процесса пуска  $M(t)$  и  $\omega(t)$  с линейно возрастающим задающим воздействием при времени пуска  $t_{\text{II}} > 4T_M$ , статическая(1) и динамическая(2) механические характеристики:



При линейном изменении управления воздействия в динамическом установившемся режиме закон движения воспроизводится с ошибкой, состоящей из статической ошибки:  $\Delta\omega_{\text{СТ}} = M_C / \beta$  и динамической ошибки:  $\Delta\omega_{\text{Д}} = \varepsilon_0 T_M$ .



## 6.6. Переходные процессы при нелинейных механических характеристиках

Для практической оценки используют в основном 3 подхода: грубая оценка, аппроксимация и графоаналитические методы.

Грубая оценка: Погрешности данного подхода определяются допущением, что динамический момент во время процесса остается неизменным. Например, реостатный пуск ДПТ ПВ, обладающего нелинейными характеристиками:

Принимая, что динамический момент определяется средним пусковым моментом:

$$M_{п.ср} = 0,5(M_1 + M_2)$$

уравнение движения решается в приращениях для получения времени пуска:

$$t_{п} = J \frac{\Delta\omega}{M_{д}} = J \frac{\omega_{с}}{M_{п.ср} - M_{с}}$$

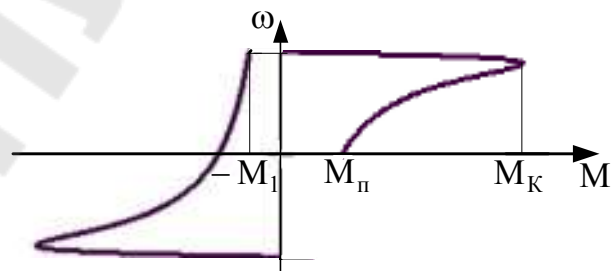
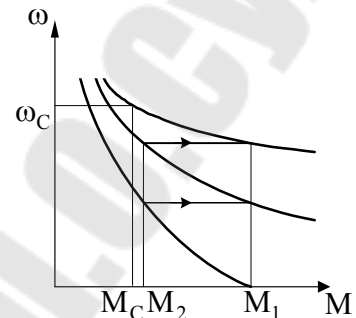
При прямом пуске АД принимают  $M_{п.ср} = 0,45(M_{п} + M_{к})$ .

Для торможения противовключения средние тормозной момент:

$$M_{т.ср} = 0,5(M_1 + M_{п})$$

и время торможения

$$t_{т} = J \frac{\Delta\omega}{M_{т.ср}}$$



Аппроксимация. Нелинейные характеристики в этом случае аппроксимируются отрезками прямых и расчет ведется поэтапно по участкам аппроксимации. На каждом участке определяются:

- начальные и установившиеся значения переменных;
- модуль жесткости механической характеристики;
- постоянные времени;
- вид дифференциальных уравнений и корни характеристического уравнения;
- аналитические решения дифференциальных уравнений.

Диаграммы переходного процесса получают припасовыванием результатов расчета на отдельных участках.

Графоаналитические методы. Они применяются, когда аппроксимация требует большого числа отрезков. Как правило, они сводятся к приближенному решению уравнения движения. Один из методов рассмотрен в 1-й главе.

### 6.7. Особенности анализа переходных процессов в системах ЭП с СД и АД

Описание системы с СД при его работе на устойчивой части угловой характеристики:

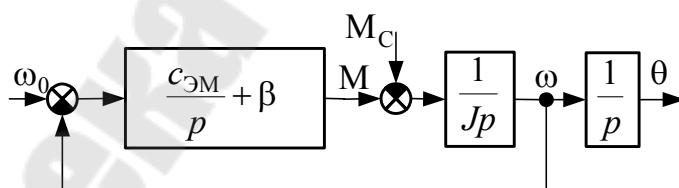
$$M = \left( \frac{c_{ЭМ}}{P} + \beta \right) (\omega_0 - \omega) \left. \vphantom{\frac{c_{ЭМ}}{P} + \beta} \right\} \\ M - M_C = Jp\omega$$

где:  $c_{ЭМ}$  – коэффициент жесткости электромагнитной связи между полем статора и ротором, представляющим постоянный магнит;  $\beta$  – модуль жесткости асинхронной характеристики, определяемой пусковой или демпферной обмоткой.

При отсутствии последней обмотки СД представляет собой консервативное колебательное звено. Поэтому обычно интересуется, как ведет себя двигатель при действии возмущения. За выходную координату принимают угол вылета ротора  $\theta$ , а уравнение движения при этом второго порядка:

$$M - M_C = Jp^2\theta$$

Структурная схема:



Для систем с СД и АД, при учете электромагнитной инерционности или анализе динамики в большом, применяют переход к обобщенной электрической машине. Расчеты производят на вычислительной технике. При нарушении допущений для обобщенной машины используют более сложные модели в фазных координатах АВС.

## 7. Регулирование координат ЭП

### 7.1. Общие понятия

Под регулированием координат понимают:

- поддержание переменной на заданном уровне;
- ограничение переменной допустимым значением;
- воспроизведение переменной заданного закона изменения;
- слежение переменной с требуемой точностью за заданным значением, изменяющимся по произвольному закону.

Способы регулирования подразделяются на параметрические и автоматические. Под параметрическими понимаются способы регулирования, применяемые в разомкнутых системах ЭП, с изменением параметров цепей двигателей или подводимой электрической энергии. Автоматическое - реализуется в замкнутых системах (с обратными связями), когда регулирование переменной ставится в зависимость от изменения какой-либо координаты.

Различают два принципа автоматического регулирования: по отклонению регулируемой координаты от заданного значения (с помощью отрицательной ОС) и по возмущению, которое предполагает компенсацию влияния возмущения.

## 7.2. Показатели регулирования

Для количественной оценки способов регулирования используют следующие показатели: точность, диапазон, плавность, динамические показатели качества, экономичность. Применимость способов определяется требуемым законом регулирования (постоянство момента или мощности).

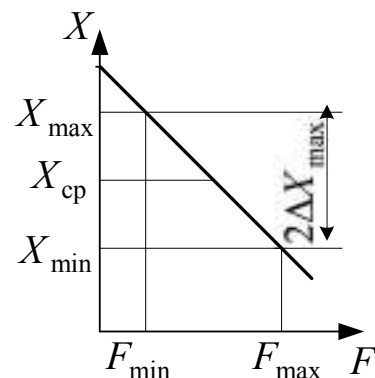
Точность регулирования характеризует возможное отклонение регулируемой координаты от заданного значения под действием различных возмущений. При известном пределе изменения возмущений под заданным значением может пониматься среднее значение. Оценивается точность погрешностью регулирования или ошибкой, которая определяется отношением:

$$\Delta X_{\%} = \frac{\Delta X_{\max}}{X_{\text{ср}}} \cdot 100\% = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{X_{\max} + X_{\min}} \cdot 100\%.$$

При регулировании скорости для оценки точности может использоваться статизм характеристики:

$$s_x = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0}$$

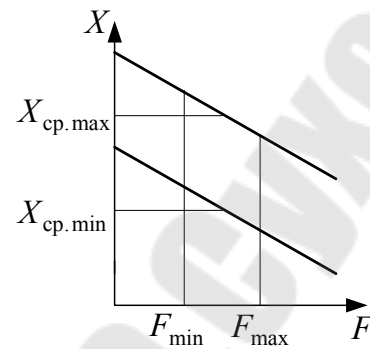
где:  $\omega_H$  – скорость, соответствующая номинальному моменту двигателя при его работе на рассматриваемой характеристике.



Диапазон регулирования характеризует пределы регулирования координаты для конкретного уровня возмущения или пределы регулирования средних значений:

$$D = X_{\text{ср. max}} / X_{\text{ср. min}}.$$

Практически все способы позволяют изменять регулируемые координаты до 0. Однако с расширением диапазона уменьшается точность, поэтому величина диапазона ограничена допустимой ошибкой.



Плавность регулирования характеризует число устойчивых значений координаты в заданном диапазоне регулирования. Оценивается коэффициентом плавности

$$K_{\text{пл}} = \frac{X_i}{X_i - X_{i-1}},$$

где  $i$  – номер ступени регулирования.

Динамические показатели - быстродействие, перерегулирование, колебательность. Колебательность может оцениваться частотным показателем, логарифмическим декрементом затухания или числом колебаний регулируемой координаты за время регулирования.

Экономичность. Применение более совершенного ЭП требует увеличения капитальных затрат и эксплуатационных расходов. Они должны окупаться за счет увеличения производительности, качества технологического процесса, за счет повышения надежности рабочей машины или уменьшения энергопотребления. Выбор наиболее экономичного варианта производится на основе технико-экономического анализа нескольких вариантов регулируемых ЭП.

### **7.3. Система управляемый преобразователь - двигатель (обобщенная система УП-Д)**

Для получения более высоких показателей и реализации автоматического регулирования ЭП питание ЭД производят от отдельного управляемого преобразователя (УП). Регулирование координат при этом производится за счет изменения параметров электрической энергии на выходе УП. В большинстве случаев преобразователь представляется апериодическим звеном со своей постоянной времени  $T_{\text{П}}$  и коэффициентом передачи

$$k_{\text{П}}' = \Delta\omega_0 / \Delta U_{\text{У}} \text{ или } k_{\text{П}} = \frac{\Delta E_{\text{П}}}{\Delta U_{\text{У}}},$$

а для преобразователей частоты

$$\kappa_f = \frac{\Delta f_1}{\Delta U_{yf}},$$

где:  $\omega_0$  – скорость идеального холостого хода (или синхронная скорость для ЭД переменного тока);  $E_{\Pi}$  – ЭДС преобразователя;  $f_1$  – выходная частота преобразователя;  $U_Y$  – управляющее напряжение на входе преобразователя.

При этом обобщенная система описывается следующими уравнениями:

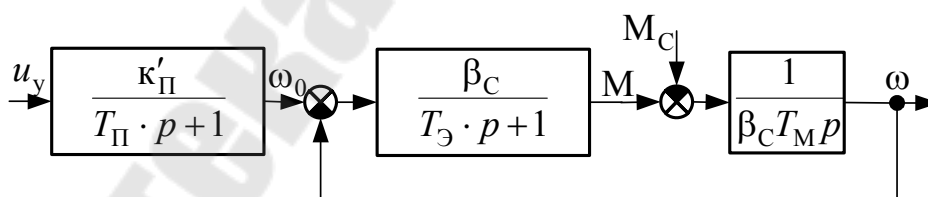
$$\left. \begin{aligned} \kappa'_{\Pi} u_Y &= (T_{\Pi} p + 1) \omega_0 \\ M(T_{\Theta} p + 1) &= \beta_C (\omega_0 - \omega_1) \\ M - M_{12} - M_{C1} &= J_1 p \omega_1 \\ M_{12} - M_{C1} &= J_2 p \omega_2 \\ p M_{12} &= c_{12} (\omega_1 - \omega_2) \end{aligned} \right\}$$

где:  $T_{\Theta}$  и  $\beta_C$  – электромагнитная постоянная времени и модуль жесткости механической характеристики системы ЭП с учетом внутренних параметров преобразователя.

При одномассовой схеме механической части:

$$\left. \begin{aligned} \kappa'_{\Pi} u_Y &= (T p_{\Pi} + 1) \omega_0 \\ M(T_{\Theta} p + 1) &= \beta_C (\omega_0 - \omega) \\ M - M_C &= J p \omega \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

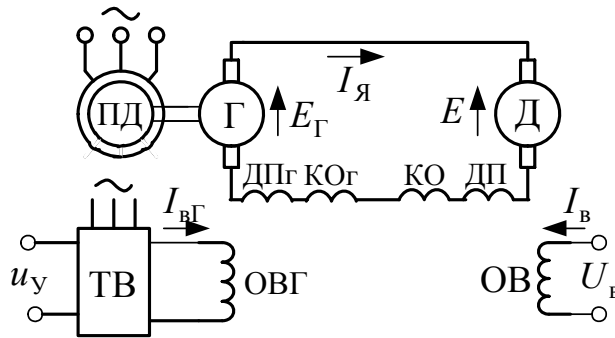
Структурная схема:



Применение УП представляет дополнение обобщенной ЭМС динамическим звеном. Уменьшается модуль жесткости механической характеристики системы ЭП по сравнению с характеристикой самого двигателя из-за внутреннего сопротивления преобразователя.

#### 7.4. Система генератор-двигатель (Г–Д)

Упрощенная схема:



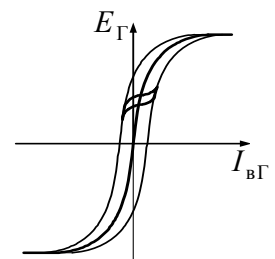
Рабочий двигатель Д питается от электромашинного агрегата, состоящего из приводного двигателя ПД и генератора постоянного тока Г. Основное управление скоростью Д производится изменением ЭДС генератора  $E_G$  при воздействии на его цепь возбуждения. В качестве возбудителя может использоваться генератор постоянного тока или тиристорный ТВ. Если в качестве ПД используется АД, то за счет конечной жесткости его механической характеристики, происходит дополнительное уменьшение  $\beta_c$ . Синхронный двигатель большее влияния оказывает на динамические режимы из-за своей колебательности.

При линейном опорном напряжении регулировочная характеристика ТВ косинусоидальна, но она линеаризуется без большой погрешности. В целом он описывается:

$$k_{ТВ} u_Y = (T_{ТВ} p + 1) e_{ТВ},$$

где:  $k_{ТВ} = \Delta E_{ТВ} / \Delta U_Y$  коэффициент передачи,  $T_{ТВ}$  – электромагнитная постоянная времени ТВ, определяемая суммой времени запаздывания между коммутацией тиристоров и постоянной времени фильтра на входе СИФУ.

Регулировочная характеристика Г представляет собой кривую намагничивания. Она нелинейна и при разных направлениях изменения его скорости неоднозначна: В динамических режимах возможна работа на частных петлях гистерезиса. Для упрощения анализа берут линейный участок средней кривой намагничивания и генератор описывается:



$$k_G e_{ТВ} = R_{вГ} (T_{вГ} p + 1) e_G \quad \text{или}$$

$$k'_G e_{ТВ} = R_{вГ} (T_{вГ} p + 1) \omega_0$$

где:  $k_G = \Delta E_G / \Delta I_{вГ}$  – коэффициент передачи генератора, а

$$\kappa_{\Gamma}' = \frac{\kappa_{\Gamma}}{(\kappa\Phi)};$$

$R_{\text{ВГ}} = R_{\text{ОВГ}} + R_{\text{ТВ}}$  - сопротивление цепи возбуждения Г;  $T_{\text{ВГ}} = \frac{L_{\text{ОВГ}} + L_{\text{ТВ}}}{R_{\text{ВГ}}}$

- электромагнитная постоянная времени цепи возбуждения.

Уравнение электрического равновесия для якорной цепи:

$$e_{\Gamma} - e = R_{\text{Я}}(T_{\text{Я}}p + 1)i_{\text{Я}},$$

или с учетом, что  $M = \kappa\Phi i_{\text{Я}}$ , механическая характеристика:

$$M(T_{\text{Я}}p + 1) = \beta_{\text{С}}(\omega_0 - \omega),$$

где  $R_{\text{Я}} = R_{\text{Яд}} + R_{\text{ЯГ}}$ ,  $L_{\text{Я}} = L_{\text{Яд}} + L_{\text{ЯГ}}$ ,  $T_{\text{Я}} = L_{\text{Я}} / R_{\text{Я}}$  - суммарные параметры якорной цепи.

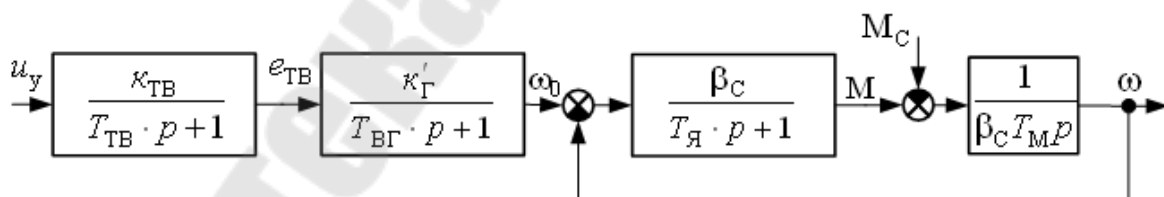
Жесткость механической характеристики системы Г-Д:

$$\beta_{\text{С}} = \frac{(\kappa\Phi)_{\text{д}}^2}{R_{\text{Я}}} \approx 0,5\beta_{\text{д}}.$$

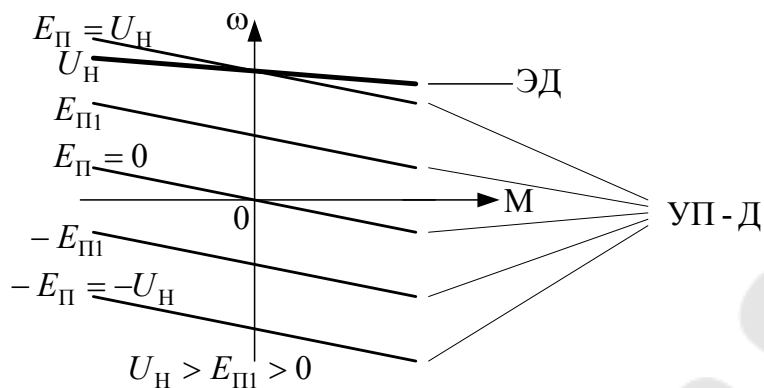
Общее описание системы:

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{У}}\kappa_{\text{ТВ}} &= (T_{\text{ТВ}}p + 1)e_{\text{ТВ}}; \\ \kappa_{\Gamma}'e_{\text{ТВ}} &= R_{\text{ВГ}}(T_{\text{ВГ}}p + 1)\omega_0; \\ M(T_{\text{Я}}p + 1) &= \beta_{\text{С}}(\omega_0 - \omega); \\ M - M_{\text{С}} &= Jp\omega. \end{aligned} \right\}$$

Структурная схема:



Статистические характеристики ЭД и системы Г-Д ( $U_{\text{Н}}$  - номинальное напряжение рабочего ЭД):



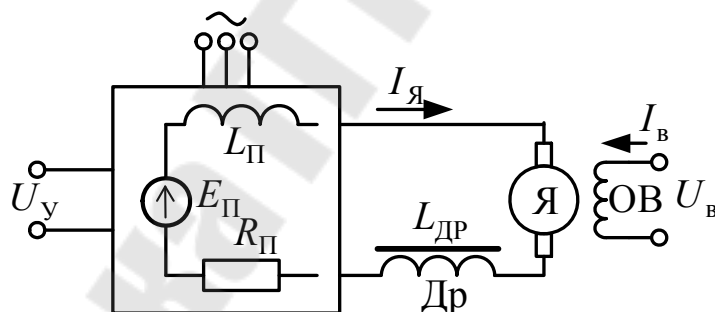
При воздействии на цепь возбуждения двигателя скорость регулируется вверх от естественной характеристики.

Основные особенности:

- три ступени преобразования электрической энергии и в результате низкий КПД  $\eta_{ГД} = \eta_{ПД} \cdot \eta_{Г} \cdot \eta_{д}$ ;
- высокие капитальные затраты;
- высокое качество энергопотребления и потребляемый ток пропорционален мощности на валу рабочего двигателя.

### 7.5. Система тиристорный преобразователь – двигатель (ТП–Д)

Упрощенная схема (ДР-сглаживающий дроссель):



Процессы в якорной цепи определяются средними значениями тока и напряжения за период коммутации тиристоров, т.е. преобразователь можно представить в виде источника напряжения ИН с внутренними параметрами  $R_{\Pi}$ ,  $L_{\Pi}$  и ЭДС  $E_{\Pi}$ . Регулировочная характеристика при линейном опорном напряжении линейризуется без большой погрешности. Внешняя характеристика преобразователя линейна только в режиме непрерывного тока и тогда преобразователь представляется апериодическим звеном:



$$u_Y k_{\Pi} = (T_{\Pi} p + 1) e_{\Pi} \quad \text{или} \quad u_Y k'_{\Pi} = (T_{\Pi} p + 1) \omega_0,$$

где:  $k_{\Pi} = \frac{\Delta E_{\Pi}}{\Delta U_Y}$ ,  $k'_{\Pi} = \frac{k_{\Pi}}{k\Phi}$  - коэффициенты передачи ТП.

В режиме малых нагрузок для нереверсивного преобразователя или реверсивного с отдельным управлением присутствует режим прерывистого тока. При этом внешние характеристики резко смягчаются и уменьшается модуль жесткости механической характеристики системы  $\beta_C$ . Для реверсивных преобразователей с совместным управлением зона прерывистого тока может отсутствовать, но имеется нелинейность из-за несогласования углов регулирования комплектами клапанов ( $\alpha_1 + \alpha_2 \neq \pi$ ) и из-за падений напряжения от уравнительного тока.

При анализе основных физических свойств системы в дальнейшем будем рассматривать только режим непрерывного тока.

Описание системы ТП – Д при постоянном магнитном потоке ЭД:

$$\left. \begin{aligned} k'_{\Pi} u_Y &= (T_{\Pi} p + 1) \omega_0 \\ M(T_{\text{я}} p + 1) &= \beta_C (\omega_0 - \omega) \\ M - M_C &= J p \omega \end{aligned} \right\} \quad (7.2)$$

где:  $T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = \frac{L_{\Pi} + L_{\text{др}} + L_{\text{яд}}}{R_{\Pi} + R_{\text{др}} + R_{\text{яд}}}$  - электромагнитная постоянная якорной

цепи;  $\beta_C = \frac{(k\Phi)^2}{R_{\text{я}}}$ ;  $R_{\Pi}$ ,  $L_{\Pi}$  - внутренние параметры ТП, определяемые

процессом коммутации и наличием трансформатора или реактора в цепи переменного тока.

Представляя уравнение движения через токи, и преобразуя его следующим образом:

$$\left[ i_{\text{я}} - I_C = \frac{J}{k\Phi} p \omega \times \frac{k\Phi}{k\Phi} \right] \times R_{\text{я}}, \quad \text{или} \quad i R_{\text{я}} - I_C R_{\text{я}} = T_M p e$$

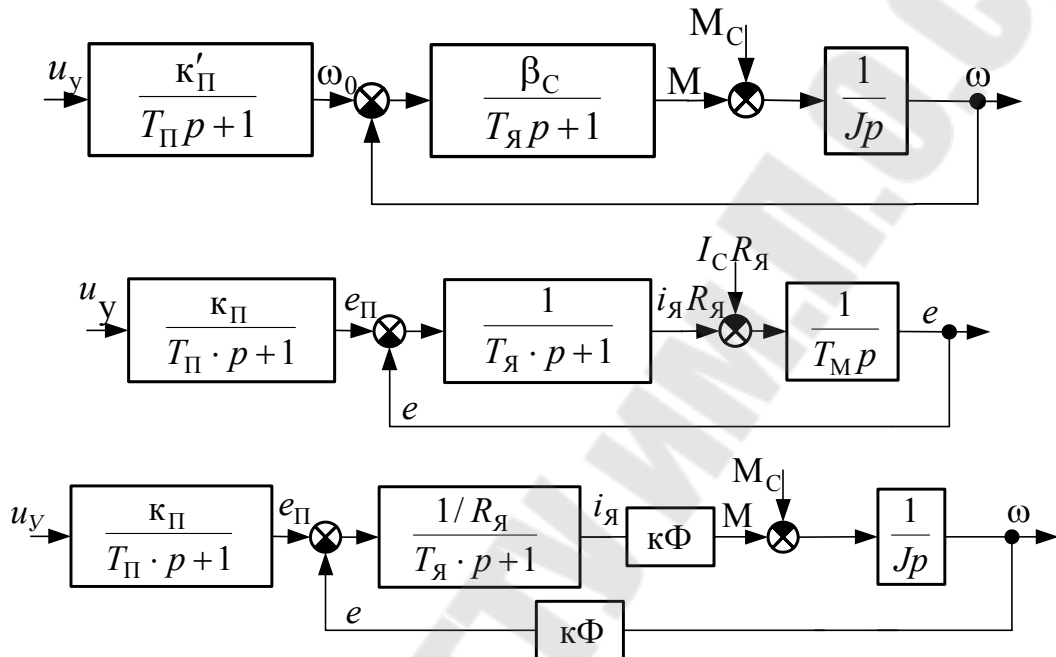
получим описание системы:

$$\left. \begin{aligned} k_{\Pi} u_Y &= (T_{\Pi} p + 1) e_{\Pi} \\ e_{\Pi} - e &= (T_{\text{я}} p + 1) R_{\text{я}} i_{\text{я}} \\ i_{\text{я}} R_{\text{я}} - I_C R_{\text{я}} &= T_M p e \end{aligned} \right\} \quad (7.3)$$

или полное с учетом, что  $c = k\Phi$ :

$$\left. \begin{aligned} \kappa_{\Pi} u_y &= (T_{\Pi} p + 1) e_{\Pi} \\ e_{\Pi} - e &= R_{\text{я}} (T_{\text{я}} p + 1) i_{\text{я}} \\ M - M_{\text{с}} &= J p \omega \\ M &= c i_{\text{я}}, e = c \omega \end{aligned} \right\} (7.4)$$

Структурные схемы соответствующие (7.2), (7.3) и (7.4):



В режиме непрерывного тока механические характеристики системы аналогичны характеристикам системы Г – Д.

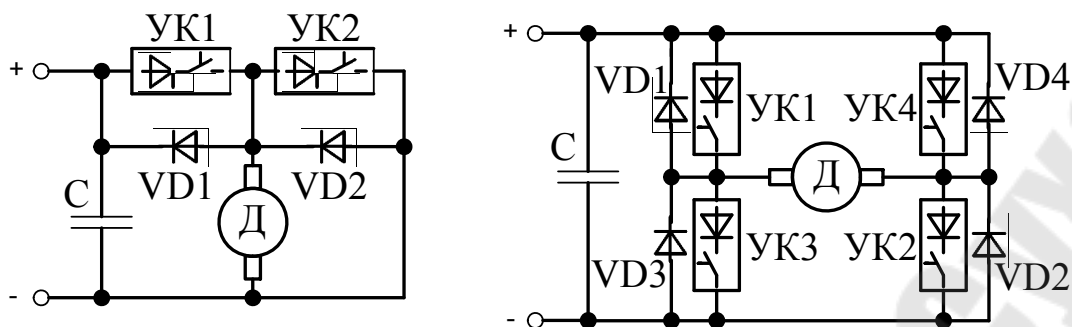
Особенности системы:

- высокие энергетические показатели;
- быстродействие может ограничиваться только допустимыми значениями  $\left(\frac{di_{\text{я}}}{dt}\right)$  для двигателя;
- низкие капитальные затраты, по сравнению с затратами для других систем.

## 7.6. Система широтно-импульсный преобразователь – двигатель (ШИП–Д)

Применяется с двигателями малой мощности и в транспортных установках при питании от сети или от аккумуляторных батарей с управляемыми ключами на транзисторах или тиристорах.

Упрощенные схемы якорных цепей нереверсивного и реверсивного приводов с отсутствием режима прерывистого тока:

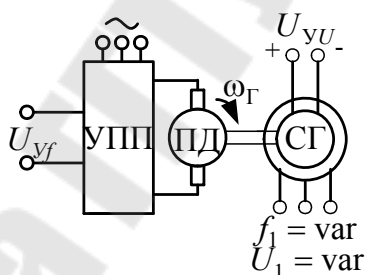


УК – управляемые полупроводниковые ключи, VD – обратные диоды.

При частоте коммутирующих ключей  $f_k \geq 2,5$  кГц преобразователь представляется безинерционным звеном, и его внутренние параметры определяются наличием питающего трансформатора. При линейном опорном напряжении регулировочная характеристика линейна и сам преобразователь в этом случае описывается:  $k_{\Pi} u_{\gamma} = e_{\Pi}$ .

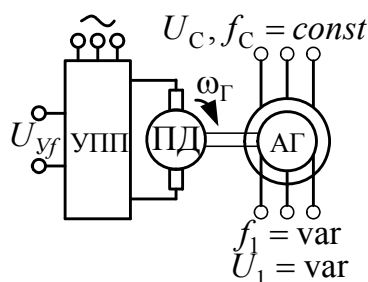
### 7.7. Система преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ–АД)

Как и в приводах постоянного тока, управляемый преобразователь может быть выполнен в виде электромашинного агрегата. Схема с синхронным генератором (СГ):



Вспомогательный ЭП постоянного тока, состоящий из управляемого преобразователя постоянного тока УПП и ПД, обеспечивает регулирование скорости СГ  $\omega_r$  и соответственно выходной частоты  $f_1$ . Канал возбуждения СГ служит для управления выходным напряжением  $U_1$ .

Необходимость регулировки напряжения одновременно с частотой определяется общим каналом управления скоростью и магнитным потоком АД по цепи статора. Схема с асинхронным генератором (АГ):

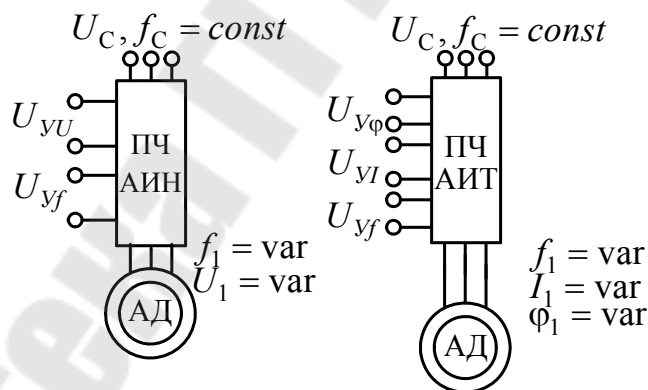


В отличие от предыдущей схемы выходное напряжение  $U_1$  является функцией как напряжения сети  $U_C$ , так и скорости генератора  $\omega_{\Gamma}$ . Поэтому для получения требуемого закона частотного регулирования иногда необходим регулятор напряжения переменного тока для питания обмотки статора АГ.

Общие особенности систем с электромашинным преобразователем:

- большое число ступеней преобразования энергии и в результате низкий КПД;
- гладкая форма кривой напряжения на выходе преобразователя при любых частотах;
- относительно низкое быстродействие по каналу управления частотой.

Улучшение энергетических показателей и регулировочных свойств обеспечивают статистические преобразователи частоты. В зависимости от назначения они выполняются в виде источника напряжения с АИН или источника тока с АИТ. Функциональные схемы:



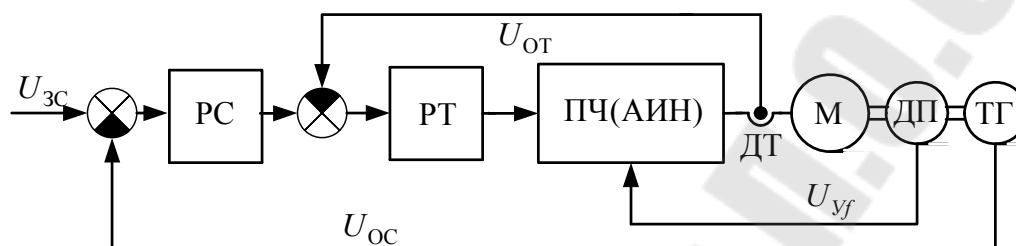
В системе с АИТ при частотно-токовом регулировании требуется дополнительный канал управления фазой тока статора, поскольку она существенно меняется с изменением нагрузки. Для формирования законов частотного управления, т.е. изменения  $U_1$  или  $I_1$  и  $\phi_1$ , используются нелинейные звенья, так называемые функциональные преобразователи (ФП). Их регулировочную характеристику получают по уравнениям электрического равновесия для статистического режима двигателя.

По каналу управления частотой в зависимости от значения выходной частоты преобразователь может представляться пропорциональным, апериодическим или звеном с чистым запаздыванием.

По каналу управления напряжением или током он представляется апериодическим звеном при амплитудном регулировании. При широтно-импульсном регулировании напряжения преобразователь - пропорциональное звено.

## 7.8. ЭП с вентильным двигателем (бесколлекторным двигателем)

Функциональная схема:

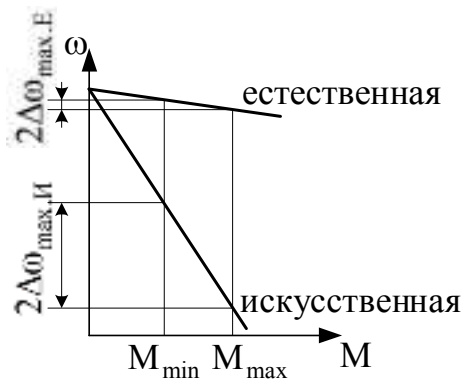


В качестве ЭД (М) применяется синхронная машина с возбуждением от постоянных магнитов. Магнитный поток остается неизменным и момент пропорционален току статора:  $M = c_M I_1$ . Коммутация фазных токов производится преобразователем частоты с управлением ключами инвертора от датчика положения ротора ДП, встроенного в двигатель. В результате система становится аналогом привода постоянного тока, но с обязательным автоматическим управлением. Встроенный тахогенератор ТГ служит датчиком обратной связи по скорости. При синтезе САУ двигатель описывается в координатной системе ХУ. Технические показатели привода не уступают тиристорным приводам постоянного тока.

## 8. Регулирование скорости

### 8.1. Реостатное регулирование

Введение добавочного сопротивления в цепь якоря ДПТ или ротора АД позволяет регулировать не только ток и момент, но и скорость. Характеристики:



С введением добавочного сопротивления  $R_{доб}$  увеличиваются абсолютная и относительная погрешности.

Когда в процессе работы  $M_C = const$  (подъемно-транспортные механизмы), то регулировать скорость можно до нуля. При требовании точного позиционирования необходимо перед остановкой снижать скорость до определенного значения. И если нагрузка изменяется, то при ступенчатом регулировании заданная точность не всегда может быть достигнута. Особенности способа:

- простота реализации и низкие капитальные затраты;
- малая точность и большие потери энергии;
- зависимость диапазона регулирования от нагрузки.

Применимость способа определяется также допустимой нагрузкой по нагреву при работе на искусственной характеристике. Если по конструкции двигателя коэффициент ухудшения условий охлаждения близок к 1, то допустимая нагрузка определяется номинальным током в силовой цепи во всем диапазоне регулирования. К примеру, для ДПТ получаем:

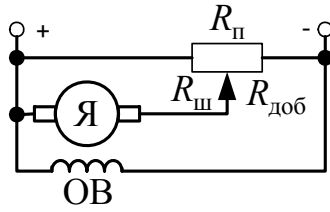
$$M_{дл.доп.} = k\Phi_H I_H = M_H = const.$$

Поэтому наиболее полное использование двигателя с реостатным регулированием происходит при постоянстве момента, т.е. для механизмов с  $M_C = const$

Реостатное регулирование обычно применяется в диапазоне  $D_\omega \leq 2 \div 5$ , а при точном позиционировании перед остановкой кратковременно:  $D_\omega \leq 10$ .

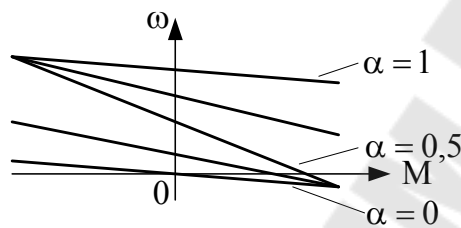
## 8.2. Регулирование ДПТ с шунтированием якоря

Для двигателей малой мощности иногда применяют следующую схему:

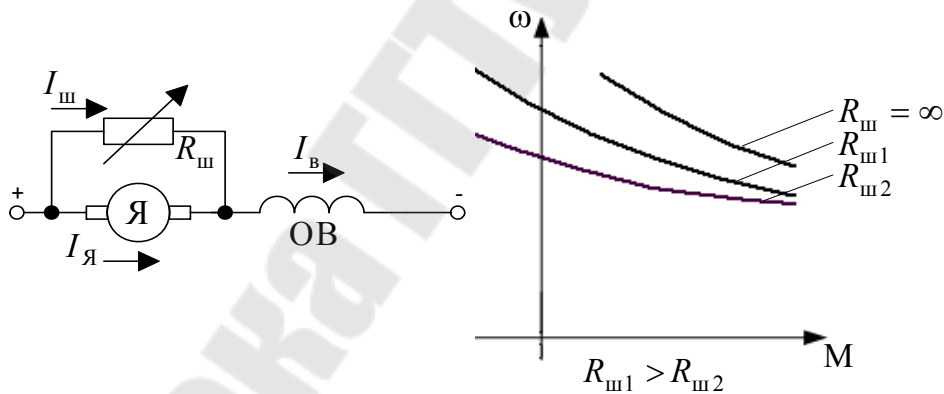


При изменении положения движка потенциометра  $R_{\text{п}}$  одновременно изменяется напряжение на якоре и вводимое в цепь якоря добавочное сопротивление. Обозначим отношение сопротивлений как:  $\alpha = \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{п}}} = 1 \dots 0$ .

Тогда характеристики при различных коэффициентах:



При использовании в механизмах подъема ДПТ ПВ при спуске груза может применяться также шунтирование обмотки якоря для получения рекуперативного торможения. Схема реализации и характеристики:

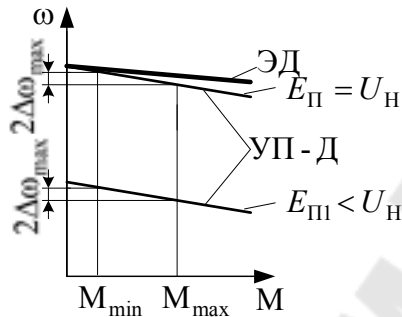


### 8.3. Регулирование скорости в системе УП-Д

Для ДПТ основным способом регулирования скорости в разомкнутой системе УП-Д является изменение напряжения на якоре за счет ЭДС преобразователя:

$$\omega = \frac{E_{\Pi}}{c} - \frac{R_{Я}}{c^2} M.$$

Модуль жесткости механических характеристик системы  $\beta_C = \frac{c^2}{R_{Яд} + R_{\Pi}}$  имеет меньшее значение, чем модуль жесткости характеристики самого двигателя. Характеристики:



При регулировании абсолютная погрешность  $\Delta\omega_{\max} = const$ , но относительная погрешность  $\frac{\Delta\omega_{\max}}{\omega_{\text{ср}}}$  и статизм характеристик увеличиваются. Поэтому, обычно,  $D_{\omega} \leq 10$ .

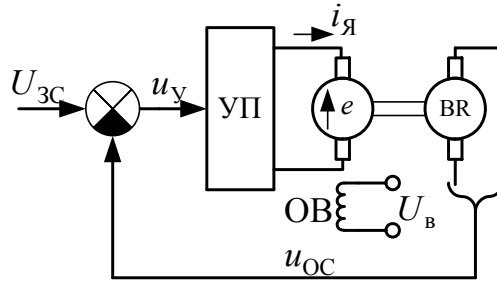
Особенности способа:

- сложность УП и относительно высокие затраты;
- меньшая зависимость погрешности от диапазона, чем при реостатном регулировании;
- меньшая зависимость  $D_{\omega}$  от нагрузки;
- малые потери энергии;
- при номинальном магнитном потоке и при коэффициенте ухудшения условий охлаждения, близким к 1, допустимая нагрузка по нагреву также определяется номинальным моментом во всем диапазоне регулирования.

#### 8.4. Автоматическое регулирование скорости ДПТ в системе УП-Д

Для повышения статической точности и расширения диапазона регулирования систему замыкают отрицательной ОС по скорости. Упрощенная схема:





Сигнал ОС по скорости:

$$u_{OC} = k_{OC} \cdot \omega, \quad \text{где} \quad k_{OC} = \frac{\Delta U_{OC}}{\Delta \omega}.$$

Уравнения, описывающие систему:

$$\left. \begin{aligned} (U_{3C} - k_{OC}\omega) \cdot k_{\Pi} &= (T_{\Pi}p + 1)e_{\Pi} \\ e_{\Pi} &= c\omega + R_{я}(T_{я}p + 1)i_{я} \\ i_{я} &= \frac{M}{c} \end{aligned} \right\}$$

Решим относительно скорости, подставляя 2-е уравнение в 1-е:

$$k_{\Pi}U_{3C} - k_{\Pi}k_{OC}\omega = c(T_{\Pi}p + 1)\omega + R_{я}(T_{\Pi}p + 1)(T_{я}p + 1)i_{я}.$$

Используем 3-е:

$$k_{\Pi}U_{3C} - k_{\Pi}k_{OC}\omega = c(T_{\Pi}p + 1)\omega + \frac{R_{я}}{c}(T_{\Pi}p + 1)(T_{я}p + 1)M.$$

Окончательно получаем:

$$\omega = \frac{k_{\Pi}}{c(T_{\Pi}p + 1) + k_{\Pi}k_{OC}}U_{3C} - \frac{R_{я}(T_{\Pi}p + 1)(T_{я}p + 1)}{c[(T_{\Pi}p + 1)c + k_{\Pi}k_{OC}]} \cdot M,$$

и статическая характеристика

$$\omega = \frac{k_{\Pi}}{c + k_{\Pi}k_{OC}}U_{3C} - \frac{R_{я}}{c^2 + ck_{\Pi}k_{OC}} \cdot M.$$

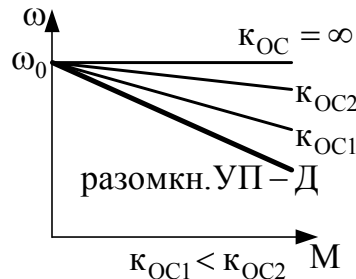
Модуль жесткости характеристики замкнутой системы:

$$\beta_{ЗАМ} = \frac{c^2 + ck_{\Pi}k_{OC}}{R_{я}} = \beta_C \left( 1 + \frac{k_{\Pi}k_{OC}}{c} \right) > \beta_C = \frac{c^2}{R_{я}}.$$

При одинаковых значениях скорости идеального холостого хода для разомкнутой и замкнутой систем: ( $\omega_{0.РАЗ} = \omega_{0.ЗАМ}$ ) соотношение значений статизма характеристик:

$$S_{x.3AM} = \frac{S_{x.PA3}}{\left(1 + \frac{K_{\Pi} K_{OC}}{c}\right)}$$

Механические характеристики при  $\omega_{0.PA3} = \omega_{0.3AM}$ :



Рассмотренную систему можно представить как система автоматического регулирования с пропорциональным регулятором скорости, входящим в УП. Использование ПИ-регулятора позволит также получить астатическую систему с абсолютно жесткой характеристикой.

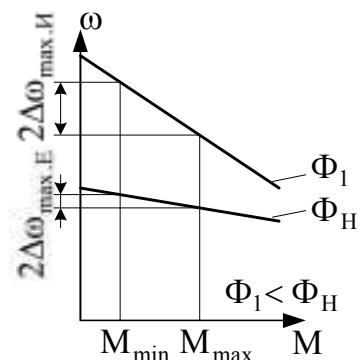
### 8.5. Регулирование скорости ДПТ изменением магнитного потока

Данный способ применяется в разомкнутых ЭП при  $U = U_H$ . Электромеханическая и механическая характеристики описываются следующими уравнениями:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{k\Phi} I_{\text{я}}, \quad \omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{(k\Phi)^2} M.$$

При  $\Phi = \Phi_H$  магнитная система практически находится в насыщении и для сохранения допустимого теплового режима регулирование осуществляется за счет уменьшения тока возбуждения. Характеристики:

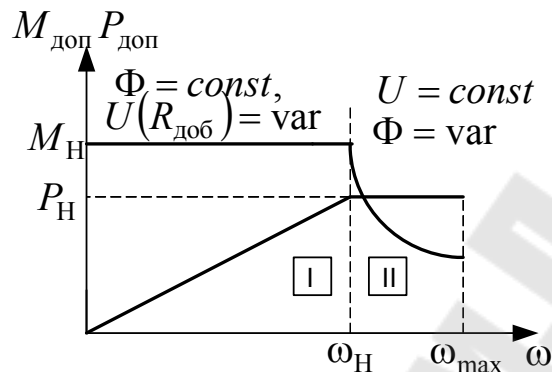
Несмотря на уменьшения жесткости характеристик, точность остается достаточно высокой. Увеличение скорости ограничивается механической прочностью и ухудшением условий коммутации тока якоря на коллекторе из-за уменьшения магнитного потока. Для ЭД нормального исполнения диапазон регулирования  $D_{\omega} \leq 1,25 \dots 2,5$ .



С уменьшением магнитного потока постоянные потери мощности практически не изменяются, а допустимая нагрузка по нагреву определяется переменными потерями:  $\Delta p_v = I_H^2 R_{\text{яд}} = \text{const}$ . При этом

$M_{дл.доп} = k\Phi I_H$  уменьшается и при увеличении скорости можно считать, что  $P_{дл.доп} = M_{дл.доп} \cdot \omega = const$ .

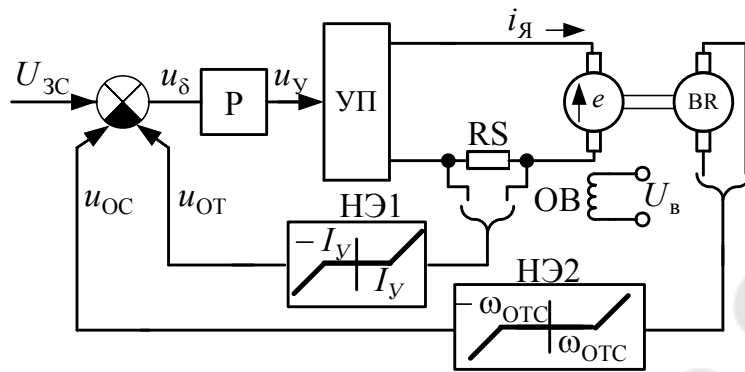
С учетом особенностей ранее рассмотренных способов можно построить диаграмму регулирования, состоящую из 2х зон. В I-ой зоне регулирование производится при постоянстве момента ( $M = const$ ), а во II-ой – при постоянстве мощности ( $P = const$ ). Вид диаграммы:



В замкнутых ЭП переход во вторую зону по требованию технологического процесса может происходить при скорости  $\omega < \omega_H$ .

### 8.6. Система, работающая в режиме пуска, торможения и реверса

Для ряда рабочих машин предъявляются требования, противоречивые с точки зрения ЭП, т.е. высокая точность регулирования скорости в широком диапазоне, высокое быстродействие и хорошее качество переходных процессов, что не всегда может быть достигнуто в системах подчиненного регулирования. Для обеспечения требований, переходят к системам с перестраиваемой структурой регулирования в зависимости от режима или от значения переменных. Один из видов реализации – система с задержанными ОС или так называемая система с обратными связями с отсечками. Упрощенная схема:



НЭ1 и НЭ2 – нелинейные элементы, выполняющие функции узлов отсечек. Они выключают или включают обратные связи при пороговых значениях переменных:  $I_Y$  – токе установки,  $\omega_{OTC}$  – скорости отсечки.

Уравнения описывающие обратные связи:

$$u_{OT} = \begin{cases} 0 & \text{при } i_{Я} \leq I_Y \quad (k_{OT} = 0) \\ k_{OT}(i_{Я} - I_Y) & \text{при } i_{Я} > I_Y \end{cases},$$

$$u_{OC} = \begin{cases} 0 & \text{при } \omega \leq \omega_{OTC} \quad (k_{OC} = 0), \\ k_{OC}(\omega - \omega_{OTC}) & \text{при } \omega > \omega_{OTC} \quad (k_{OC} \neq 0) \end{cases}.$$

P – пропорциональный регулятор с коэффициентом усиления

$$k_P = \Delta U_Y / \Delta U_{\delta},$$

где  $u_{\delta}$  – сигнал ошибки системы.

При этом коэффициент передачи прямого канала воздействия

$$k_O = k_P k_{П}.$$

Уравнения, описывающие систему ЭП без учета инерционности преобразователя и при включенных ОС:

$$\left. \begin{aligned} k_O [U_{3C} - k_{OT}(i_{Я} - I_Y) - k_{OC}(\omega - \omega_{OTC})] &= e_{П} \\ e_{П} &= c\omega + R_{Я} \left( T_{Я} \frac{di_{Я}}{dt} + i_{Я} \right) \\ i_{Я} &= I_C + \frac{J}{c} \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (9.2)$$

Решим (9.2) относительно скорости. Обозначим произведения:  $k_T = k_O k_{OT}$  и  $k_C = k_O k_{OC}$ . Теперь:

$$\kappa_O U_{3C} + \kappa_T I_Y + \kappa_C \omega_{OTC} - \kappa_T i_{Я} - \kappa_C \omega = c\omega + R_{Я} \left( T_{Я} \frac{di_{Я}}{dt} + i_{Я} \right).$$

Подставляем 3-е уравнение:

$$\begin{aligned} \kappa_O U_{3C} + \kappa_T I_Y + \kappa_C \omega_{OTC} - \kappa_T I_C - \frac{\kappa_T J}{c} \frac{d\omega}{dt} - \kappa_C \omega &= \\ = c\omega + \frac{T_{Я} R_{Я} J}{c} \frac{d^2\omega}{dt^2} + R_{Я} I_C + \frac{R_{Я} J}{c} \frac{d\omega}{dt} \end{aligned}$$

Сгруппируем слагаемые с учетом, что  $T_M = \frac{JR_{Я}}{c^2}$  и  $I_C = const$ ;

$$c \left[ T_M T_{Я} \frac{d^2\omega}{dt^2} + T_M \left( 1 + \frac{\kappa_T}{R_{Я}} \right) \frac{d\omega}{dt} + \left( 1 + \frac{\kappa_C}{c} \right) \omega \right] = (\kappa_O U_{3C} + \kappa_T I_Y + \kappa_C \omega_{OTC}) - (R_{Я} + \kappa_T) I_C.$$

Дифференциальное уравнение для скорости:

$$\begin{aligned} \frac{T_M T_{Я}}{\left( 1 + \frac{\kappa_C}{c} \right)} \frac{d^2\omega}{dt^2} + \left( 1 + \frac{\kappa_T}{c} \right) \frac{T_M}{\left( 1 + \frac{\kappa_C}{c} \right)} \frac{d\omega}{dt} + \omega &= \left( \frac{\kappa_O U_{3C} + \kappa_T I_Y + \kappa_C \omega_{OTC}}{c + \kappa_C} \right) - \\ & - \frac{(R_{Я} + \kappa_T) I_C}{c + \kappa_C} \end{aligned} \quad (9.3)$$

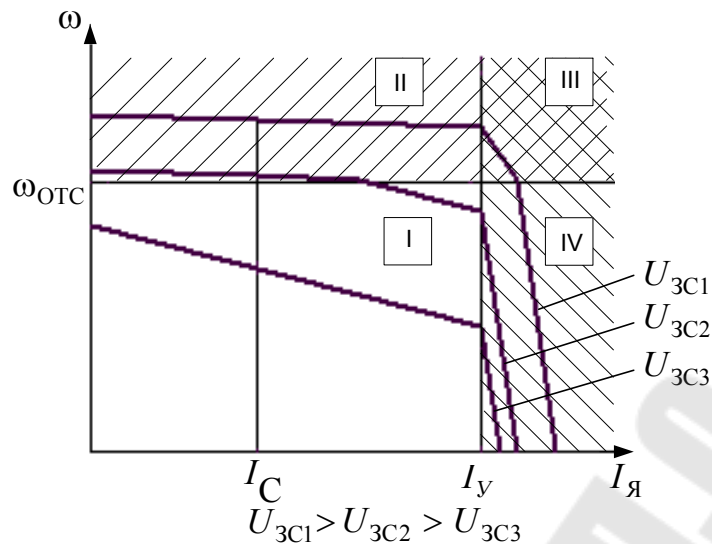
Динамическая электромеханическая характеристика системы в операторной форме:

$$\omega = \frac{(\kappa_O U_{3C} + \kappa_T I_Y + \kappa_C \omega_{OTC}) - [\kappa_T + R_{Я} (T_{Я} p + 1)] I_C}{c \left[ T_M T_{Я} p^2 + T_M \left( 1 + \frac{\kappa_T}{R_{Я}} \right) p + \left( 1 + \frac{\kappa_C}{c} \right) \right]} \quad (9.4)$$

Статическая электромеханическая характеристика:

$$\omega = \frac{\kappa_O U_{3C} + \kappa_T I_Y + \kappa_C \omega_{OTC}}{c + \kappa_C} - \frac{\kappa_T + R_{Я}}{c + \kappa_C} I_{Я} \quad (9.5)$$

Вид статических характеристик при различных значениях сигнала задания  $U_{3C}$ :



Рассмотрим по областям:

I -  $\omega \leq \omega_{OTS}$  и  $I_{я} \leq I_Y$ .  $\kappa_{OC} = 0$  и  $\kappa_{OT} = 0$ , при этом обратные связи отключены и система разомкнута.

II -  $\omega > \omega_{OTS}$ ,  $I_{я} \leq I_Y$  - включена только обратная связь по скорости:  $\kappa_{OC} \neq 0$ .

III -  $\omega > \omega_{OTS}$ ,  $I_{я} > I_Y$  - включены обе обратные связи:  $\kappa_{OC} \neq 0$ ,  $\kappa_{OT} \neq 0$ .

IV -  $\omega \leq \omega_{OTS}$ ,  $I_{я} > I_Y$  - включена только обратная связь по току  $\kappa_{OT} \neq 0$ .

Построение статической характеристики при определенном сигнале задания производится по (9.5) с учетом значений  $\kappa_T$  и  $\kappa_C$  в зависимости от зоны, в которой располагается участок характеристики.

## 8.7. Анализ динамики систем с переменной структурой

Анализ динамики подобных систем производится по участком аппроксимации при контроле за значениями переменных с припасовыванием результатов. Рассмотрим на примере процесса пуска системы, приведенной в разделе 9.6. при максимальном значении сигнала задания  $U_{3C} = U_{3C1}$ . Процесс пуска будет иметь ряд этапов, определяемых нагрузкой и пороговыми значениями НЭ.

**Этап 1.**  $i_{я} \leq I_C$ . Якорь неподвижен и протекает только электромагнитный переходной процесс. Система описывается уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} k_0 U_{3C} &= e_{\Pi} \\ e_{\Pi} &= R_{\text{я}} \left( T_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + 1 \right) \end{aligned} \right\}$$

Начальное значение  $i_{\text{я}}(0) = 0$ . Этап закончится по выполнению условия  $i_{\text{я}} = I_{\text{C}}$ .

**Этап 2.**  $I_{\text{C}} < i_{\text{я}} \leq I_{\text{Y}}$ ,  $\omega < \omega_{\text{отс}}$ . На данном этапе обратные связи отключены, и  $k_{\text{от}} = 0$ ,  $k_{\text{ос}} = 0$ . Система разомкнута и (9.2) преобразуется к виду:

$$\left. \begin{aligned} k_0 U_{3C} &= e_{\Pi} \\ e_{\Pi} &= c\omega + R_{\text{я}} \left( T_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + 1 \right) \\ i &= I_{\text{C}} + \frac{J}{c} \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (9.6)$$

Решая (9.6) относительно скорости и тока, получают дифференциальные уравнения и их аналитические решения. Начальные условия  $i_{\text{я}}(0) = I_{\text{C}}$  и  $\omega(0) = 0$ . Начальные значения производных  $\frac{di_{\text{я}}}{dt}(0)$ ,  $\frac{d\omega}{dt}(0)$  получают по (9.6).

Процесс на данном этапе закончится, когда ток якоря станет равным  $i_{\text{я}} = I_{\text{Y}}$ , а скорость достигнет значения  $\omega_{\text{к2}}$ .

**Этап 3.**  $i_{\text{я}} > I_{\text{Y}}$ ,  $\omega \leq \omega_{\text{отс}}$ . Действует только обратная связь по току:  $k_{\text{от}} \neq 0$ ,  $k_{\text{ос}} = 0$ . Уравнения, описывающие систему:

$$\left. \begin{aligned} k_0 [U_{3C} - k_{\text{от}}(i_{\text{я}} - I_{\text{Y}})] &= e_{\Pi} \\ e_{\Pi} &= c\omega + R_{\text{я}} \left( T_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + i_{\text{я}} \right) \\ i_{\text{я}} &= I_{\text{C}} + \frac{J}{c} \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (9.7)$$

Из (9.7) получают дифференциальные уравнения и аналитические решения для данного этапа. Начальные условия:  $i_{\text{я}}(0) = I_{\text{Y}}$  и  $\omega(0) = \omega_{\text{к2}}$ . Начальные значения производных, как и на предыдущем этапе, получают с помощью исходных уравнений – (9.7).

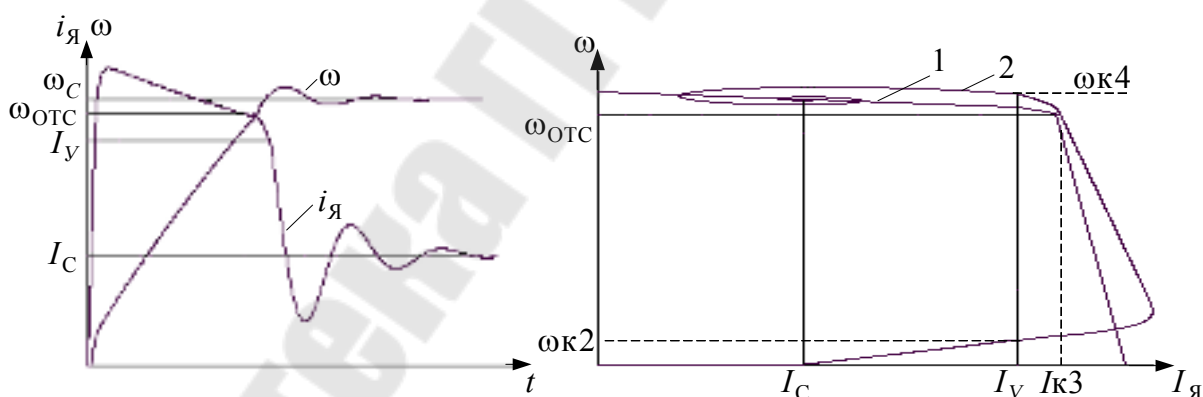
Этап заканчивается по достижению скорости значения  $\omega = \omega_{\text{отс}}$ . Конечное значение тока при этом  $I_{\text{я}} = I_{\text{к3}}$ .

**Этап 4.**  $i_{\text{я}} > I_{\text{у}}$ ,  $\omega > \omega_{\text{отс}}$ . Действуют обе обратные связи, и система описывается (9.2). Также находятся дифференциальные уравнения и их решения. Начальные условия  $i_{\text{я}}(0) = I_{\text{к3}}$ ,  $\omega(0) = \omega_{\text{отс}}$ . Окончание процесса на этапе, когда ток достигает значения  $i_{\text{я}} = I_{\text{у}}$ . Скорость при этом  $\omega = \omega_{\text{к4}}$ .

**Этап 5.**  $i_{\text{я}} \leq I_{\text{у}}$ ,  $\omega > \omega_{\text{отс}}$ . Обратная связь по току отключена и  $k_{\text{от}} = 0$ ,  $k_{\text{ос}} \neq 0$ . Уравнения, описывающие систему:

$$\left. \begin{aligned} k_{\text{о}} [U_{\text{зс}} - k_{\text{ос}} (\omega - \omega_{\text{отс}})] &= e_{\text{п}} \\ e_{\text{п}} &= c\omega + R_{\text{я}} \left( T_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + i_{\text{я}} \right) \\ i_{\text{я}} &= I_{\text{с}} + \frac{J}{c} \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (9.8)$$

Начальные значения для получения аналитических решений  $i_{\text{я}}(0) = I_{\text{у}}$ ,  $\omega(0) = \omega_{\text{к4}}$ . Диаграммы переходного процесса пуска  $i_{\text{я}}(t)$ ,  $\omega(t)$  и механические характеристики (1 – статическая, 2 – динамическая):



При уменьшении сигнала задания статическая характеристика может проходить через II, I и IV области, а количество этапов быть как меньшим, так и большим в зависимости от соотношения параметров системы.

## 8.8. Параметрические способы регулирования скорости АД

Подобные способы реализуются за счет изменения любого из параметров, входящих в выражение механической характеристики. Кроме



них возможны и другие, использующие особенности конструкции АДФР, а также принцип наложения характеристик.

С точки зрения энергетики все способы регулирования делятся на 3 группы.

В первую группу входят способы, при которых скорость и скольжение изменяются в широких пределах, а потери энергии пропорциональные скольжению выделяются в виде теплоты в элементах роторной цепи.

Во вторую группу входят способы, при которых скорость изменяется в широких пределах, но абсолютное скольжение не превышает критическое значение для естественной характеристики ( $s_a < s_K$ ).

К третьей группе относятся способы, при которых скорость и скольжение изменяются в широких пределах, но потери незначительно превышают потери 2-ой группы.

В первую группу входят: реостатное регулирование, регулирование изменением напряжения на статоре, принцип наложения характеристик как в одно- так и в многодвигательных ЭП.

Вторую группу составляют частотное регулирование и регулирование изменением числа пар полюсов.

Способы третьей группы используют особенности конструкции АДФР: за счет введения добавочной ЭДС в цепь ротора избыточная мощность, пропорциональная скольжению, преобразуется и передается в сеть или на вал (каскадные схемы включения АД).

На практике наиболее распространены: реостатное регулирование, изменение числа пар полюсов, частотное регулирование и изменение напряжения. Достаточно часто для расширения диапазона применяют комбинацию из двух способов (частотное регулирование с изменением числа пар полюсов, изменение напряжения при введенном добавочном сопротивлении в цепь ротора).

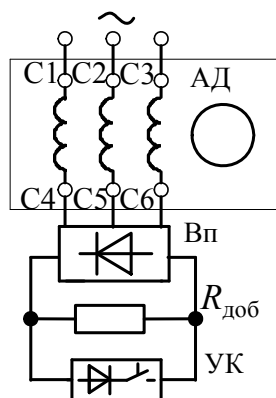
### **8.9. Особенности реализации способов регулирования скорости АД**

Для разомкнутых ЭП применяют реостатное регулирование, изменение числа пар полюсов, частотное регулирование, изменение напряжения на обмотке статора.

Автоматическое реостатное регулирование может быть реализовано с плавным изменением сопротивления при импульсном управлении в цепи выпрямленного тока статора или ротора.

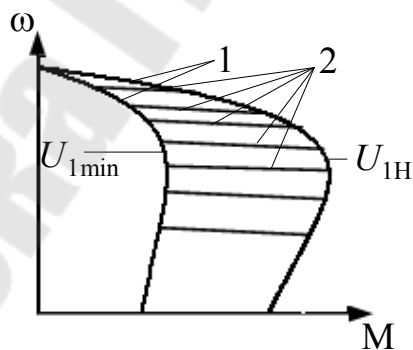
Первый вариант используется для подрегулировки скорости на несколько процентов (например, в групповом ЭП конвейеров с целью выравнивания нагрузки приводных станций). Применение в системе

управления ОС по току с отсечкой позволяет обеспечить плавный пуск конвейера. Упрощенная схема силовой части ЭП:



При широком диапазоне регулирования и жестких характеристиках применяется автоматическое реостатное регулирование с управлением сопротивлением в цепи выпрямленного тока ротора. При отсутствии тахогенератора используется отрицательная обратная связь по ЭДС ротора. Регулирование момента и ускорения в переходных процессах реализуется с помощью отрицательной обратной связи по току ротора.

Регулирование изменением напряжения на обмотке статора  $U_1$  в разомкнутом ЭП производится до критической скорости  $\omega_K = \omega_0(1 - s_K)$ . Использование отрицательной ОС по скорости позволяет расширить диапазон, но допустимая нагрузка резко уменьшается. Статические характеристики при крайних значениях сигнала задания скорости АД (1) и замкнутой системы ЭП с отрицательной ОС (2):



Со снижением напряжения уменьшается магнитный поток и для получения требуемого момента ток ротора возрастает. Поэтому снижение скорости ниже критического значения допустимо лишь кратковременно. Такие системы достаточно эффективны для машин центробежного типа, у которых  $M_C$  пропорционален квадрату скорости.

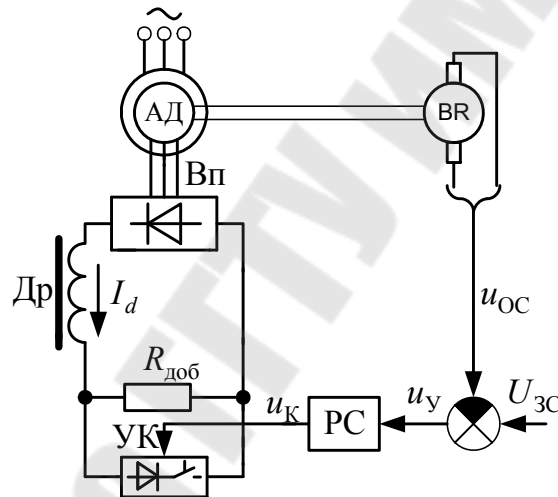
Добавляя САУ отрицательной обратной связи по току с отсечкой можно обеспечить при пуске и торможении ограничение токов, потерь,

ускорения или рывка, что необходимо в подъемно-транспортных машинах.

Для получения низких скоростей при позиционировании, когда диапазон достигает  $D_{\omega} \leq 100$ , можно использовать НПЧ, которые осуществляют частотное регулирование при малых частотах. Расширение диапазона производят за счет двухскоростных ЭД.

### 8.10. Автоматическое реостатное регулирование скорости АД

При широком диапазоне регулирования применяется управление сопротивлением в цепи выпрямленного тока ротора. Для получения жестких характеристик используют отрицательную ОС по скорости или, при отсутствии ТГ, отрицательную ОС по ЭДС ротора. Регулирование момента и ускорения при пуске и торможении обеспечивается отрицательной ОС по току ротора. Схема:



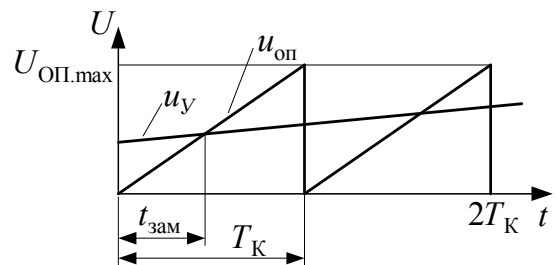
На схеме: Др –сглаживающий дроссель, УК – управляемый ключ, РС – регулятор скорости.

Если пренебречь сопротивлением дросселя, то эквивалентное сопротивление вводимое в цепь ротора  $R_{\Sigma}$  для схемы замещения АД составляет половину сопротивления цепи постоянного тока. В качестве РС используется ШИМ, который совместно с УК составляет широтно-импульсный преобразователь (ШИП) сопротивления.

Работа ключа характеризуется скважностью замкнутого состояния:

$$\gamma = \frac{t_{\text{зам}}}{T_{\text{К}}} = 0 \dots 1,$$

где:  $T_{\text{К}}$  - период коммутации УК,  $t_{\text{зам}}$  – время замкнутого состояния ключа.



Используя в качестве модулирующего, опорного, сигнала в ШИМ линейное напряжение можно записать:

$$t_{\text{зам}} = \frac{T_K u_y}{U_{\text{ОП max}}}, \text{ а}$$

$$\gamma = \frac{u_y}{U_{\text{ОП max}}} = \frac{1}{U_{\text{ОП max}}} (U_{\text{ЗС}} - K_{\text{ОС}} \omega).$$

Теперь вводимое в цепь ротора сопротивление:

$$R_{\text{Э}} = 0.5(1 - \gamma)R_{\text{доб}} = 0.5 \left( 1 - \frac{U_{\text{ЗС}}}{U_{\text{ОП max}}} + \frac{K_{\text{ОС}}}{U_{\text{ОП max}}} \omega \right) R_{\text{доб}} \quad (9.9)$$

Приняв, что АД работает на линейном участке искусственных механических характеристик с модулем жесткости  $\beta_{\text{И}} = \frac{2M_K}{\omega_0 s_{\text{КИ}}}$ :

$$\omega = \omega_0 - \frac{M}{\beta} = \omega_0 - \frac{M\omega_0}{2M_K} s_{\text{КИ}} \quad (9.10)$$

Зависимость критического скольжения искусственных характеристик  $s_{\text{КИ}}$  от сопротивления роторной цепи:

$$\frac{s_{\text{КИ}}}{R_{\text{Э}} + R_2} = \frac{s_{\text{КЕ}}}{R_2} \text{ или } s_{\text{КИ}} = s_{\text{КЕ}} \left( 1 + \frac{R_{\text{Э}}}{R_2} \right), \quad (9.11)$$

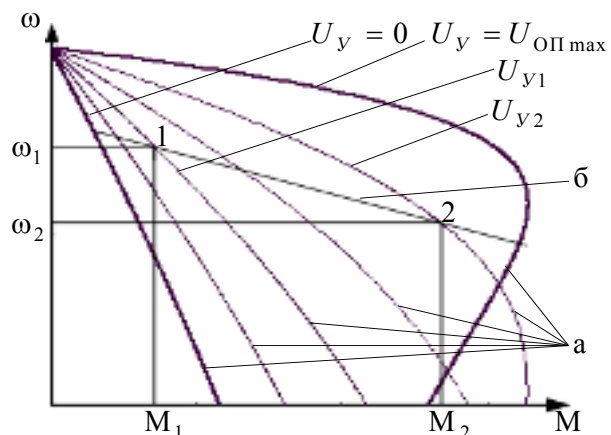
где:  $s_{\text{КЕ}}$  - критическое скольжение естественной характеристики.

Теперь решая совместно (9.9), (9.10) и (9.11) можно получить уравнение механической характеристики. Однако использовать его для определения  $K_{\text{ОС}}$  весьма затруднительно, так как в него входит нелинейность типа  $M \times \omega$ . Поэтому определение коэффициентов передачи обратной связи и промежуточного усилителя на входе ШИМ обычно проводят графическим методом:

1. Строятся характеристики АД в разомкнутой системе при разных значениях  $U_y$  (на графике это характеристики – **а**).

2. По требуемой точности регулирования или статизму строят характеристику замкнутого ЭП (**б**).

3. Исходя из данных, полученных для двух точек



пересечения характеристик АД и системы, например точек 1 и 2, на основании (9.10) составляют систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_{y1} &= U_{3c1} - k_{oc}\omega_1 && \text{при } \gamma_1 \\ U_{y2} &= U_{3c1} - k_{oc}\omega_2 && \text{при } \gamma_2 \end{aligned} \right\}$$

по которой и определяют  $U_{3c}$  и  $k_{oc}$ .

Для исключения тахогенератора можно сформировать сигнал обратной связи по ЭДС ротора (положительная связь по току ротора и отрицательная по напряжению).

### 8.11. Законы частотного регулирования

1. Закон М.П.Костенко. Он получен без учета падения напряжения на обмотке статоре и возможного насыщения магнитной цепи:

$$\frac{U_1}{U_{1H}} = \frac{f_1}{f_{1H}} \sqrt{\frac{M}{M_H}}$$

или в относительных единицах

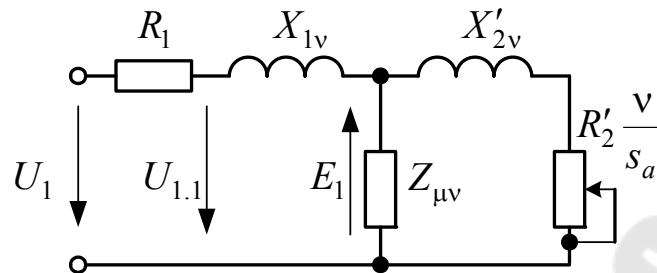
$$\gamma = v\sqrt{\mu}.$$

Условие работы в подобном режиме М.П. Костенко формулирует следующим образом: если сконструирован двигатель для номинальных значений напряжения  $U_{1H}$  и частоты  $f_{1H}$  с номинальным моментом  $M_H$ , а затем при каком-то текущем моменте  $M$  изменить напряжение и частоту при выполнении указанного условия, то он будет работать с примерно постоянными коэффициентом мощности ( $\cos \varphi$ ), перегрузочной способности ( $\lambda$ ) и скольжении ( $s_a$ ), а его КПД будет зависеть от частоты ( $v$ ) и практически не будет зависеть от момента, если насыщение магнитной цепи невелико. Диапазон регулирования скорости при таком законе ограничен с одной стороны увеличением соотношения  $\gamma/v$ , что приводит к насыщению магнитной системы, с другой стороны, - значением статического момента.

2. Номинальный закон. Этот закон предусматривает пропорциональное изменение напряжения и частоты:  $\frac{U_1}{f_1} = const$ . При

уменьшении  $v$  от 1 до 0.5 критический момент изменяется незначительно, а при дальнейшем уменьшении характеристики резко ухудшаются. Это происходит из-за уменьшения магнитного потока, вследствие падения напряжения на обмотке статора. Для исключения данного недостатка используют  $IR$  – или  $IZ$  – компенсацию (последующие законы).

3. Закон постоянства полного потока  $\psi_1 = const$ . При этом законе компенсируется падение напряжения на активном сопротивлении статора (метод  $IR$  – компенсации). Схема замещения фазы двигателя:



В соответствии со схемой закон можно записать:

$$\frac{U_{1.1}}{f_1} = const.$$

Недостатком этого способа является уменьшение рабочего потока в воздушном зазоре при увеличении нагрузки за счет увеличения падения напряжения на индуктивном сопротивлении  $X_1$ , которое учитывает поток рассеяния обмотки статора.

4 Закон постоянства рабочего потока:  $\psi_\mu = const$  (метод  $IZ$ –компенсации). Если представить  $\bar{E}_1 = \bar{U}_1 - \bar{I}_1 Z_1$ , то получим, что

$$\frac{E_1}{f_1} = const.$$

Имея сигнал ОС по ЭДС статора можно реализовать частотный ЭП без функциональных преобразователей.

Недостатком способа является увеличение напряжения на статоре с ростом нагрузки.

5. Закон постоянства абсолютного скольжения:  $s_a = const$ . Если регулировать напряжение  $U_1$ , что бы при любой частоте  $f_1$  абсолютное скольжение оставалось неизменным, то режим работы АД близок к режиму при законе М.П. Костенко. Причем, проще измерять абсолютное скольжение, чем момент. Абсолютное скольжение определяется как

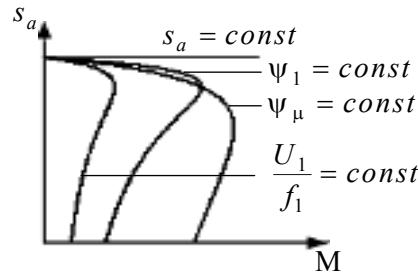
$$s_a = \frac{\omega_{0И} - \omega_{И}}{\omega_{0Н}} = v - \frac{\omega_{И}}{\omega_{0Н}}, \text{ т.е. требуются сигналы управления частотой и}$$

ОС по скорости. Если учесть, что частота тока ротора

$$f_2 = \frac{p_d}{2\pi} (\omega_{0И} - \omega_{И}), \text{ то закон можно сформулировать и так:}$$

$$f_2 = const.$$

Характеристики при разных законах для одинаковой частоты  $f_1 < f_{1H}$ :



6. Управление частотой при номинальном напряжении  $U_{1H}$ . Он применяется для расширения диапазона регулирования скорости вверх от естественной характеристики. Критический момент уменьшается обратно пропорционально квадрату частоты. Для улучшения характеристик может использоваться закон  $\gamma = \sqrt{v}$ , т.е.  $\frac{U_1^2}{f_1} = const$ . Допустимый по нагреву

момент уменьшается, но и будет уменьшаться допустимая мощность из-за падения напряжения на обмотке статора. Если это компенсировать, то можно получить регулирование при постоянстве мощности, аналогично 2-ой зоне для ЭП постоянного тока. Но требуется завышение мощности преобразователя, поскольку его выходное напряжение должно быть больше номинального значения.

## 8.12. Особенности построения частотных ЭП

Они вызваны, во-первых, отсутствием отдельного канала управления магнитным потоком и, во-вторых, трудностью или невозможностью измерять отдельные координаты АД. Поэтому для управления потоком и моментом используют положительные ОС для компенсации различных возмущений и косвенные методы измерения. Возможны следующие ситуации:

А. К переходным процессам пуска, торможения и реверса не предъявляются высокие требования к динамическим показателям. В этом случае канал регулирования потоком реализуется по отклонению в 2х вариантах:

1. Непосредственно измеряют магнитный поток в воздушном зазоре АД с помощью датчика Холла.
2. Используют косвенное измерение потока с решением векторного уравнения электрического равновесия для статора в осях ХУ:

$$\bar{u}_1 = R_1 \bar{i}_1 + \frac{d\bar{\psi}_1}{dt} + j\omega_{0эл} \bar{\psi}_1.$$

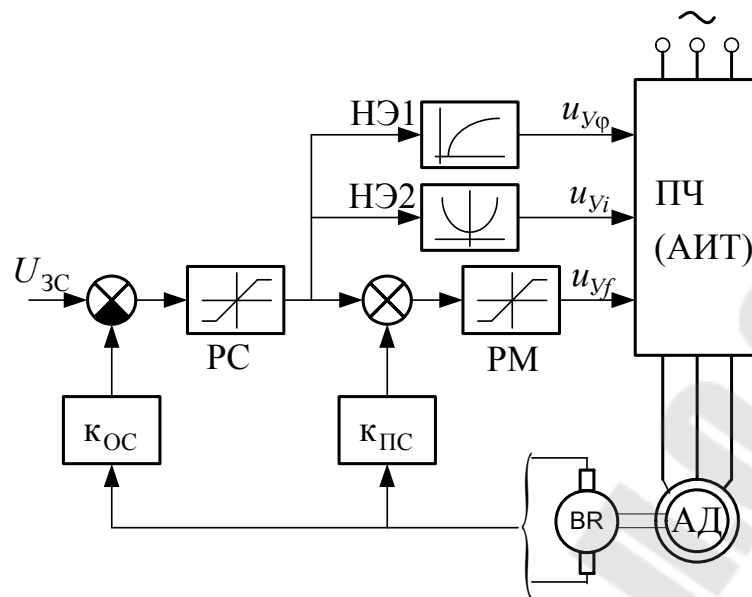
С учетом, что  $\bar{\psi}_1 = (L_1 - L_{12})\bar{i}_1 + L_{12}\bar{i}_\mu$  имеем:

$$\bar{u}_1 = \bar{i}_1 [R_1 + j\omega_{0эл}(L_1 - L_{12})] + (L_1 - L_{12}) \frac{d\bar{i}_1}{dt} + L_{12} \frac{d\bar{i}_\mu}{dt} + j\omega_{0эл} L_{12} \bar{i}_\mu \quad (9.12)$$

Приведенное уравнение электрического равновесия для статора (9.12) показывает взаимосвязь между током намагничивания  $\bar{i}_\mu$  или рабочим потоком и напряжением и током статора. Решение данного уравнения в динамике затруднено из-за несимметрии напряжения и токов по фазам и произведения переменных. Поэтому приближенно считают, что при работе системы автоматического регулирования, поток и ток намагничивания неизменны, а производная по току намагничивания равна 0 ( $\Phi, \bar{i}_\mu = const; \frac{d\bar{i}_\mu}{dt} = 0$ ). Теперь, измеряя напряжение и токи 2-х фаз вычислительное устройство (наблюдатель) рассчитывает амплитуду и фазу  $\bar{i}_\mu$  (или рабочего потока) для формирования сигнала ОС по потоку в канал управления моментом, в котором формируются управляющие воздействия для напряжения или тока статора.

**Б.** К ЭП предъявляются жесткие требования по переходным процессам. Для их выполнения контур регулирования скорости должен содержать подчиненный контур регулирования момента. В простейшем варианте может быть использована компенсационная система с положительной ОС по скорости при частотно-токовом регулировании АД. Упрощенная схема:





$K_{ПС}$ ,  $K_{OC}$  – коэффициенты передачи соответственно положительной и отрицательной связей по скорости;  $u_{yφ}$ ,  $u_{yi}$  – напряжения управления фазой и током для поддержания  $\bar{\psi}_2 = const$ ;  $u_{yf}$  – напряжения управления частотой; РМ – регулятор момента; НЭ1 – нелинейный элемент, который реализует зависимость фазы тока от абсолютной скольжения:

$$\varphi_1(s_a) = \arctg \frac{i_{1Y}}{i_{1X}} = \arctg \frac{L_2 \omega_{0эл.н} \cdot s_a}{R_2'};$$

НЭ2 –реализует зависимость амплитуды тока статора от абсолютного скольжения:

$$I_{1m}(s_a) = \frac{\psi_2}{L_{12}} \sqrt{1 + \left( \frac{L_2' \omega_{0эл.н} \cdot s_a}{R_2'} \right)^2}.$$

И когда  $\bar{\psi}_2 = const$ , то вектор тока  $\bar{i}_1 = I_{1m} \cdot e^{j(\omega_{0эл}t + \varphi_1)}$ .

При таком управлении магнитный поток в зазоре постоянный ( $\Phi_\mu = const$ ) и можно воспользоваться линеаризованной механической характеристикой:

$$M(T_\Omega p + 1) = \beta_C (\omega_0 - \omega).$$

При питании от источника напряжения, электромагнитная постоянная АД находится, как  $T_\Omega = \frac{L_{1\sigma} + L_{2\sigma}'}{R_2'}$  и может принимать

значение 6...60 мс, а при питании от источника тока определяется:

$$T_{\Theta} = \frac{L_{12} + L_{2\sigma}}{R_2'} \text{ и будет на порядок больше.}$$

Канал управления частоты в контуре регулирования момента описывается уравнением:

$$\omega_0 = k_{PM} k'_{yf} (u_{3M} + k_{PC} \omega),$$

где:  $k_{PM}$  - коэффициент усиления регулятора момента.

Теперь линеаризованная механическая характеристика может быть представлена, как:

$$M(T_{\Theta} p + 1) = \beta_C k_{PM} k'_{yf} u_{3M} - (1 - k_{PM} k'_{yf} k_{PC}) \beta_C \omega.$$

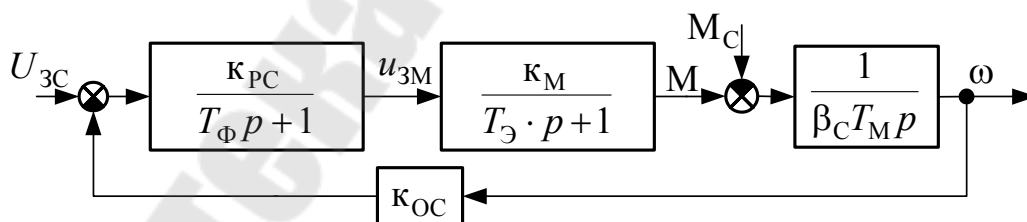
Для получения абсолютно мягких характеристик необходимо, чтобы ОС по скорости имела критическое значение  $k_{KM} k_{PCcr} = 1/k'_{yf}$ . В этом случае момент двигателя будет определяться, как:

$$M = \frac{k_{PM} k'_{yf}}{(T_{\Theta} p + 1)} u_{3M} = \frac{k_M}{(T_{\Theta} p + 1)} u_{3M},$$

а коэффициент передачи контура момента в контуре регулирования скорости:

$$k_M = \beta_C k_{PM} k'_{yf}.$$

Теперь структурная схема контура регулирования скорости будет выглядеть следующим образом:



В ПФ регулятора скорости учтена малая постоянная времени фильтра  $T_{\Phi}$  цепи отрицательной ОС по скорости.

В соответствии со схемой операторное уравнение механической характеристики запишется:

$$M(T_{\Theta} p + 1)(T_{\Phi} p + 1) = k_{PC} k_M U_{3C} - k_{PC} k_M k_{OC} \omega.$$

Уравнение статической характеристики:

$$\omega = \frac{U_{3C}}{K_{OC}} - \frac{M}{K_{PC}K_MK_{OC}}.$$

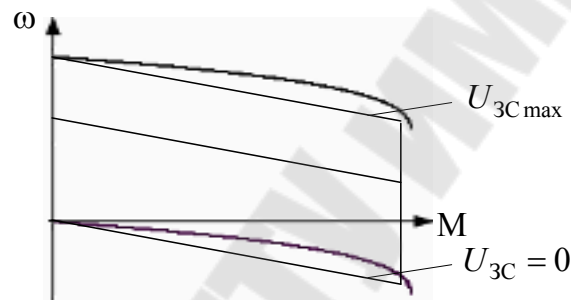
Модуль жесткости механической характеристики замкнутой системы

$$\beta_{ЗАМ} = K_{PC}K_MK_{OC}.$$

Значение модуля жесткости должно быть ограничено из-за динамических показателей. Если отнести  $T_{Э}$  и  $T_{Ф}$  к малой постоянной времени  $T_{\mu}$  и оптимизировать контур на оптимум по модулю, то регулятор скорости будет иметь коэффициент усиления:

$$K_{PC} = \frac{\beta_C T_{\mu}}{2T_{\mu} K_M K_{OC}},$$

а механические характеристики:



Для ЭП малой и средней мощности  $T_{\mu}$  принимает достаточно малое значение и в результате характеристики получаются мягкими. Поэтому для повышения точности используют настройку на симметричный оптимум.

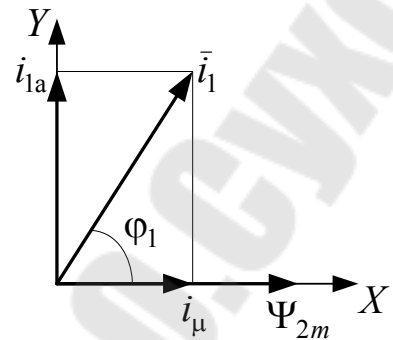
Компенсация возмущения не дает достаточно высокую точность из-за изменения параметров двигателя при колебаниях нагрузки или напряжения сети. Поэтому при жестких требованиях используют как компенсацию возмущения, так и регулирование по отклонению.

### 8.13. Частотное регулирование скорости АД с векторным принципом управления

Математический аппарат координатных и фазных преобразований, используемый для обобщенной машины, позволяет анализировать процессы в АД. Кроме того, его применяют для построения алгоритмов функционирования систем частотного регулирования скорости ЭП. В частности, он является основой для построения систем использующих принцип ориентации по магнитному полю.

Предположим, что при создании САР допускается измерять текущее значение вектора  $\bar{\psi}_2$  (его модуля, фазы и скорости). Координатную

систему  $XU$ , вращающуюся со скоростью  $\omega_k = \omega_{0эл}$ , можно совместить с направлением вектора  $\bar{\Psi}_2 = \Psi_{2m} \cdot e^{j\omega_{0эл}t}$  таким образом, что бы  $\Psi_{2X} = \Psi_{2m}$  и  $\Psi_{2Y} = 0$ . При этом вектор тока статора  $\bar{i}_1$  будет ориентирован относительно вектора потокосцепления углом сдвига фазы  $\varphi_1$ , т.е.:  $\bar{i}_1 = I_{1m} \cdot e^{j(\omega_{0эл}t + \varphi_1)}$ . Его проекция на ось  $X$  дает мгновенное значение тока намагничивания  $i_{1X} = i_\mu$ , а на ось  $Y$  – активную составляющую тока статора  $i_{1Y} = i_{1a}$ :



Основой для вычисления текущих значений переменных служат уравнения механической характеристики в осях  $XU$  с учетом ориентации по полю:

$$\left. \begin{aligned} u_{1X} &= R_1 i_{1X} + p\Psi_{1X} - \omega_{0эл} \Psi_{1Y} \\ u_{1Y} &= R_1 i_{1Y} + p\Psi_{1Y} + \omega_{0эл} \Psi_{1X} \\ 0 &= R'_2 i'_{2X} + p\Psi_{2m} \\ 0 &= R'_2 i'_{2Y} + (\omega_{0эл} - \omega_{эл}) \Psi_{2m} \\ M &= p_d \frac{L_{12}}{L_2} \Psi_{2m} i_{1Y} \end{aligned} \right\} \quad (9.13)$$

Учитывая выражения для потокосцепления, представляя электромагнитные постоянные времени

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1}, \quad T_{1\sigma} = \frac{L_1 L_2 - L_{12}^2}{L_2 R_1}, \quad T_2 = \frac{L_2}{R'_2}$$

и модуль жесткости  $\beta = p_d^2 \frac{\Psi_{2m}}{R'_2}$ , (9.13) преобразуются к виду:

$$\left. \begin{aligned} u_{1X} &= R_1 [(T_1 p + 1) i_{1X} - T_{1\sigma} \omega_{0эл} i_{1Y}] \\ u_{1Y} &= R_1 [(T_{1\sigma} p + 1) i_{1Y} + T_1 \omega_{0эл} i_{1X}] \\ i_{1X} &= (T_2 p + 1) \Psi_{2m} / L_{12} \\ M &= \beta (\omega_0 - \omega) \end{aligned} \right\} \quad (9.14)$$

По представленным выражениям видно, что для регулирования потокосцепления ротора необходимо изменять  $i_{1X}$ , а для момента -  $i_{1Y}$ .

Однако при этом проявляется электромагнитная инерционность, характеризуемая большими постоянными времени  $T_1$ ,  $T_2$ .

Используя ориентацию осей координат по векторам  $\bar{\Psi}_1$  или  $\bar{\Psi}_\mu$ , можно получить соответствующие выражения.

При обеспечении САР условия  $\psi_{2m} = \Psi_{2m} = const$  (9.14) записывается, как:

$$\left. \begin{aligned} u_{1X} &= R_1(i_{1X} - T_{1\sigma}\omega_{0эл}i_{1Y}) \\ u_{1Y} &= R_1[(T_{1\sigma}p + 1)i_{1Y} + T_1\omega_{0эл}i_{1X}] \\ M &= p_d \frac{L_{12}\Psi_{2m}}{L_2} i_{1Y} \end{aligned} \right\}$$

и при этом электромагнитная инерционность характеризуется только малой постоянной  $T_{1\sigma}$ , которая проявляется только при питании АД от источника напряжения. Когда в ПЧ используется АИТ, то двигатель представляется безинерционным звеном.

Таким образом, если оперировать в цепях управления не реальными переменными, а преобразованными к координатной системе  $XU$  ориентированной полю, то можно управлять магнитным потоком и электромагнитным моментом с помощью соответствующих проекций векторов тока или напряжения. Причем используются сигналы постоянного тока, а не переменного, что позволяет строить и синтезировать САР аналогично системам управления ДПТ.

Для реализации подобных систем с управлением по отклонению необходимо измерение токов статора и магнитного потока в воздушном зазоре (с помощью датчика Холла), преобразование 3-х фазных переменных в 2-х фазные, ориентированные по полю. После их обработки регуляторами, с полученными управляющими воздействиями провести обратные преобразования.

### **8.14. Каскадные схемы регулирования скорости асинхронных электроприводов**

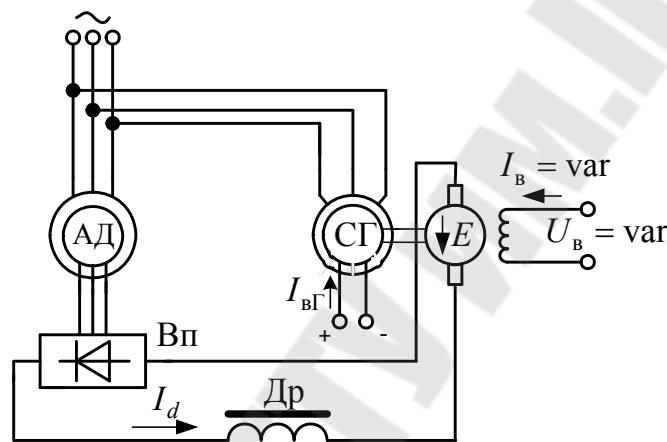
Основным недостатком параметрических способов регулирования скорости при  $\omega_0 = const$  является увеличение потерь мощности пропорционально скольжению  $\Delta p_2 = M\omega_0 s$  с расширением диапазона регулирования. Для АДФР исключить этот недостаток можно введя в цепь ротора реверсивный источник с регулируемой ЭДС, с помощью которого энергию скольжения преобразовывать в электрическую и отдавать ее в

сеть (электрический каскад), или в полезную механическую энергию с передачей на вал (электромеханический каскад).

При увеличении добавочной ЭДС, включенной встречно с ЭДС ротора, уменьшаются ток ротора и электромагнитный момент. Ротор начинает замедляться, а скольжение и ЭДС  $E_{d0}s$  возрастают. При этом восстанавливаются ток и момент. В результате установившийся режим будет достигнут при меньшей скорости. При использовании статистического преобразователя, для получения добавочной ЭДС каскад называют вентильным. При использовании электромашинного преобразователя – машинно-вентильным.

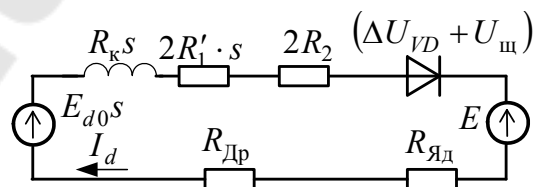
### Электрический машинно-вентильный каскад.

Упрощенная схема:



Для рекуперации энергии скольжения используется электромашинный агрегат, состоящий из ДПТ НВ и синхронного генератора СГ. Через ВП энергия подводится к якорю ДПТ, который создает вращающий момент заставляя работать синхронную машину в режиме генератора. Токи возбуждения  $I_{в}$  и  $I_{вГ}$  регулируются вручную или автоматически. ЭДС ДПТ, включенную через Вп встречно с ЭДС ротора, за счет тока возбуждения можно изменять от 0 до  $E_H$ .

Схема замещения цепи выпрямленного тока ротора:



На схеме:  $E_{d0}$  – выпрямленная ЭДС ротора при  $s=1$ ;  $E = k\Phi\omega_d$  – ЭДС вращения ДПТ;  $\omega_{0Г} = \omega_d$  – синхронная скорость СГ, определяемая частотой сети;  $R_k = \frac{X'_1 + X_2}{2\pi} m$  – коммутационное сопротивление Вп;

$R_2, X_2, R'_1, X'_1$  - параметры фазных обмоток соответственно ротора и приведенные статора;  $(\Delta U_{VD} + U_{ш})$  - падения напряжения на вентилях и щеточных контактов машин.

Суммарная противо-ЭДС, включенная в цепь  $E_{\Sigma} = E + (\Delta U_{VD} + U_{ш})$ . Эквивалентное сопротивление цепи  $R_{\Sigma} = (R_k + 2R'_1)s + 2R_2 + R_{др}$ . Выпрямленный ток ротора  $I_d = \frac{E_{d0}s - E_{\Sigma}}{R_{\Sigma}(s)}$  на холостом ходу при  $E_{\Sigma} \neq 0$  можно получить равным 0

при скольжении  $s_0$ , если выполняется равенство  $E_{d0}s_0 = E_{\Sigma}$ . Откуда:  $s_0 = \frac{k\Phi\omega_d + (\Delta U_{VD} + U_{ш})}{R_{\Sigma}(s)}$ , а скорость идеального холостого хода на

искусственной характеристике  $\omega_{0И} = \omega_0(1 - s_0)$ , или:

$$\omega_{0И} = \omega_0(1 - s_0) = \omega_0 \left[ 1 - \frac{k\Phi\omega_d + (\Delta U_{VD} + U_{ш})}{R_{\Sigma}(s)} \right]$$

Таким образом, управляя током возбуждения и магнитным потоком ДПТ можно получать искусственные характеристики АД с изменением скорости идеального холостого хода. Полное выражение механической характеристики можно получить на основании мощность отдаваемой в роторную цепь (мощность скольжения  $P_S$ ):

$$P_S = E_{d0}sI_d - R_k s I_d^2.$$

При скольжении  $s_0$  выпрямленный ток  $I_{d0} = \frac{E_{d0}(s_0 - s)}{R_{\Sigma}(s)}$ . Теперь

передаваемая мощность определяется:

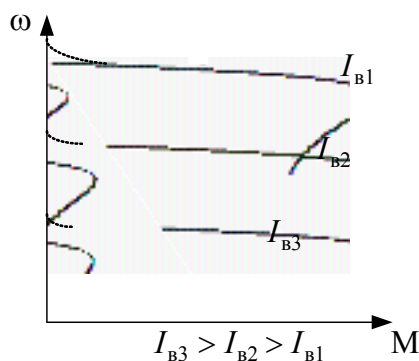
$$P = E_{d0}^2 \left[ \frac{s(s_0 - s)}{R_{\Sigma}} - \frac{R_k s (s_0 - s)^2}{R_{\Sigma}^2} \right] = E_{d0}^2 \frac{R_{\Sigma 0}}{R_{\Sigma}(s)} (s_0 - s)s,$$

где:  $R_{\Sigma 0}$  - эквивалентное сопротивление цепи при  $s_0$ .

С другой стороны  $P_S = M\omega_0 s$ . В результате:

$$M = \frac{E_{d0}^2}{\omega_0} \cdot \frac{R_{\Sigma}(s_0)}{R_{\Sigma}^2(s)} (s - s_0).$$

Характеристики при различных значениях тока возбуждения ДПТ:

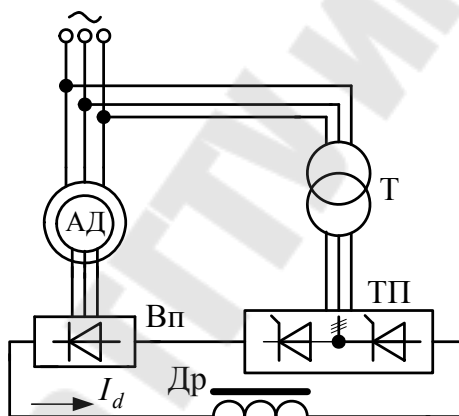


Учитывая режим прерывистого тока, реальные характеристики в зоне малых нагрузок более мягкие (-----).

Недостатки данной схемы заключаются в 2-х ступенях преобразования энергии. Но использование СГ позволяет улучшить работу сети. Целесообразно применять данный каскад при средних и больших мощностях.

### Асинхронно-вентильный каскад (АВК).

Упрощенная схема:



На схеме: ТП – тиристорный преобразователь, работающий в режиме инвертора; Т – трансформатор для согласования ЭДС ротора и напряжения сети.

Характеристики данного каскада аналогичны характеристикам машинно-вентильного каскада, но имеют меньшую жесткость из-за большего значения внутреннего сопротивления ТП по сравнению с сопротивлением ДПТ.

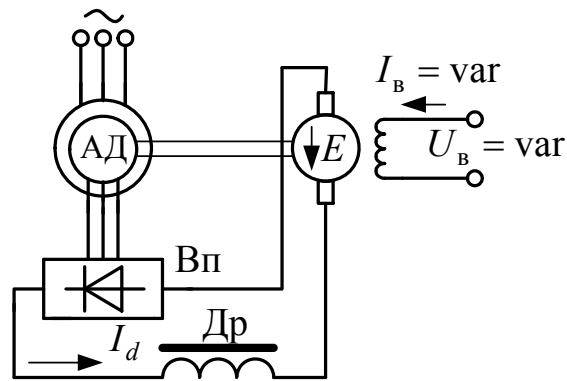
При малых значениях скольжения в режиме прерывистого тока возможно появления сквозных токов через инвертор и выпрямитель, минуя цепь ротора.

Применяется данный каскад для приводов малых и средних мощностей. Для земснарядов выпускаются комплекты АВК на мощность от нескольких сотен кВт до 2,2 МВт.

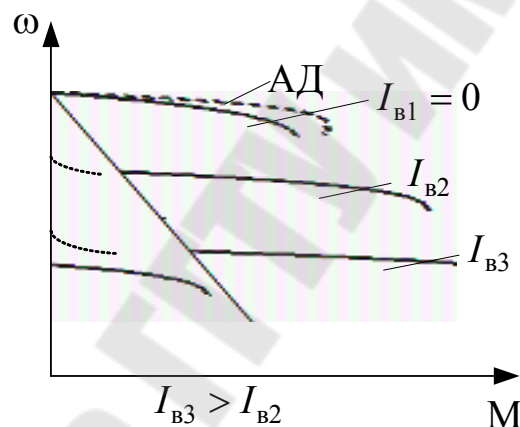
### Электромеханический каскад.

Упрощенная схема:





Принцип регулирования скорости такой же, как и у машинно-вентильного каскада и работа АД описывается теми же соотношениями. Но энергия скольжения после преобразования не отдается в сеть а возвращается на вал. Суммарный момент ЭП состоит из моментов АД и ДПТ. В результате закон регулирования близок к закону  $P=const$ . Естественная механическая характеристика АД и характеристики каскада при разных значениях тока возбуждения ДПТ:



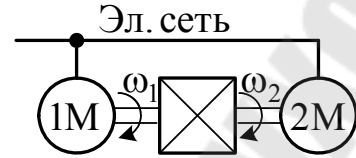
### 8.15. Многодвигательный электропривод. Особенности и выравнивание нагрузки

Применение многодвигательной электромеханической системы вызвано ее преимуществами:

1. С увеличением числа валопроводов уменьшается их нагрузка и облегчается механическая передача.
2. Уменьшается суммарный момент инерции, приведенный к скорости ЭД.
3. Обеспечиваются более равномерные усилия в исполнительном механизме.

Используется подобный ЭП для валков прокатных станов, для механизмов кранов и крупных экскаваторов, для конвейеров и др. рабочих машин.

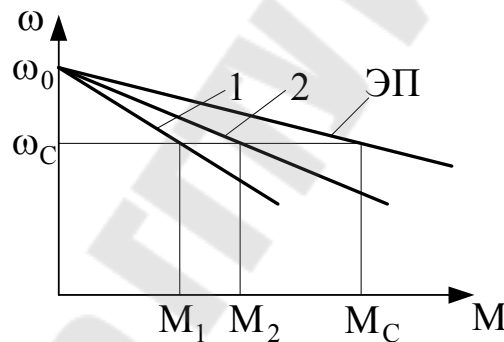
Одна из проблем многодвигательных ЭП заключается в выравнивании нагрузки между ЭД и, соответственно, между валопроводами в статических и динамических режимах. Рассмотрим распределение и способы выравнивания нагрузки на примере 2-х двигательного ЭП.



Из-за механической связи в статическом режиме скорости ЭД равны  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ , а моменты  $M_1 + M_2 = M_C$ . В общем случае, даже при одинаковых типоразмерах двигателей скорости идеального холостого хода  $\omega_{01} \neq \omega_{02}$  и модули жесткостей характеристик  $\beta_1 \neq \beta_2$ . Суммарная характеристика ЭП может быть записана, как:  $M_C = M = \beta_1(\omega_{01} - \omega) + \beta_2(\omega_{02} - \omega)$  и результирующая:

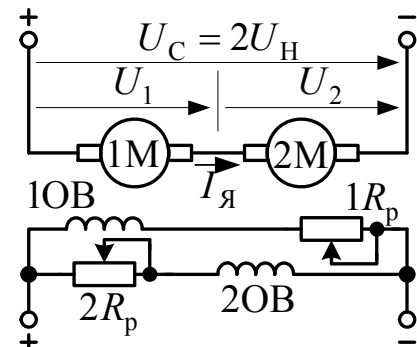
$$\omega = \frac{\beta_1 \omega_{01} + \beta_2 \omega_{02}}{\beta_1 + \beta_2} + \frac{M}{\beta_1 + \beta_2}.$$

Для АД синхронные скорости  $\omega_{01} = \omega_{02}$  и при условии  $\beta_1 < \beta_2$  рабочие участки характеристик будут иметь вид:



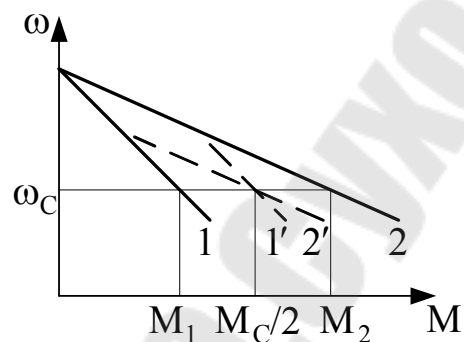
Нагрузка между ЭД распределится пропорционально модулям жесткости  $M_1 < M_2$ . Причем, чем выше среднее значение  $\beta$ , тем большее расхождение между значениями моментов. Поэтому при выборе АДКЗ желательно использовать ЭД с повышенным скольжением (например, серии 4АС...). Для АДФР можно добиться идентичности характеристик и равенства моментов за счет добавочных сопротивлений в роторных цепях.

У ДПТ кроме неравенства  $\beta_1 \neq \beta_2$  обычно различны и  $\omega_{01} \neq \omega_{02}$ . Поэтому при параллельном включении якорных цепей, кроме добавочных сопротивлений, требуется подрегулировка магнитных потоков для обеспечения равенства  $k\Phi_1 = k\Phi_2 = k\Phi$ . Для облегчения решения задачи и уменьшения потерь применяют последовательное



включение якорных цепей на двойное номинальное напряжение.

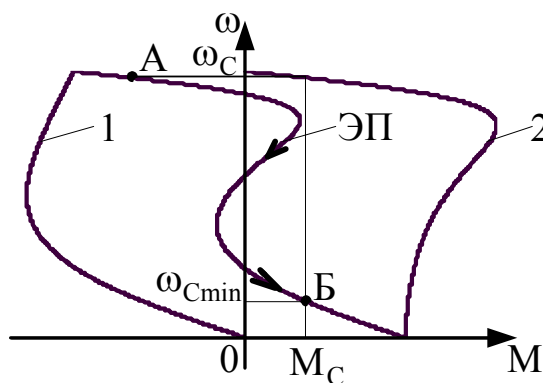
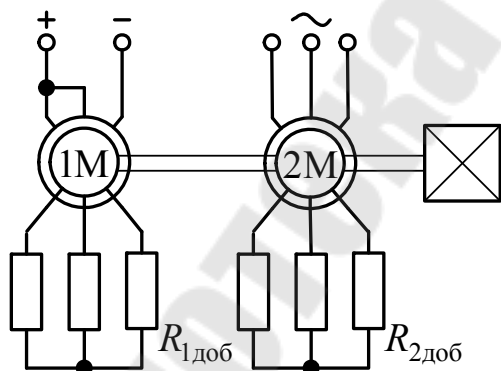
При равенстве магнитных потоков обеспечивается равенство моментов:  $M_1 = k\Phi_1 I_{я} = M_2 = k\Phi_2 I_{я}$ , но при этом неравномерно распределяются напряжения:  $U_1 = k\Phi\omega + I_{я}R_{яд1}$  и  $U_2 = k\Phi\omega + I_{я}R_{яд2}$ . Если  $R_{яд1} > R_{яд2}$ , то  $U_1 > U_2$ , что соответствует смещению характеристик 1-го ЭД вверх и 2-го вниз.



### 8.16. Регулирование скорости многодвигательного ЭП

С точки зрения выравнивания нагрузки предпочтительным является реостатное регулирование. При питании ЭД от одного УП с регулированием напряжением ДПТ их якорные цепи включаются параллельно, а для АД с частотным регулированием параллельно включаются обмотки статора. Для выравнивания нагрузки и улучшения динамики необходимо обеспечить идентичные характеристики и одинаковые значения постоянных времени. Это наиболее просто достигается за счет сопротивлений.

Для получения низких скоростей при позиционировании, если позволяет перегрузочная способность, применяют принцип наложения характеристик. В многодвигательном ЭП это решается обеспечением разных режимов ЭД. К примеру, для асинхронного ЭП схемная реализация и механические характеристики:



Первый ЭД переводится в режим динамического торможения. И по суммарной характеристике ЭП происходит снижение скорости от значения  $\omega_C$  в точке А до  $\omega_{Cmin}$  в точке Б. Результирующая характеристика обладает достаточно высокой жесткостью. Недостаток заключается в больших потерях мощности.

## **9. Системы электроприводов основных рабочих машин**

К числу основных рабочих машин общепромышленного применения относится достаточно разнообразная группа: подъемно-транспортные механизмы (мостовые, козловые и поворотные краны, промышленные манипуляторы, конвейеры, транспортеры и т.д.), металлорежущие станки (токарные, сверлильные, расточные и т.д.) и машины для транспортировки и сжатия жидких сред и газов (центробежные вентиляторы, центробежные и поршневые насосы, компрессоры различных типов).

При выборе и проектировании систем электроприводов, для перечисленных рабочих машин необходимо учитывать характер технологического процесса. Он оказывает основное влияние на режимы работы электропривода и определяет главные требования, предъявляемые к нему в отношении обеспечения желаемых динамических показателей качества (колебательность, время протекания переходных процессов, определяющих общее быстродействие системы) и точности регулирования в установившихся (статических) режимах.

По характеру технологического процесса общепромышленные механизмы можно классифицировать на две большие группы: машины циклического действия и машинные непрерывного действия. У первой группы машин рабочий процесс состоит из повторяющихся однотипных циклов, у второй группы машин напротив, технологический процесс имеет непрерывный характер. Типичными примерами первых могут служить краны, шахтно-подъемные машины, металлорежущие станки различных типов, а вторых – эскалаторы, землесосы, конвейеры, насосы, вентиляторы и т.д. Однако механизмы одного назначения могут иметь принципиально разные системы электроприводов, и их выбор будет зависеть от характера технологического процесса (непрерывный или циклический).

Например, конвейер для транспортировки грузов может иметь циклический характер работы с достаточной паузой работы для загрузки и выгрузки и непрерывный характер работы, когда загрузка и выгрузка происходят постоянно без пауз.

Рассмотрим более детально типичные системы электроприводов, наиболее часто используемых для конкретных типов рабочих машин.

### **9.1. Системы автоматизированного электропривода подъемно-транспортных механизмов**

К подъемно-транспортным машинам относятся различные по конструкции подъемники, лебедки и краны.

Подъемно-транспортные машины общепромышленного назначения по принципу действия можно условно разделить на машины прерывистого действия, у которых время действия чередуется с паузой, и машины непрерывного действия. Например, цикл работы подъемного механизма мостового крана состоит из подъема груза, паузы, в течение которой кран перемещается к месту выгрузки, опускания груза, подъема грузозахватывающего приспособления, второй паузы, вызванной возвращением крана к месту загрузки. Примером машины непрерывного действия может служить многокабинный пассажирский лифт или конвейер.

Подъемно-транспортные машины могут включать в свой состав несколько механизмов, обеспечивающих движение груза в различных направлениях, подъемную лебедку, механизмы горизонтального перемещения и вращения.

Выбор системы электропривода и режимы его работы в значительной степени определяются статической нагрузкой, создаваемой механизмом на валу приводного двигателя. Значение и характер статической нагрузки двигателя механизмов прерывистого действия существенно зависят от кинематической схемы и природы сил, определяющих сопротивление движению. Если в подъемных лебедках основной силой сопротивления является вес поднимаемого груза (активная сила), то в механизмах передвижения и вращения — реактивная сила трения. В неуравновешенной подъемной лебедке (без противовеса) направление действия активной силы не зависит от массы груза, а в уравновешенной подъемной лебедке (с противовесом) направление результирующей силы определяется массой перемещаемого груза. Нормальная, отвечающая всем требованиям технологического процесса работа механизма циклического действия зависит от правильного выбора электропривода и системы электроснабжения.

Электропривод подъемно-транспортных механизмов имеет ряд особенностей, отличающих его от электроприводов других общепромышленных и специальных механизмов:

1. Механические характеристики электропривода расположены во всех четырех квадрантах; желательно обеспечить плавный переход приводной электрической машины из двигательного режима работы в генераторный режим при спуске;
2. Относительно невысокий диапазон регулирования скорости (в большинстве случаев не выше 10:1 при однозонном регулировании скорости);
3. Отсутствие высоких требований к жесткости механических характеристик;
4. Отсутствие высоких требований к быстродействию;

5. Температура окружающей среды изменяется от  $-40$  до  $+40^{\circ}$  С. В металлургических цехах интервал изменения температуры окружающей среды составляет от  $-10$  до  $+50^{\circ}$  С;
6. Относительная влажность воздуха характеризуется средним уровнем 90% при температуре окружающей среды  $+25^{\circ}$  С;
7. Осаждение пыли из воздуха  $5 \text{ г/м}^2$  в сутки;
8. Осаждение паров кислот из воздуха  $500 \text{ мг/м}^2$  в сутки;
9. Механические воздействия: вибрации и удары, вызванные передвижением механизмов; характеризуются частотой 1-50 Гц и ускорением  $5 \text{ м/с}^2$ ; одиночные повторяющиеся удары с ускорением до  $30 \text{ м/с}^2$ .
10. Частое отсутствие квалифицированного обслуживания;
11. Жесткие требования в отношении простоты эксплуатации и надежности работы.

Следует учитывать и то, что крановые механизмы относятся к машинам циклического действия, поэтому система электропривода должна быть выбрана и спроектирована таким образом, чтобы обеспечивать надежную работу, при повторно-кратковременном режиме и большой частоте включений в жестких климатических и производственных условиях.

Электроприводы крановых механизмов по характеру нагрузок можно разделить на две группы: с преимущественно активным статическим моментом и преимущественно с реактивным статическим моментом.

К первой группе относятся электроприводы грузовых лебедок и стреловых лебедок с неуравновешенной стрелой, а ко второй группе - электроприводы механизмов горизонтального передвижения.

Желаемые механические характеристики электроприводов механизмов подъема и горизонтального передвижения представлены на рис. 9.1 и 9.2 соответственно.

Электропривод механизмов подъема кранов должен обеспечивать жесткие механические характеристики во всем диапазоне нагрузок. Для выполнения операций по выбору слабины грузового каната необходимо иметь характеристику пониженной скорости 1п. Для точной установки груза необходима характеристика 1с. Характеристики, на которых осуществляется опускание груза, находятся как в четвертом (тормозной спуск), так и в третьем (силовой спуск) квадрантах.

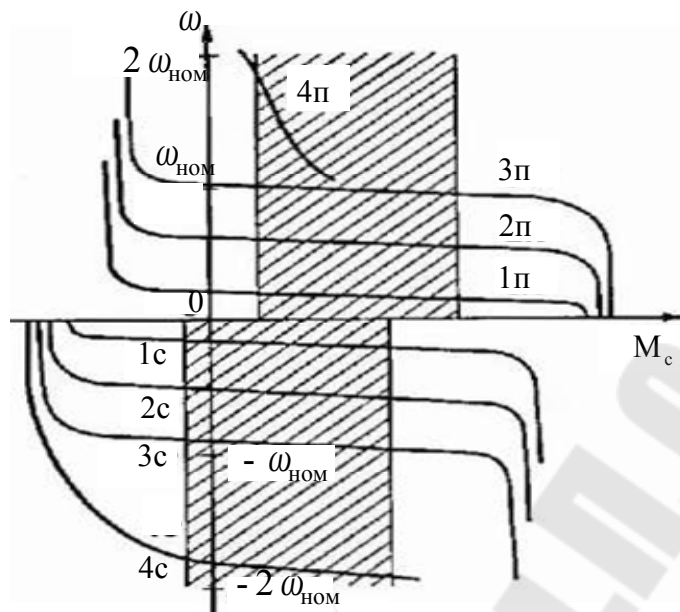


Рис. 9.1. Механические характеристики механизмов подъема.

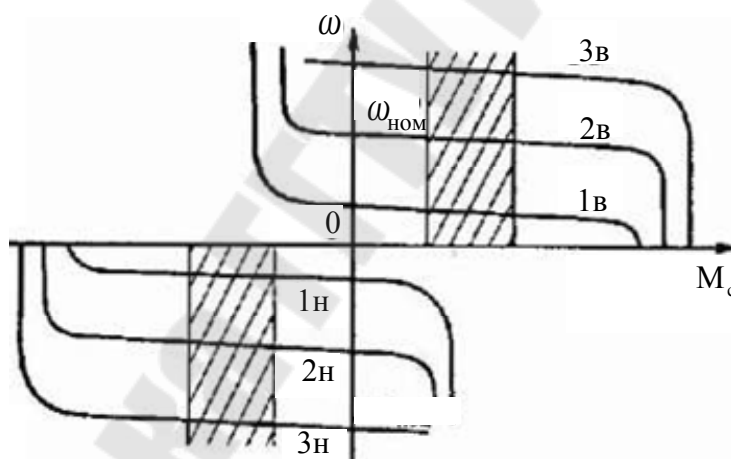


Рис. 9.2. Механические характеристики механизмов передвижения.

Для кранов с большой высотой подъема для повышения производительности необходимо поднимать и опускать легкие грузы или пустой крюк со скоростью больше номинальной (характеристики 4). Поэтому электропривод должен обеспечивать двухзонное регулирование скорости.

Показанные на рисунке вертикальные участки характеристик требуются для ограничения моментов и ускорений при пусках и торможениях механизмов, что достигается за счет введения в систему управления обратных связей по регулируемым величинам. По условиям

эксплуатации удобно обеспечивать примерно одинаковое время переходных процессов для подъема и спуска грузов. Моменты стопорения на характеристиках подъема и спуска должны различаться между собой. Объясняется это разными моментами сопротивления при подъеме и спуске грузов (см. заштрихованные на рисунке области изменения  $M_c$ , обусловленные изменением массы груза).

Электропривод механизмов горизонтального передвижения имеет жесткие характеристики во всем диапазоне нагрузок. Для торможения с высших скоростей на низшие скорости электропривод должен обеспечивать автоматический переход из двигательного в тормозной режим с ограничением тормозного момента. Механические характеристики (1 квадрант) соответствуют движению механизмов в условном направлении «вперед», а механические характеристики (3 квадрант) — в условном направлении «назад». Характеристики «1в» и «1н» требуются для выбора зазоров в передачах механизмов и обеспечения точной их остановки. Характеристики «2в» и «2н» являются промежуточными, а характеристики «3в» и «3н» служат для движения механизмов с номинальной скоростью. Вертикальные участки этих характеристик, как и для механизмов подъема, требуются для ограничения моментов и ускорений механизмов передвижения и поворота при переходных процессах. Если электроприводы механизмов имеют механические характеристики, близкие к показанным на рис. 9.1 и 9.2, то крановая установка будет работать с высокой производительностью и хорошим качеством обслуживания технологического процесса.

Рассмотрим основные требования к электрооборудованию кранов. На механизмах подъема и передвижения устанавливаются ограничители хода, воздействующие на электрическую цепь управления. Конечные выключатели механизма подъема ограничивают ход захватывающего устройства вверх, движение вниз не ограничивается. На механизмах передвижения моста и тележки должны быть установлены конечные выключатели, ограничивающие ход механизмов в обе стороны. При наличии двух мостов и более на одном подкрановом пути, равно как и двух тележек на одном мосту, должны быть установлены конечные выключатели, предотвращающие столкновение механизмов.

Электрические цепи и двигатели защищаются максимальными токовыми реле от коротких замыканий и перегрузки свыше 200 % Номинальной. Тепловая защита в крановых установках не применяется, так как двигатели, работающие на кранах, рассчитаны на повторно-кратковременный режим и значительные перегрузки, при которых тепловая защита может дать ложное отключение. В схеме управления краном должна быть предусмотрена нулевая защита, предохраняющая



двигатели от самозапуска при подаче напряжения после перерыва в электроснабжении.

В целях безопасности обслуживания на люке для выхода из кабины на мост или дверях для выхода с подкрановых путей на мост должны быть установлены блокировочные контакты, снимающие напряжение с контактных проводов при открывании люка или двери. На магнитных и магнитографических кранах в виде исключения напряжение остается на проводах, питающих электромагнит. Все крановые механизмы должны быть снабжены тормозами, подъемные механизмы — обязательно автоматическими тормозами закрытого типа, действующими при отключении питания. Между тормозом и рабочим органом должна быть жесткая связь. Краны, работающие вне помещений, должны быть снабжены противоугонными средствами. Кроме того, на мощных мостовых кранах должна быть установлена аппаратура, предотвращающая перекос фермы моста сверх допустимых пределов.

Требования к монтажу и размещению электрооборудования крана заключаются в основном в том, чтобы рубильники или автоматы питания главных контактных проводов были установлены в закрытом шкафу, смонтированном на территории, удобной для обслуживания. Шкаф во время работы не запирается. Монтаж проводов на кране для предотвращения механических повреждений и вредных воздействий смазочных материалов выполняется чаще всего в стальных тонкостенных трубках или бронированным кабелем.

Рассмотрим основные типы крановых механизмов.

### **Мостовые краны.**

Мостовые краны являются наиболее массовыми грузоподъемными машинами на промышленных предприятиях. Существует разделение мостовых кранов на краны общего назначения, предназначенные для подъема и перемещения грузов во всех отраслях промышленности, и специальные краны, предназначенные для обслуживания определенных технологических процессов, например, в металлургической промышленности. По конструкции механизмов специальные краны могут значительно отличаться от кранов общего назначения.

Мостовые краны имеют механизмы подъема, передвижения крана и передвижения грузовой тележки. Механизмов подъема может быть несколько, расположенных как на одной, так и на нескольких грузовых тележках.

Мостовые краны могут эксплуатироваться как в закрытых помещениях, так и на открытом воздухе. Такие краны часто имеют большую грузоподъемность (до нескольких сот тонн). Номинальная скорость подъема груза для кранов общего назначения, как правило, не превышает 0,25 м/с, номинальная скорость механизмов передвижения

может достигать 1,7 м/с. Требования ГOST по диапазону регулированию скорости для таких кранов не существует, однако, для механизма подъема (если значение посадочной скорости не оговорено специально) можно ориентироваться на значение посадочной скорости для башенных кранов - 0,08 м/с. Таким образом, необходимый диапазон регулирования скорости не превышает 4-6:1. Необходимый диапазон регулирования скорости механизмов передвижения может достигать 20:1.

К мостовым кранам относятся и так называемые кран-балки или однобалочные мостовые краны. Такие краны чаще всего управляются с пола посредством подвешенного пульта или по радиоканалу.

#### **Козловые краны.**

Козловые краны относятся к кранам мостового типа и по режиму работы не отличаются от них. Особенностью конструкции козловых кранов, предъявляющей требования к электроприводу механизмов передвижения, является большая наветренная площадь и соответственно большая ветровая нагрузка, действующая поперек пролетного строения.

К специальным козловым кранам можно отнести рудно-угольные грейферные перегружатели, работающие на тепловых электростанциях и металлургических заводах и перегружающие насыпные грузы при помощи специального грузозахватного приспособления - грейфера. К особенностям грейферного режима следует отнести необходимость синхронизации скоростей подъемной и замыкающей лебедок для равномерного распределения нагрузок. Механизм передвижения таких кранов обеспечивает установочное движение.

#### **Портальные краны.**

Портальные краны можно разделить на две группы:

1. Монтажные краны, применяющиеся в основном на судостроительных и судоремонтных заводах. Такие краны имеют умеренные номинальные скорости и повышенные требования к диапазону регулирования скорости и плавности переходных процессов.
2. Перегрузочные краны, работающие в морских и речных портах. Такие краны являются универсальными, т.е. могут работать как в крюковом режиме, так и в грейферном. Для работы с грейфером такие краны имеют две грузовые лебедки, которые управляются отдельно. При работе в крюковом режиме лебедки синхронизируются. Диапазон регулирования скорости механизма подъема в крюковом режиме может достигать до 8:1.

Портальные краны имеют также механизмы поворота, изменения вылета стрелы и передвижения. У перегрузочных портальных кранов передвижение является установочным (т.е. редко используемым) движением.

### **Башенные краны.**

Башенные краны применяются в промышленном и гражданском строительстве. К специфическим требованиям, предъявляемым к электроприводу механизма подъема башенных кранов, относится необходимость подъема и опускания легких грузов с повышенной скоростью. Это связано с желанием обеспечить высокую производительность при большой высоте подъема, учитывая, что грузы, близкие по массе к номинальным, поднимаются редко. Таким образом, общий диапазон регулирования скорости (ниже и выше номинальной) может достигать 40:1.

Особенностью башенного крана является также наличие больших упругих деформаций металлоконструкций, требующих учета при выборе механических характеристик электроприводов (прежде всего механизмов поворота) и режимов пуска и торможения.

Многие башенные краны имеют специальные механизмы и приспособления для самомонтажа.

Спецификой работы башенного крана является также питание его от временных электрических сетей малой мощности или автономных источников электроэнергии. Это предъявляет к его электрооборудованию дополнительные требования в части сохранения работоспособности при провалах напряжения.

Рассмотрим основные типы электродвигателей, используемых в современных системах электропривода крановых механизмов.

### **Крановые асинхронные электродвигатели.**

Традиционно для кранового электропривода применяются специально разработанные серии электродвигателей переменного тока. По геометрии магнитопровода, степени использования электротехнических материалов, электромеханическим характеристикам и конструктивному исполнению такие электродвигатели существенно отличаются от двигателей общепромышленного исполнения.

Режим работы электродвигателей в крановом электроприводе характеризуется широким изменением нагрузок, частыми пусками и торможениями, широким диапазоном изменения скорости ниже и выше номинальной (в электроприводах постоянного тока и частотно-регулируемых электроприводах).

Крановые двигатели рассчитаны для работы в повторно-кратковременном режиме, который характеризуется продолжительностью включения (ПВ) 15, 25, 40 и 60% при продолжительности цикла не более 10 мин. Основным номинальным режимом крановых двигателей переменного тока является ПВ=40%.

Из-за высоких требований к динамике двигателей в переходных процессах пуска и торможения и для снижения расхода энергии при этом

двигатели конструируются таким образом, чтобы момент инерции ротора был, по возможности, минимальным. Снижение момента инерции достигается путем уменьшения высоты оси вращения при заданной мощности двигателя.

Электродвигатели имеют повышенный (по сравнению с электродвигателями общепромышленного исполнения) запас прочности механических узлов и деталей. Крепление пакета ротора на валу всегда производится при помощи шпонки.

Традиционно, основное применение в крановых электроприводах находят асинхронные двигатели с фазным ротором. Регулирование скорости и момента в электроприводах с такими двигателями производится включением в цепь ротора пускорегулирующих резисторов. Для получения пониженных (посадочных) скоростей опускания груза применяется режим противовключения или различные специальные схемы включения (например - динамического торможения самовозбуждением).

Существуют также модификации крановых асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (при мощности до 30 кВт) для применения в электроприводах, имеющих, как правило, низкие номинальные скорости и не требующие их регулирования. Кроме того, существуют модификации крановых электродвигателей в двух и трехскоростном исполнении.

Все эти двигатели рассчитаны на питание от промышленной сети стандартного напряжения 220/380 В при частоте 50 Гц. Хотя это не означает, что они не могут работать в составе частотно- регулируемых электроприводов, тем не менее, в последнее время разрабатываются специальные серии асинхронных двигателей, в том числе и крановых, оптимизированные для работы в системах частотного регулирования.

Таким образом, крановые асинхронные двигатели в настоящее время условно можно разделить на электродвигатели с фазным и короткозамкнутым ротором, предназначенные для питания от промышленной сети, и короткозамкнутые электродвигатели для частотно- регулируемых электроприводов.

Электродвигатели с фазным ротором используются в системах электропривода, где скорость регулируется посредством изменения сопротивления ротора ступенчатым (п. 8.1) либо бесступенчатым (плавным) способом (п. 8.10).

Работа асинхронных двигателей в системах частотного регулирования (пп. 8.12, 8.13) имеет свои особенности. Прежде всего, при частотном управлении значительно снижаются потери энергии в двигателях в пуско-тормозных режимах. Это позволяет переходить на более высокооборотные электроприводы, и при проектировании двигателей основное внимание уделять снижению потерь в обмотках

двигателя в номинальном режиме. При проектировании двигателей для системы частотного регулирования учитывается следующее:

1. Основные соотношения между геометрическими размерами, принятые для крановых асинхронных двигателей, сохраняются, поскольку определяющим здесь является режим работы, а не система регулирования.
2. В современных частотно-регулируемых электроприводах с векторным управлением механические характеристики формируются системой управления преобразователя. Поэтому при проектировании электродвигателей, предназначенных для работы только с преобразователями частоты, можно не предпринимать специальные меры для повышения перегрузочной способности и пускового момента.
3. Оптимальные частоты вращения двигателей в системах частотного регулирования, как уже было сказано, выше, чем в обычных системах, и составляют 1900 - 1800 об/мин для легкого и среднего режимов работы и до 1000 - 800 об/мин - для тяжелого режима. Однако при проектировании следует согласовывать максимальную частоту вращения разрабатываемого электропривода и максимальную допустимую частоту вращения редуктора.
4. Двигатели должны быть работоспособны при повышении частоты выходного напряжения преобразователя в 1,5 - 2 раза по отношению к номинальной частоте.
5. С целью снижения потерь обмотка ротора двигателя заливается чистым алюминием или выполняется медной, скольжение при этом - минимальное. Регулирование выходного напряжения и частоты двигателя позволяет оптимизировать использование его активных частей и обеспечить работу двигателя в режиме минимальных потерь.
6. Возможно исполнение двигателей на нестандартное напряжение, соответствующее выходному напряжению преобразователя частоты.

Все эти мероприятия, а также оптимальное разграничение зон регулирования, позволяют при одинаковой нагрузке снизить в 1,5 - 1,8 раза мощность двигателя в частотно-регулируемом приводе.

Специальная серия крановых двигателей для частотно-регулируемых электроприводов выпускается в России. Эта серия включает в себя двигатели типа АД2КД мощностью от 4 до 11 кВт в шести- и четырехполюсном исполнениях с пристроенными дисковыми тормозами и двигатели 4МТКД мощностью от 22 до 110 кВт в шести- и восьмиполюсном исполнениях. Двигатели 4МТКД выполнены с использованием основных узлов традиционных двигателей серии 4МТН и изготавливаются в закрытом обдуваемом исполнении, а также с вентиляцией, не зависящей от внешнего вентилятора с электроприводом.

Для этих двигателей разработаны автономные тормозные устройства с гидротолкателями.

### **Асинхронные электродвигатели общего назначения в крановом электроприводе.**

Асинхронные короткозамкнутые двигатели общего назначения отличаются от крановых двигателей, как электрическими параметрами, так и конструктивным исполнением.

Двигатели общего назначения в сравнении с крановыми двигателями имеют меньший пусковой и максимальный моменты, большее значение пускового тока, меньшее номинальное скольжение. Вал, подшипниковые щиты, станина имеют меньший запас прочности. Пакет ротора на валу часто крепится посадкой с натягом без шпоночного соединения, что совершенно недопустимо для крановых электродвигателей. Поэтому область применения таких двигателей в крановом электроприводе ограничивалась механизмами передвижения кранов с низкими номинальными скоростями - электроталей, башенных и порталных кранов. Для этого, как правило, использовалась модификация двигателей общего назначения с повышенным скольжением.

В настоящее время распространилось мнение, что с появлением преобразователей частоты с векторным управлением, необходимость в крановых двигателях отпала.

Действительно, высокий пусковой момент таких двигателей в системах частотного регулирования оказывается невостребованным, т.к. преобразователь с векторным управлением формирует механические характеристики с неизменной перегрузочной способностью, не зависящей от напряжения сети во всем диапазоне регулирования скорости. Двигатели общего назначения имеют при одинаковой с крановыми двигателями мощности меньший номинальный ток статора, меньшее номинальное скольжение, более высокий КПД, коэффициент мощности.

Таким образом, по электрическим параметрам двигатели общего назначения более пригодны для работы в составе частотно-регулируемого электропривода, чем традиционные крановые двигатели. Кроме того, они имеют меньшую массу и, как следствие, более низкую стоимость.

Тем не менее, меньший запас прочности механических деталей, посадка пакета ротора без шпоночного соединения, часто более низкий класс изоляции двигателей общего назначения требует осторожности при их применении в электроприводе механизмов подъема, особенно на кранах интенсивного режима работы.

### **Крановые электродвигатели постоянного тока.**

Для кранового электропривода применяются специально разработанные серии электродвигателей постоянного тока (серия Д). Это электродвигатели последовательного и параллельного возбуждения.

Двигатели параллельного возбуждения в отличие от двигателей последовательного возбуждения имеют более жесткую механическую характеристику, но последние дают больший тяговый момент. При широком изменении нагрузки у электродвигателей последовательного возбуждения может происходить опасное увеличение скорости, в то время как электродвигатель параллельного возбуждения при малых нагрузках в опасные режимы не переходит.

Двигатели постоянного тока имеют достаточно простые способы получения искусственных характеристик, поэтому до недавнего времени они преимущественно и находили применение для регулируемых электроприводов. В настоящее время двигатели постоянного тока вытесняются асинхронными двигателями с преобразователями частоты, основными производителями которых являются ABB, Schneider, Siemens, Lenze, Веспер и число выпускаемых двигателей постоянного тока составляет лишь 4-5 % числа двигателей переменного тока. Это связано в первую очередь с тем, что асинхронные электродвигатели проще, надежней и дешевле в изготовлении и эксплуатации и имеют относительно меньшую массу и размеры.

Регулируемые системы электропривода, на базе рассмотренных типов электродвигателей обеспечивают высокие показатели регулирования. В случаях, когда высокое качество регулирования не требуется применяют менее совершенные системы электропривода (разомкнутые системы электропривода). При их использовании для крановых механизмов стремятся обеспечить в первую очередь характеристики для получения номинальных скоростей, а также пониженной скорости, так как с помощью них затруднительно реализовать все требуемые характеристики.

В табл. 9.1 приведены основные технические параметры электроприводов переменного и постоянного тока, которые получили в настоящее время наибольшее применение.

Согласно табл. 9.1 системы управления крановыми механизмами можно разбить на три группы:

1. Системы непосредственного управления исполнительными электродвигателями постоянного и переменного тока с помощью комплектных силовых коммутационных аппаратов, называемых силовыми кулачковыми контроллерами;
2. Системы дистанционного управления исполнительными электродвигателями постоянного и переменного тока, получающими питание от сети и содержащими комплектные устройства коммутации силовых цепей, называемые магнитными контроллерами;

Таблица 9.1. Характеристики крановых электроприводов.

| Электропривод   | Диапазон        |                        |                     |
|---|-----------------|------------------------|---------------------|
|   | мощности<br>кВт | регулирования скорости |                     |
|   |                 | ниже<br>номинальной    | выше<br>номинальной |
| Асинхронный с кулачковым контроллером, регулирование скорости реостатное  | 2... 30         | 3: 1                   | -                   |
| Асинхронный с кулачковым контроллером с использованием схемы динамического торможения с самовозбуждением                  | 5...30          | 7: 1                   | -                   |
| Асинхронный с магнитным контроллером, регулирование скорости реостатное   | 2... 180        | 4: 1                   | -                   |
| Асинхронный с магнитным контроллером с использованием динамического торможения с самовозбуждением                         | 20... 180       | 8:1                    | -                   |
| Асинхронный с импульсно-ключевым управлением  | 2... 30         | 10:1                   | -                   |
| Асинхронный с тиристорным преобразователем напряжения в статоре и резисторами в роторе                                    | 2... 180        | 10:1                   | -                   |
| С многоскоростным асинхронным двигателем и преобразователем частоты с непосредственной связью                             | 2...60          | 40: 1                  | -                   |
| Постоянного тока с кулачковым контроллером, регулирование скорости реостатное и с использованием потенциометрических схем | 3... 15         | 4: 1                   | 2:1                 |
| Постоянного тока с магнитным контроллером, регулирование реостатное и с использованием потенциометрических схем           | 3... 180        | 10: 1                  | 2,5:1               |
| Постоянного тока по системе генератор—двигатель   | 20... 180       | 10: 1                  | 2,5:1               |
| Постоянного тока по системе тиристорный преобразователь-двигатель   | 50... 300       | 10: 1                  | 2,5:1               |

3. Системы управления двигателями постоянного тока и асинхронными с питанием от электромагнитных и вентильных преобразователей тока, частоты и напряжения.



## **9.2. Системы электроприводов металлорежущих станков**

Металлообрабатывающий станок — это машина, предназначенная для обработки заготовок в целях образования заданных поверхностей путем снятия стружки или путем пластической деформации. Обработка производится преимущественно путем резания лезвийным или абразивным инструментом. Данный тип станков наиболее распространен и сложен. Многообразие металлообрабатывающих станков в основном обусловлено конструктивно-технологическими особенностями обрабатываемых деталей, все разнообразие которых условно можно разделить на три типа: валы, диски и корпусные детали. Для обработки тел вращения (валы и диски) используют токарные центровые и патронно-центровые станки, а для корпусных деталей — станки расточно-фрезерно-сверлильной группы. Для изготовления специальных деталей, таких как, например, зубчатые колеса, используют специализированные зубообрабатывающие, зубошлифовальные и другие станки. Электрофизические станки применяют для обработки высокотвердых материалов. Для обработки листовых материалов используют машины газовой, плазменной и лазерной резки.

Станки применяют также для выглаживания поверхности детали, для обкатывания поверхности роликами. Металлообрабатывающие станки осуществляют резание неметаллических материалов, например, дерева, текстолита, капрона и других пластических масс. Специальные станки обрабатывают также керамику, стекло и другие материалы.

Все многообразие металлообрабатывающего оборудования можно охарактеризовать несколькими понятиями, общими для всех видов станков.

Число управляемых (осей) характеризует возможности станка по формированию траектории движения его исполнительных органов (ИО) в пространстве. Координаты ИО станка могут изменяться одновременно, формируя при этом траекторию движения, или поочередно. Число одновременно управляемых осей характеризует возможности станка обрабатывать поверхности заготовки. Эти оси называют осями геометрии. Остальные оси станка обеспечивают доступ инструмента к обрабатываемым поверхностям и выполнение вспомогательных операций, например, автоматическую смену инструмента, транспортировку заготовок в рабочую зону станка и т.д.

При обработке в плоскости достаточно перемещать исполнительный орган одновременно только по двум осям, что достаточно для управления токарным станком. Для обработки корпусных деталей требуется минимум три одновременно управляемые оси, а для сложных изделий, требующих ориентации инструмента относительно поверхности детали, осей

геометрии может быть пять и более. Это характерно для многооперационных станков типа обрабатывающего центра или специализированных, выполняющих обработку изделий со сложной формой поверхности.

Главное движение — движение, обеспечивающее перемещение рабочей точки, линии или поверхности инструмента относительно заготовки и производящее при этом обработку. В токарных станках таким движением является вращение заготовки, зажатой в патроне шпинделя; во фрезерных — вращение инструмента (фрезы), установленного в шпинделе; в шлифовальных — вращение шлифовального круга. Как правило, главное движение имеет наибольшую установленную мощность привода, так как именно главный привод станка обеспечивает необходимое усилие резания.

Движения подачи — движения по осям геометрии станка, обеспечивающее перемещение ИО станка по определенной плоской или пространственной траектории (контур) с заданной скоростью. Диапазон изменения скоростей приводов подачи очень велик и определяется технологическими режимами обработки. Однако для соблюдения заданных технологических режимов обработки задается контурная скорость движения точки инструмента. Требуемые при этом скорости подачи по осям станка вычисляются системой управления в процессе выполнения задания.

Главное движение и движения подачи называются основными движениями. Кроме основных движений, в станках имеются вспомогательные движения, непосредственно не участвующие в процессе резания, но способствующие ему или выполняющие вспомогательные операции, обеспечивающие работу станка. Они осуществляют подачу охлаждающей смазочной жидкости, зажим и отжим заготовки и механизмов станков, автоматический подвод и отвод инструментов, автоматический контроль размеров в процессе обработки и т.д.

Для обработки заготовок на станке, как правило, используется не один, а несколько инструментов. Для сложных корпусных деталей их число иногда доходит до нескольких сотен. Наиболее простыми системами смены инструмента являются револьверные головки, несущие небольшое число инструментов (шесть—десять). Смена инструмента осуществляется при этом поворотом револьверной головки, ее фиксацией и зажатием.

Более сложные системы снабжены магазинами инструментов поворотного или цепного типов и автооператорами для замены инструмента. Магазин инструментов располагается вне рабочей зоны станка, количество хранящихся в магазине инструментов не ограничено.

Современные станки оснащены станочным транспортом, обеспечивающим доставку спутников с заготовками и деталями при загрузке и выгрузке рабочего стола станка.

### **Системы электроприводов металлорежущих станков.**

Основные и вспомогательные движения на станках выполняются от электроприводов. При всем многообразии станков требования, предъявляемые к приводам станков, обусловлены, главным образом, не тем, к какой группе относится станок, а для какого движения предназначен привод (главного, подачи или вспомогательного). Это определяет мощность, способ и диапазон регулирования скорости, необходимую плавность регулирования, требования к жесткости и стабильности характеристик, требования к динамике.

### **Электроприводы главного движения.**

Электропривод главного движения имеет электродвигатель и коробку скоростей или редуктор в качестве устройства, передающего движения исполнительному органу станка. Возможно отсутствие передающего устройства, когда двигатель соединяется непосредственно с исполнительным органом.

Распространенными приводами главного движения станков являются приводы от одно- и многоскоростных АД с короткозамкнутым ротором со ступенчатым регулированием скорости путем переключения шестерен коробки скоростей. Переключения производятся дистанционно различными устройствами, из которых наибольшее распространение получили устройства с фрикционными многодисковыми электромагнитными муфтами, встраиваемыми в коробку скоростей, а также с электрическими исполнительными двигателями и гидравлическими механизмами.

Использование электропривода переменного тока со ступенчатым регулированием скорости резания не может обеспечить полную производительность. Применение коробки скоростей со сложной кинематикой снижает точность работы станка и увеличивает его стоимость.

Применение асинхронных электродвигателей с электрическим переключением скоростей (одна-три, а иногда и четыре скорости) значительно упрощает коробки передач станков). Однако асинхронные электродвигатели с переключением скоростей обладают постоянным моментом на разных скоростях, что приводит к плохому использованию их на малых скоростях.

Поэтому наибольшее распространение получил электропривод главного движения в виде регулируемого электропривода с простым редуктором.

Для электроприводов главного движения шлифовальных станков и заточных станков, где требуется высокая частота вращения ( $6000 \text{ мин}^{-1}$  и более), применяются высокооборотные электроприводы переменного тока. Для этих станков используют специальные асинхронные двигатели с частотным управлением мощностью до 100 кВт, асинхронные высокоскоростные двигатели мощностью до 4 кВт и др.

Для электроприводов главного движения наиболее рациональным является способ регулирования скорости с постоянной мощностью

$$P = M \cdot \omega = \text{const},$$

так как большим скоростям резания соответствуют меньшие усилия резания, а меньшим скоростям — большие усилия.

Диапазон регулирования частоты вращения определяется пределами скоростей резания и диаметров обрабатываемых изделий. Это обусловлено тем, что на универсальных станках могут обрабатываться детали из различных материалов и разных размеров, в частности разных диаметров. Для обработки изделий одинакового диаметра из различных материалов необходимо обеспечить определенный диапазон регулирования скорости резания. С другой стороны, рациональная обработка изделий из одного и того же материала, но разных диаметров, требует постоянной скорости резания. Соблюдение этого условия  $v = \text{const}$  достигается регулированием скорости привода с диапазоном регулирования, определяемым диапазоном диаметров.

Так, для токарных станков с диаметром устанавливаемых изделий 320... 1000 мм требуемый диапазон регулирования частот вращения примерно 50:1, а для токарно-карусельных станков с диаметром обрабатываемого изделия от 1250 до 4000 мм он доходит до 80:1.

В связи с этими требованиями целесообразно использование электродвигателей постоянного тока (п. 3.4) Частоты вращения у них в достаточно широких пределах могут регулироваться при постоянной мощности и непрерывном диапазоне скоростей за счет регулирования поля возбуждения путем его ослабления (п. 8.5). И это оказывается более предпочтительным, так как значительно упрощает коробку передач, являющуюся самым сложным узлом станка. В этом случае коробка передач может иметь всего три-четыре ступени скорости, а иногда и две. При этом электродвигатель должен иметь возможность регулировать свою частоту вращения при постоянной мощности за счет ослабления магнитного поля в 3—4 раза. Так как электродвигатели главного движения обеспечивают постоянную заданную скорость, независимую от нагрузки, изменяющуюся в широких пределах, они должны иметь высокую жесткость механических характеристик, которая может изменяться при ослаблении магнитного поля возбуждения. В противном случае

невозможна устойчивая работа привода. Естественная механическая характеристика современных электроприводов при нормальном поле возбуждения обычно обладает достаточной жесткостью (падение частоты вращения при полной нагрузке не превышает 3—5 %).

Коробка передач может совсем отсутствовать, если использовать систему электропривода постоянного тока «тиристорный преобразователь - двигатель», так как она позволяет регулировать скорость в большом диапазоне с высокой степенью точности (п. 7.5).

Тиристорный преобразователь (ТП) является управляющим источником питания электродвигателя постоянного тока, т. е. усилителем мощности с весьма высоким коэффициентом, достигающим значения 4000. Электродвигатель непрерывно управляется в зависимости от величины сигналов рассогласования таким образом, чтобы устранить это рассогласование. Скорость электродвигателя регулируется изменением напряжения, подводимого к его якорю от источника регулируемого напряжения тиристорного преобразователя-выпрямителя. Тиристорные преобразователи имеют значительные преимущества: статический характер работы преобразователя; высокую экономичность регулирования напряжения; легкость управления; стабильность поддержания скорости; высокое быстродействие; сравнительно малые габаритные размеры и массу; бесшумность в работе; низкие эксплуатационные расходы; простоту обслуживания.

Тиристорные преобразователи собирают по различным силовым схемам в зависимости от мощности электропривода. Часто используются комплектные системы типа КТЭУ, ЭПУ, ПТЗР и др.

Для повышения быстродействия и обеспечения широкого диапазона регулирования скорости применяют широтно-импульсное управление приводом (п. 7.6). В таких схемах тиристоры включают в сеть постоянного тока последовательно с электродвигателем. Для гашения тиристоров применяют заряженные конденсаторы, которые включают специальными тиристорами гашения навстречу анодному напряжению. Таким образом, в электродвигателях постоянного тока с тиристорными преобразователями через якорь электродвигателя пропускают импульсы постоянного тока различной продолжительности. Эти импульсы отличаются от импульсов переменного тока той же длительностью повышенной энергии, сообщаемой электродвигателю. Это объясняется тем, что анодное напряжение неизменно в течение всего времени протекания тока через тиристор. Большое количество энергии, сообщаемое электродвигателю при пропускании каждого импульса, обеспечивает высокое быстродействие привода.

В станках с числовым программным управлением (ЧПУ) функции, выполняемые электроприводом главного движения, значительно

усложнены. Кроме стабилизации частоты вращения, при силовых режимах резания требуются обеспечение режимов позиционирования шпинделя при автоматической смене инструмента и производстве легких долбежных и строгальных работ, а также возможность нарезания резьбы метчиками и резцами. Это неизбежно ведет к увеличению требуемого диапазона регулирования частоты вращения. Так, при требуемой точности позиционирования шпинделя 0,1 % и максимальной частоте вращения двигателя 3000...5000 мин<sup>-1</sup> суммарный диапазон изменения частоты вращения должен быть не менее 10 000:1.

На скоростях ниже номинальных регулирование осуществляется с постоянным моментом. Таким образом, получается двухзонное регулирование скорости. При небольшой мощности главного привода применяют однозонное регулирование скорости с постоянным моментом.

#### **Электроприводы подач.**

К электроприводам подач предъявляются следующие основные требования:

1. Минимальные размеры электродвигателя при высоком вращающем моменте;
2. Высокая максимальная скорость;
3. Значительная перегрузочная способность привода в режимах кратковременной и повторно-кратковременной нагрузки; широкий диапазон регулирования; высокая стабильность характеристик;
4. Высокое быстродействие при разгоне и торможении, подключении и отключении нагрузки и при реверсе под нагрузкой на самых малых частотах вращения;
5. Высокая равномерность движения при различной нагрузке на всех скоростях вплоть до самых малых;
6. Высокая надежность и ремонтпригодность; удобство конструктивной установки двигателя на станке и встраивания управляемых преобразователей в шкафы и ниши станков; малые размеры.

Этим требованиям удовлетворяют регулируемые электроприводы постоянного тока. Долгое время они повсеместно применялись в приводах подач металлорежущих станков. Система «тиристорный преобразователь-электродвигатель» с обратной связью по скорости обеспечивает требуемую жесткость механической характеристики, большой диапазон регулирования при достаточно экономичной работе (7.5).

Но, основными ее недостатками являются сложность системы регулирования, наличие щеточных токосъемников, снижающих надежность двигателей, а также достаточно высокая стоимость.

Прогресс в электронике и появление новых электротехнических материалов изменили ситуацию в области сервоприводной техники. Сервоприводы - это такие системы привода, которые в широком диапазоне

регулирования скорости гарантируют высокоточные процессы движения и реализуют их хорошую повторяемость. Сервоприводы являются наиболее высокотехнологичной ступенью электропривода и в полной мере удовлетворяют требованиям к электроприводам подач.

Современные сервоприводы с частотным регулированием и получили наибольшее распространение в настоящее время.

#### **Асинхронный сервопривод.**

Асинхронный электродвигатель является самым массовым в промышленности благодаря простой и надежной конструкции при невысокой цене. Однако этот тип двигателя является сложным объектом управления с точки зрения регулирования момента и частоты вращения. Применение высокопроизводительных микроконтроллеров, реализующих векторный алгоритм управления, и цифровых датчиков скорости с высокой разрешающей способностью, позволяют получить большой диапазон регулирования скорости и достаточно точные характеристики асинхронного электропривода.

Асинхронные электроприводы переменного тока с частотным регулированием изменяют частоту вращения вала асинхронного короткозамкнутого электродвигателя с помощью транзисторных или тиристорных преобразователей частоты, которые преобразуют одно— или трехфазное напряжение с частотой 50 Гц в трехфазное напряжение с переменной частотой в диапазоне от 0,2 до 400 Гц.

На сегодняшний день частотный преобразователь представляет собой малогабаритное устройство (значительно меньшее, чем аналогичный по мощности асинхронный электродвигатель) на современной полупроводниковой базе, управляемое встроенным микропроцессором. Регулируемый асинхронный электропривод позволяет решать различные задачи автоматизации производства и экономии электроэнергии, в частности, бесступенчатое регулирование частоты вращения или скорости подачи технологических машин.

С точки зрения стоимости асинхронный сервопривод имеет неоспоримое превосходство при больших мощностях.

#### **Синхронный сервопривод.**

Синхронные серводвигатели — это трехфазные синхронные электродвигатели с возбуждением от постоянных магнитов и фотоэлектрическим датчиком положения ротора. В них применяют роторы типа «беличья клетка» или с постоянными магнитами. Их основным достоинством является низкий момент инерции ротора относительно развиваемого крутящего момента. Эти двигатели работают в сочетании с сервоусилителем, включающим выпрямитель на силовых диодах, блок конденсаторов и инвертор на базе силовых транзисторных ключей. Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения сервоусилитель

снабжается блоком конденсаторов, а для преобразования накопленной в конденсаторах энергии в моменты торможения — разрядным транзистором и балластным сопротивлением, что обеспечивает эффективное динамическое торможение.

Частотно-регулируемые синхронные сервоприводы обладают высоким быстродействием, хорошо сочетаются с импульсными системами программного управления.

**Электроприводы вспомогательных движений**, как правило, не требуют регулирования скорости, и их работа осуществляется на базе асинхронных электродвигателей с передающими устройствами и без них.

### **9.3. Системы автоматизированных электроприводов насосов вентиляторов и компрессоров**

Насосы, вентиляторы и компрессоры относятся к числу наиболее распространенных и энергоемких механизмов на промышленных предприятиях и бытовой технике, потребляющие около 25% вырабатываемой в стране электроэнергии. Установленная мощность приводных электродвигателей насосов, вентиляторов, компрессоров колеблется от долей единиц до десятков тысяч киловатт. Например, для турбокомпрессоров - до 18000 кВт, насосов - до 73000 кВт, вентиляторов - до 5000 кВт.

Насосы предназначены для транспортирования жидких сред, а вентиляторы - газообразных.

Компрессоры - предназначены для получения и транспортирования сжатого воздуха или другого какого - либо газа.

По принципу подачи рабочей среды и конструкции рассматриваемые механизмы бывают:

1. Насосы - центробежные, осевые, поршневые, ротационные, винтовые и шестеренчатые;
2. Вентиляторы - центробежные и осевые;
3. Компрессоры - центробежные, осевые (турбокомпрессоры), поршневые, ротационные и винтовые.

Наибольшее распространение получили механизмы центробежного и поршневого типов.

У механизмов центробежного типа статическая мощность на валу меняется пропорционально кубу скорости

$$P_n = c \cdot \omega^3,$$

где  $c$  — коэффициент пропорциональности,  $\omega$  — угловая скорость вращения механизма центробежного типа.



Если потерями холостого хода можно пренебречь и отсутствует противодействие, т.е. это механизмы с так называемой вентиляторной нагрузкой (п. 1.3).

У механизмов поршневого типа мощность на валу изменяется по синусоидальному закону в зависимости от угла  $\varphi$  поворота кривошипа

$$P_n = P_{n \max} \cdot \sin(c \cdot \varphi),$$

где  $c=1$  – постоянный коэффициент, характерный для поршневых насосов одинарного действия, подача у которых осуществляется только при движении поршня вперед. При движении поршня в обратном направлении подача отсутствует.  $c=2$  - постоянный коэффициент, характерный для поршневых насосов двойного действия, подача у которых осуществляется при ходе поршня в обе стороны.

Основными параметрами, характеризующими работу таких машин, являются создаваемые ими подача, давление и напор, а также энергия, сообщаемая потоку их рабочими органами.

Подача — это количество жидкости или газа, перемещаемых машиной в единицу времени. При измерении подачи в единицах объема ее называют объемной и обозначают обычно  $Q$ .

Во многих случаях при использовании насосов, вентиляторов и компрессоров необходимо регулирование их подачи. Нередко требуется глубокое периодическое регулирование подачи, если потребление воды, воздуха или технологических продуктов меняется в несколько раз. Иногда же требуется весьма незначительное, но постоянное подрегулирование подачи при отклонении параметров воздуха, воды от заданных значений.

В качестве примеров периодического изменения подачи можно привести шахтную водоотливную установку с непостоянным притоком воды, циркуляционную установку турбины при разной температуре охлаждающей воды, аэродинамические трубы и т. д. Постоянное подрегулирование подачи насосов необходимо, например, в химическом производстве, где количество перекачиваемой щелочи или кислоты зависит от их плотности. Необходимо оно также на электрических станциях, где подача вентиляторов и дымососов определяется количеством и составом топлива котельного агрегата.

Выбор системы электропривода определяется в первую очередь одним обстоятельством: требуется ли регулирование подачи установки. Регулирование может быть незначительным (подрегулирование) и глубоким. Подачу можно регулировать несколькими способами:

1. Изменением частоты вращения приводного двигателя (электрический способ);
2. Изменение результирующего сопротивления магистрали с помощью задвижек (механический способ);

3. Посредством специальных устройств, расположенных в самом механизме (направляющие лопасти);
4. Изменением числа механизмов, работающих на одну магистраль;
5. Комбинированный способ.

С точки зрения автоматизированного электропривода, наибольший интерес представляет способ регулирования путем изменения частоты вращения приводного двигателя (электрический способ).

В электроприводах насосов, вентиляторов, компрессоров применяются двигатели мощностью от долей кВт (небольшие маслососы и вентиляторы) до нескольких МВт (нагнетательные турбокомпрессоры магистральных трубопроводов, шахтные вентиляторные установки главного проветривания, дымососы, насосы на станциях магистральных нефтепроводов).

Классификация насосов, вентиляторов, компрессоров производится по установленной мощности приводного двигателя:

1. Малой мощности, 50 кВт;
2. Средней мощности, 50 -500 кВт;
3. Большой мощности, 500 -10000 кВт и выше.

В настоящее время можно выделить следующие наиболее часто используемые системы электроприводов насосов, вентиляторов, компрессоров (системы электроприводов приведены начиная от самых простейших до систем с автоматическим регулированием подачи):

1. Асинхронный электропривод с короткозамкнутым асинхронным электродвигателем - скорость не регулируется,  $P_n < 1000$  кВт; если синхронный двигатель, то  $P_n < 20-30$  МВт.
2. Асинхронный электропривод системы «тиристорный регулятор напряжения-асинхронный электродвигатель»,  $P_n < 100$  кВт, диапазон регулирования скорости  $D = 1,2-1,5:1$ .
3. Асинхронный электропривод с асинхронным электродвигателем с фазным ротором и реостатным управлением,  $P_n < 5000$  кВт, диапазон регулирования скорости  $D = 1,5-2:1$ .
4. Асинхронный электропривод с двухскоростным (многоскоростным) электродвигателем,  $P_n < 1400$  кВт, диапазон регулирования скорости  $D = (1,5 - 3) : 1$ .
5. Асинхронный электропривод с электродвигателем с короткозамкнутым ротором или синхронный электродвигатель с муфтой скольжения (электрические, гидравлические),  $P_n < 200$  кВт, диапазон регулирования скорости  $D = (1,5 - 2) : 1$ .
6. Асинхронный электропривод с плавным регулированием величины сопротивления статорных обмоток (АДКЗ) или роторных обмоток (АДФР),  $P_n < 200$  кВт, диапазон регулирования скорости  $D = (1,5 - 4) : 1$ .

7. Двухдвигательный синхронно-асинхронный электропривод. Используется при тяжелых пусковых режимах  $P_n < (20-30)$  МВт, диапазон регулирования скорости  $D = 2 : 1$ .
8. Асинхронный вентильный каскад,  $P_n < 5000$  кВт, диапазон регулирования скорости  $D = (1,2 - 2) : 1$ .
9. Асинхронный электропривод системы «тиристорный преобразователь частоты-асинхронный электродвигатель» или синхронный электропривод «тиристорный преобразователь частоты-синхронный электродвигатель»,  $P_n < 5000$  кВт, диапазон регулирования скорости  $D = 10 : 1$ .
10. Электропривод постоянного тока системы «тиристорный преобразователь-электродвигатель»,  $P_n < 20-30$  МВт, диапазон регулирования скорости  $D = 10 : 1$ .
11. Электропривод постоянного тока системы «тиристорный преобразователь-электродвигатель» с бесконтактным электродвигателем,  $P_n < 20-30$  МВт, регулирования скорости  $D = 10 : 1$ .
12. Электропривод с линейным асинхронным электродвигателем.

В механизмах не требующих регулирования подачи, в качестве приводных двигателей используются асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором (АДКР) (малой и средней мощности) и синхронные электродвигатели - в механизмах средней и большой мощности. Если прямой пуск (АДКР) невозможен, применяются асинхронные электродвигатели с фазным ротором (АДФР).

При мощности установок более 200-300 кВт предпочтение отдается синхронным двигателям в силу его ряда преимуществ:

1. Возможность выбора оптимального режима по реактивной энергии, что позволяет улучшить коэффициент мощности промышленного предприятия;
2. Меньшая чувствительность к колебаниям напряжения сети;
3. Абсолютно жесткая механическая характеристика.

Для крупных вентиляторных установок применение синхронных двигателей, даже при исключении регулирования скорости, оказывается не всегда возможным. Поскольку рассматриваемые механизмы обладают весьма значительным моментом инерции, то при пуске синхронных двигателей существующих серий в пусковой обмотке выделяются потери мощности, превышающие допустимые. Поэтому для приводов мощных вентиляторных с большим моментом инерции часто используется система двухдвигательного электропривода (рис. 9.3).

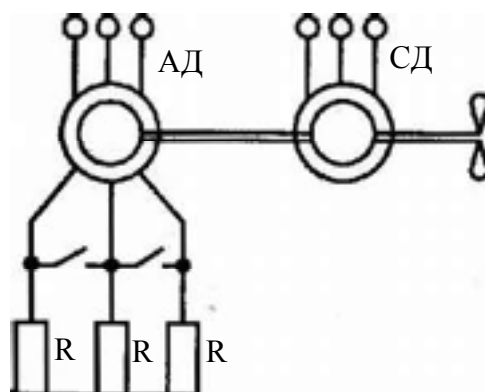


Рис. 9.3. Двухдвигательный синхронно-асинхронный электропривод.

Синхронный двигатель является главной приводной машиной агрегата и рассчитывается на полную мощность и скорость вентилятора. Асинхронный двигатель с фазным ротором служит для плавного пуска агрегата до половинной скорости, после чего статор АД отключается от сети. Мощность асинхронного двигателя может быть выбрана равной 15... 20 % номинальной мощности вентилятора, но по механической прочности асинхронный электродвигатель должен быть рассчитан на номинальную скорость синхронного электродвигателя. Вследствие наличия АД синхронный двигатель может включаться в сеть при половине номинальной скорости, за счет чего потери в его пусковой клетке снижаются примерно в четыре раза по сравнению с потерями при прямом пуске. Асинхронный двигатель позволяет также осуществить режим работы вентилятора при скорости  $0,5 \cdot \omega_n$  и малой нагрузке на валу. При этом СД может быть отключен.

Для механизмов центробежного типа, требующих регулирования подачи необходимый диапазон регулирования скорости обычно не превосходит 2:1. Отмеченные особенности данных механизмов и невысокие требования в отношении жесткости механических характеристик позволяют успешно применять для них простые схемы регулируемого асинхронного электропривода.

Для установок сравнительно небольшой мощности (7... 10 кВт) задача решается с помощью системы «тиристорный регулятор напряжения — асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором». В качестве регуляторов напряжения чаще всего используются тиристорные преобразователи. Такие системы нашли применение в комплексах вентиляторного оборудования, предназначенных для обеспечения требуемого воздухообмена и создания необходимых температурных условий в животноводческих и птицеводческих помещениях в соответствии с зооветеринарными нормами. Поддержание необходимого воздухообмена и требуемой температуры в помещении достигается

посредством автоматического плавного регулирования частоты вращения вытяжных вентиляторов в зависимости от изменения температуры воздуха вентилируемого помещения от заданного уровня. При отклонении температуры воздуха от заданной по сигналу датчика температуры на выходе устройства управления изменяется напряжение, чем достигается регулирование скорости вращения электродвигателей вентиляторов.

Достаточно просто можно реализовать импульсный способ регулирования скорости асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (п. 8.10). При плавном введении активного сопротивления в цепь статора существенно уменьшается критический момент асинхронного электродвигателя, но это обстоятельство хорошо согласуется с вентиляторной нагрузкой, тем самым обеспечивается плавное регулирование скорости вниз от номинальной.

В установках, где по условиям эксплуатации допустимо применение асинхронного двигателя с фазным ротором, возможности регулируемого электропривода расширяются. Введение дополнительного сопротивления в цепь ротора позволяет вывести часть потерь скольжения из обмоток двигателя. Благодаря этому снижается необходимое завышение габаритных размеров двигателя и появляется возможность расширить диапазон мощностей привода при рассмотренных выше способах регулирования скорости. Например, импульсный способ регулирования (п. 8.10) окажется более целесообразным применительно к коммутации дополнительного сопротивления в роторной цепи. По своим характеристикам данный способ аналогичен реостатному (п. 8.1). Его достоинство по сравнению с реостатным способом — возможность плавного регулирования сопротивления.

Наиболее востребованы в настоящее время регулируемые системы переменного тока с частотным регулированием в силу рассмотренных выше преимуществ.

Из систем электроприводов постоянного тока можно выделить систему на основе бесконтактного электродвигателя, так как они лишены основных недостатков электродвигателей, имеющих щеточно-коллекторный узел.

Для поршневых механизмов, работающих с переменной нагрузкой на валу, применяются синхронные двигатели: тихоходные с большой перегрузочной способностью, повышенным моментом инерции. Для механизмов поршневого типа перспективной системой электропривода является система с линейным асинхронным электродвигателем.

#### **9.4. Системы автоматизированных электроприводов механизмов непрерывного транспорта**

Механизмами непрерывного транспорта называются различные устройства, предназначенные для механизации вспомогательных операций транспортировки сырья, топлива, руды, деталей машин, товаров широкого потребления, кормов, а также людей. К таким механизмам в первую очередь следует отнести различные конвейеры (ленточные, пластинчатые, скребковые, ковшовые, цепные, винтовые), воздушные канатные дороги, эскалаторы, устройства пневматического и гидравлического транспорта, технологические линии по обработке изделий из полимеров, экструзивные линии и линии непрерывной вулканизации для нанесения покрытий на жилу кабеля или провода, кордные линии, протекторные и автокамерные агрегаты, линии для производства пленок и нанесения на них покрытий, агрегаты для производства листа и труб из пластмасс.

На технологических линиях сборных цехов автомобильных и машиностроительных заводов применяются специальные подвесные конвейеры, оборудованы грузозахватывающими приспособлениями.

Основной конструктивной частью машин непрерывного транспорта является замкнутый, непрерывно движущийся в процессе работы тяговый орган, выполненный из ленты специального изготовления (текстильной, прорезиновой), цепей или канатов. Применение той или иной конструкции тягового органа обуславливается характером перемещаемого груза, скоростью его движения и условиями окружающей среды. Сыпучие грузы перемещаются ленточными конвейерами, штучные - пластинчатыми, роликовыми, подвесными.

Среди конвейеров на промышленных предприятиях чаще других можно встретить ленточные и подвесные цепные конвейеры: первые - на металлургических заводах, горных разработках, топливоподачах электростанций, в строительной и пищевой промышленности, вторые - на машиностроительных заводах, химических красильных и других цехах.

Механизмы непрерывного транспорта проще по своему устройству и эксплуатации, чем краны и подъемники, имеющие циклический характер нагрузки. По количеству перемещаемых грузов и длине трасс механизмы непрерывного транспорта нередко могут успешно конкурировать с автомобильным и железнодорожным транспортом. Помимо перемещения грузов указанные механизмы используются и для перевозки пассажиров (эскалаторы, подвижные тротуары).

Рассмотрим основные особенности работы электропривода машин непрерывного транспорта. Для этих приводов характерна продолжительная работа в течение значительных промежутков времени

(смены или нескольких смен). Этим большинство электроприводов машин непрерывного транспорта резко отличается от других подъемно-транспортных машин, для которых характерен циклический повторно-кратковременный режим работы. Загрузка машины, транспортирование и снятие груза в машинах непрерывного транспорта осуществляются, как правило, без остановок самой машины и без пауз в ее работе. Это существенно сказывается на расчете и выборе двигателей. Для этих механизмов характерны относительно редкие пуски, которые обычно происходят несколько раз в сутки. Их продолжительность мало влияет на общую производительность механизма. Во многих случаях продолжительность пуска специально увеличивают, чтобы при разгоне уменьшить перегрузки, ускорение груза на ленте, просыпание его, а также пробуксовывание ленты.

Направление вращения механизмов и, следовательно, вала электропривода машин непрерывного транспорта не изменяется или изменяется редко. Так, конвейер обычно длительное время транспортирует сыпучие и кусковые материалы или штучные грузы в одном направлении, эскалатор также длительное время работает на подъем или опускание пассажиров и т. д. Лишь некоторые машины непрерывного транспорта, например, маятниковые канатные дороги, требуют частого реверса механизмов.

Конвейер, элеватор и другие машины непрерывного транспорта работают при определенной стабильной нагрузке. Переходы от холостого хода к предельным нагрузкам являются весьма редкими. Так, колебания нагрузки на эскалатор и ее повторяемость зависят от числа пассажиров, согласованности расписаний движения поездов и т. д. Еще более стабильна нагрузка на конвейеры, установленные на тепловых станциях, горнообогатительных и других комбинатах. Стабильна нагрузка линии непрерывного транспорта в машиностроении, приборостроении, при сборке радиоаппаратуры. Значительные перегрузки, особенно длительные, возникают в конвейерах, работающих на открытом воздухе в сложных атмосферных условиях. Они могут быть связаны со смерзанием материала, изменением температуры смазки механизмов.

Также большое значение при выборе системы управления электроприводом ленточных конвейеров имеет правильный расчет упругих деформаций тягового органа и ускорений, которые могут возникнуть при переходных процессах.

Рассмотрим графики изменения скорости при пуске двигателя на набегающей 1 и сбегавшей 2 ветвях ленты (рис. 9.4). Конвейер приводится в движение асинхронным короткозамкнутым двигателем, статический момент на валу двигателя принят постоянным. Характер

изменения скорости в ветвях 1 и 2 конвейера в значительной степени зависит от протяженности ленты.

При малой длине конвейера (около нескольких десятков метров) графики изменения скорости ветвей 1 и 2 во времени будут близки друг к другу (рис. 9.4.а).

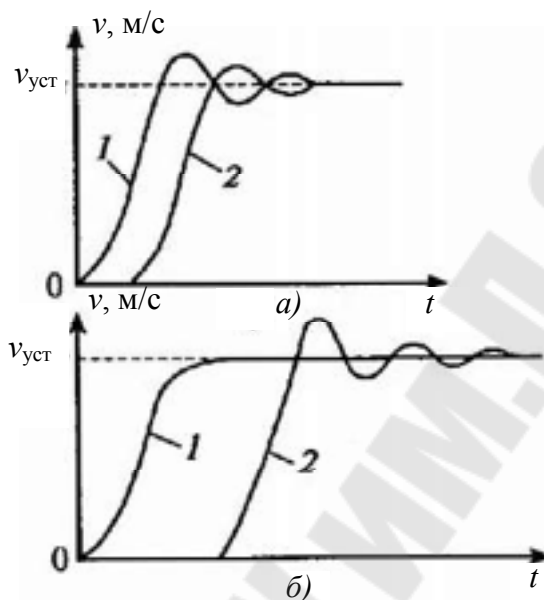


Рис. 9.4. Графики изменения скорости при пуске двигателя на набегающей 1 и сбегающей 2 ветвях ленты для конвейеров малой протяженности (а) и большой протяженности (б).

При этом ветвь 2 начинает двигаться с некоторым отставанием по отношению к ветви 1 за счет упругой деформации ленты, однако скорости ветвей довольно быстро выравниваются, правда, с некоторыми колебаниями.

Несколько иначе происходит пуск ленточных конвейеров большой протяженности (около сотен метров) (рис. 9.4.б). В этом случае трогание с места сбегающей ветви 2 конвейера может начаться после того, как приводной двигатель достигнет установившейся скорости. На ленточных конвейерах большой протяженности можно наблюдать отставание начала движения участков ленты на расстоянии 70... 100 м от набегающей ветви при установившейся скорости двигателя. При этом в ленте создается дополнительное упругое натяжение, а тяговое усилие к последующим участкам ленты прикладывается рывком. По мере достижения всеми участками конвейера установившейся скорости снижается упругое натяжение ленты. Возврат запасенной энергии может привести к возрастанию скорости ленты по сравнению с установившейся и к ее колебаниям. Такой характер переходного процесса в тяговом органе крайне нежелателен, так как приводит к повышенному износу ленты, а в



некоторых случаях и к ее разрыву. Все эти требования необходимо учитывать при выборе системы электропривода.

Наиболее распространенным типом электропривода механизмов непрерывного транспорта является нерегулируемый привод переменного тока на основе асинхронных или синхронных двигателей. Для установок, где не возникает необходимость регулирования скорости движения и момента при пуске находят применение асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором с двойной беличьей клеткой или глубоким пазом, обладающие повышенным пусковым моментом при относительно неизменном его значении в процессе пуска обеспечивающие меньший нагрев двигателя в условиях продолжительного пуска. Мощность привода с асинхронным короткозамкнутым ротором ограничивается обычно несколькими сотнями киловатт. Использование двигателей большей мощности приводит к заметному снижению коэффициента мощности питающей сети, а также к существенному падению напряжения в сети при пуске конвейера. Применение синхронного двигателя для более мощных установок позволяет существенно повысить энергетические показатели привода. Однако установки такой мощности (например, крупные ленточные и канатные конвейеры) обладают большой механической инерционностью и характеризуются тяжелым и продолжительным пуском, достигающим 30-100 с. Такой пуск может вызвать недопустимое превышение температуры синхронного двигателя, а также недопустимое снижение напряжения сети на относительно большом интервале времени разгона. Поэтому синхронные двигатели, несмотря на ряд их очевидных преимуществ, широкого распространения в качестве привода конвейерных установок не получили.

Проблема пуска мощных конвейеров успешно решается применением асинхронного двигателя с фазным ротором, при котором достигается ограничение пусковых токов и обеспечивается формирование требуемой пусковой характеристики привода. Переключение ступеней пусковых сопротивлений в процессе разгона двигателя вызывают скачкообразные изменения его момента в тем больших пределах, чем меньше число ступеней. Это может явиться причиной возникновения упругих механических колебаний и нарушить плавность переходных процессов. Поэтому при реостатном пуске асинхронного двигателя требуемое качество пуска обеспечивается только за счет увеличения числа пусковых ступеней, снижающего величину динамического момента. Это вынуждает использовать громоздкие релейно-контакторные панели с большим количеством тяжелой коммутирующей аппаратуры, поэтому чаще используют систему электропривода с тиристорным коммутатором в роторной цепи, которая в переходных процессах обеспечивает практически идеальное поддержание тока ротора

и момента двигателя на постоянном уровне, определяемом задающим напряжением.

Для конвейеров, где по условиям технологического процесса требуется длительный режим работы привода на низких скоростях, перспективна система тиристорный преобразователь частоты - асинхронный двигатель, в которой может осуществляться регулирование как скорости, так и ускорения.

Проблема согласованного движения конвейеров, входящих в единый производственный комплекс, успешно решается с помощью ЭП, выполненного по системе электрического вала. Практическое применение получил вариант синхронного вращения двигателей с общим асинхронным преобразователем частоты, показанный на рис. 9.5 применительно к двум синхронизированным конвейерным линиям. Схема обеспечивает синхронное вращение двигателей Д1 и Д2 не только в установившемся режиме, но и в процессе пуска. Угловое рассогласование двигателей определяется разностью моментов сопротивления на их валах.

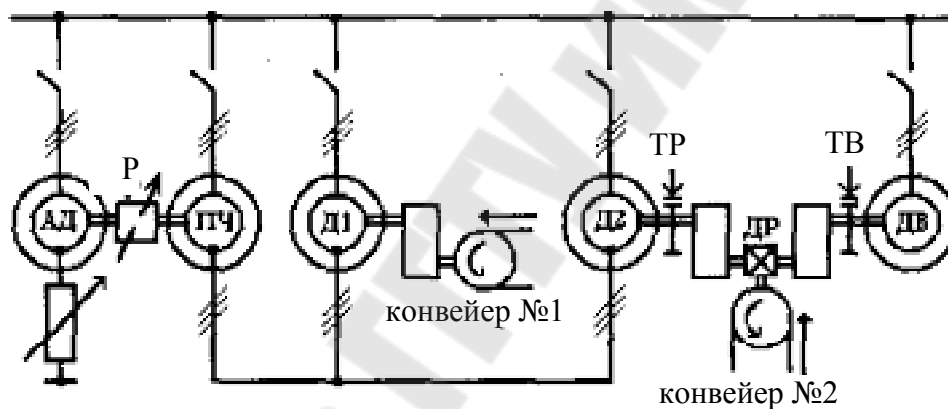


Рис. 9.5. Схема ЭП с асинхронным преобразователем частоты для согласованного движения конвейеров.

Для получения меньших углов рассогласования двигатели включены на вращения против поля. Согласованное регулирование скорости конвейеров осуществляется изменением скорости преобразователя частоты ПЧ либо путем переключения ступеней добавочного сопротивления в роторной цепи двигателя АД, вращающего преобразователь частоты, либо изменением передаточного отношения редуктора Р.

Синхронное вращение двигателей еще не обеспечивает строгого взаимного согласования положения транспортируемых разными конвейерами изделий, так как в процессе эксплуатации происходит вытяжка тягового элемента, неодинаковая для различных конвейеров. Это приводит к рассогласованию взаимного положения изделий, для устранения которого привод конвейера снабжен вспомогательным двигателем ДВ (рис. 9.5), соединенным с основным рабочим двигателем

Д2 через дифференциальный редуктор ДР. При отставании или опережении второй конвейерной линии двигатель ДВ освобождается от механического тормоза ТВ и включается на некоторое время, в результате чего происходит увеличение или уменьшение скорости конвейера и восстанавливается взаимное согласованное положение транспортируемых двумя конвейерами изделий. Мощность вспомогательного двигателя из-за малой его скорости незначительна и составляет 5-10% мощности рабочего двигателя. Вспомогательный привод может использоваться и самостоятельно в режиме малой скорости конвейера. При этом рабочий двигатель отключается от сети и затормаживается тормозом ТР.

Рассмотренная схема ЭП достаточно проста и надежна. Однако повышенная общая установленная мощность привода, превышающая примерно в 4 раза установленную мощность рабочих двигателей и повышенные потери электроэнергии, ограничивают область ее рационального применения установками небольшой мощности.

При высоких требованиях к точности согласованного движения конвейеров задача успешно решается использованием системы «тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока», в которой строгое согласование движения достигается работой электропривода в следящем режиме. Однако такая система электропривода оказывается гораздо сложнее, чем рассмотренная выше.

Для конвейеров, во многих случаях, перспективными являются системы с асинхронными двигателями и частотным управлением, асинхронные вентильные каскады. Применение линейных двигателей позволяет ликвидировать сложные и металлоемкие редукторные механические передачи и создать бесконтактные и безредукторные электроприводы.

## **Литература**

1. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 496 с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
3. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 697 с.
4. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. – СПб.: Энергоатомиздат, 2000. – 496 с.
5. Фираго Б.И. Теория электропривода: Б.И.Фираго, Л.Б. Павлячик – Мн.: ЗАО “Техноперспектива”, 2004 – 527с.
6. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода.- М: Энергия, 1979.– 616 с.

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| Введение .....   | 1  |
| 1. Механика электропривода .....   | 4  |
| 1.1. Приведение моментов, сил и жесткостей .....   | 4  |
| 1.2. Расчетные схемы механической части .....  | 7  |
| 1.3. Механические характеристики исполнительных механизмов .....   | 10 |
| 1.4. Уравнение движения электропривода .....   | 13 |
| 1.5. Режимы работы электропривода .....  | 15 |
| 1.6. Структурные схемы и динамические свойства механической части электропривода .....                       | 16 |
| 1.7. Переходные процессы в механической части электропривода .....   | 22 |
| 1.8. Переходные процессы при нелинейных зависимостях $M(t)$ и $M_C(t)$ .....                                 | 25 |
| 1.9. Переходные процессы в механической части с упругой связью ...   | 27 |
| 2. Динамические процессы в электромеханическом преобразователе .....   | 30 |
| 2.1. Обобщенная электрическая машина .....   | 30 |
| 2.2. Электромеханическая связь в электромеханическом преобразователе .....                                   | 34 |
| 2.3. Системы координат обобщенной электрической машины .....   | 35 |
| 2.4. Ограничения на процессы преобразования энергии в ЭМП .....  | 38 |
| 3. Электромеханические свойства электродвигателей .....  | 39 |
| 3.1. Естественные и искусственные характеристики. Виды изменения переменных .....                            | 39 |
| 3.2. Обобщенная модель машины постоянного тока независимого возбуждения .....                                | 40 |
| 3.3. Основные характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения .....                       | 44 |
| 3.4. Естественные и искусственные характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения .....   | 47 |
| 3.5. Пуск и торможение двигателя постоянного тока независимого возбуждения .....                             | 50 |
| 3.6. Структурные схемы двигателя постоянного тока независимого возбуждения .....                             | 53 |
| 3.7. Описание электромеханических процессов в двигателе постоянного тока последовательного возбуждения ..... | 56 |
| 3.8. Статические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения .....               | 58 |
| 3.9. Искусственные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения .....             | 60 |
| 3.10. Торможение двигателя постоянного тока последовательного возбуждения .....                              | 63 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.11. Особенности двигателя смешанного возбуждения .....  | 65  |
| 3.12. Математическое описание электромеханических процессов в асинхронном электродвигателе .....      | 66  |
| 3.13. Описание статических режимов асинхронного двигателя .....                                       | 68  |
| 3.14. Статические характеристики асинхронного двигателя .....   | 69  |
| 3.15. Искусственные характеристики асинхронного двигателя .....                                       | 72  |
| 3.16. Динамические свойства асинхронного двигателя .....  | 76  |
| 3.17. Электромеханические свойства синхронного двигателя .....  | 78  |
| 3.18. Динамические свойства синхронного двигателя .....   | 81  |
| 4. Энергетика электропривода .....  | 82  |
| 4.1. Потери энергии в статических режимах .....   | 82  |
| 4.2. Потери энергии в переходных процессах .....  | 84  |
| 4.3. Нагрев и охлаждение электродвигателей .....  | 86  |
| 4.4. Нагрузочные диаграммы .....  | 88  |
| 4.5. Общий порядок выбора электродвигателей .....   | 89  |
| 4.6. Номинальные режимы электродвигателей .....   | 90  |
| 4.7. Методы выбора электродвигателей по мощности .....  | 92  |
| 4.8. Учет ухудшения условий охлаждения .....  | 95  |
| 4.9. Выбор электродвигателя для продолжительного режима .....   | 96  |
| 4.10. Выбор электродвигателя для кратковременного режима .....  | 96  |
| 4.11. Выбор электродвигателя для повторно-кратковременного режима .....                               | 98  |
| 5. Разомкнутая электромеханическая система .....  | 98  |
| 5.1. Уравнения и структурные схемы .....  | 98  |
| 5.2. Обобщенная электромеханическая система с линеаризованной характеристикой .....                   | 101 |
| 5.3. Динамические свойства электромеханической системы с линеаризованной характеристикой .....        | 102 |
| 5.4. Устойчивость статического режима .....   | 105 |
| 6. Электромеханические переходные процессы .....  | 106 |
| 6.1. Виды процессов и методы их анализа .....   | 106 |
| 6.2. Переходные процессы при линейной механической характеристике ЭП .....                            | 108 |
| 6.3. Наброс нагрузки .....  | 112 |
| 6.4. Скачок задания .....   | 113 |
| 6.5. Переходные процессы, при управляющем воздействии, изменяющемся во времени: $\omega_0=f(t)$ ..... | 116 |
| 6.6. Переходные процессы при нелинейных механических характеристиках .....                            | 119 |
| 6.7. Особенности анализа переходных процессов в системах ЭП с СД и АД .....                           | 120 |
| 7. Регулирование координат ЭП .....   | 120 |

|  |  |
|--|--|
| 7.1. Общие понятия.....  | 120                                    |
| 7.2. Показатели регулирования.....   | 121                                    |
| 7.3. Система управляемый преобразователь - двигатель (обобщенная система УП–Д) ..... | 122                                    |
| 7.4. Система генератор-двигатель (Г–Д) .....   | 123                                    |
| 7.5. Система тиристорный преобразователь – двигатель (ТП–Д) .....                    | 126                                    |
| 7.6. Система широтно-импульсный преобразователь – двигатель (ШИП–Д).....             | 128                                    |
| 7.7. Система преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ–АД).....            | 129                                    |
| 7.8. ЭП с вентильным двигателем (бесколлекторным двигателем) ...                     | 131                                    |
| 8. Регулирование момента и тока .....  | <b>Ошибка! Закладка не определена.</b> |
| 8.1. Реостатное регулирование момента и тока   | <b>Ошибка! Закладка не определена.</b> |
| 8.2. Система источник тока – двигатель (ИТ–Д)  | <b>Ошибка! Закладка не определена.</b> |
| 8.3. Автоматическое регулирование момента и тока в системе УП–Д.....                 | <b>Ошибка! Закладка не определена.</b> |
| 9. Регулирование скорости.....   | 131                                    |
| 9.1. Реостатное регулирование .....  | 131                                    |
| 9.2. Регулирование ДПТ с шунтированием якоря .....                                   | 132                                    |
| 9.3. Регулирование скорости в системе УП-Д .....                                     | 133                                    |
| 9.4. Автоматическое регулирование скорости ДПТ в системе УП-Д .....                  | 134                                    |
| 9.5. Регулирование скорости ДПТ изменением магнитного потока ..                      | 136                                    |
| 9.6. Система, работающая в режиме пуска, торможения и реверса ...                    | 137                                    |
| 9.7. Анализ динамики систем с переменной структурой.....                             | 140                                    |
| 9.8. Параметрические способы регулирования скорости АД.....                          | 142                                    |
| 9.9. Особенности реализации способов регулирования скорости АД.....                  | 143                                    |
| 9.10. Автоматическое реостатное регулирование скорости АД .....                      | 145                                    |
| 9.11. Законы частотного регулирования.....   | 147                                    |
| 9.12. Особенности построения частотных ЭП .....                                      | 149                                    |
| 9.13. Частотное регулирование скорости АД с векторным принципом управления .....     | 153                                    |
| 9.14. Каскадные схемы регулирования скорости асинхронных электроприводов .....       | 155                                    |
| 9.15. Многодвигательный электропривод. Особенности и выравнивание нагрузки.....      | 159                                    |
| 9.16. Регулирование скорости многодвигательного ЭП.....                              | 161                                    |
| Литература .....   | 194                                    |
| Содержание .....   | 195                                    |

**Захаренко Владимир Сергеевич**  
**Козлов Андрей Владимирович**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД  
РАБОЧИХ МАШИН  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**Курс лекций  
по одноименной дисциплине  
для студентов специальности 1-43 01 03  
«Электроснабжение (по отраслям)»  
дневной и заочной форм обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 23.11.11.

Рег. № 50Е.

E-mail: [ic@gstu.by](mailto:ic@gstu.by)  
<http://www.gstu.by>