

Министерство образования Республики Беларусь

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

Кафедра «Автоматизированный электропривод»

С. И. Захаренко

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

ПОСОБИЕ

**по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-53 01 05
«Автоматизированные электроприводы»
дневной и заочной форм обучения
В двух частях
Часть 1**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2009

УДК 62.83(075.8)
ББК 31.291я73
3-38

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
факультета автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 10 от 26.06.2007 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Промышленная электроника»
ГГТУ им. П. О. Сухого *В. Д. Ежов*

Захаренко, С. И.

3-38

Теория электропривода : пособие по одноим. дисциплине для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» днев. и заоч. форм обучения : в 2 ч. Ч. 1 / С. И. Захаренко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. – 115 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-854-1.

Излагаются основные вопросы отдельных разделов теории электропривода: механика электропривода, обобщенная электрическая машина, электромеханические свойства электродвигателей, энергетика электропривода.

Для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» дневной и заочной форм обучения.

УДК 62.83(075.8)
ББК 31.291я73

ISBN 978-985-420-854-1 (ч. 1)
ISBN 978-985-420-855-8

© Захаренко С. И., 2009
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2009

ВВЕДЕНИЕ

Понятие «*электропривод*» можно рассматривать как:

- 1) процесс приведения в движение машин и механизмов с помощью электрической энергии;
- 2) устройство, обеспечивающее данный процесс;
- 3) теорию, 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 «электропривод» (ЭП), в которое входят ЭМП и силовой преобразователь оказывает существенное влияние как на конструкцию рабочей машины, так и на технологический процесс.

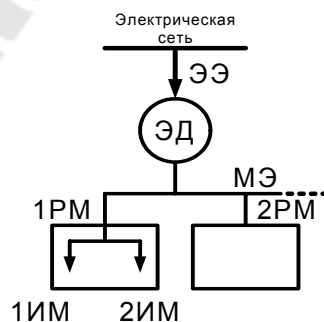


Рис. 1

Рассмотрим этапы развития электропривода и оценим его влияние на технологические машины. Первые образцы электрического привода появились в конце 19 в. 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 электродвигателя (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**.

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 ее ИМ (рис. 2):

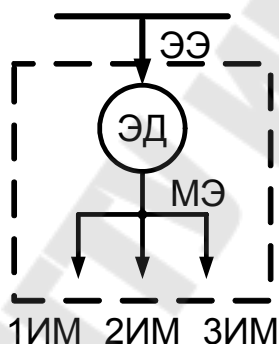


Рис. 2

Дальнейшим развитием явился индивидуальный ЭП, при котором каждый ИМ приводится в действие отдельным ЭД, или даже несколькими (**многодвигательный**) (рис. 3):

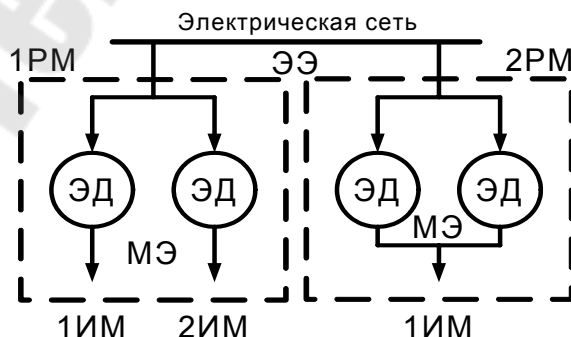


Рис. 3

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:

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 ее основе сигналов управления преобразовательным, электродвигательным и передаточным устройствами.

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

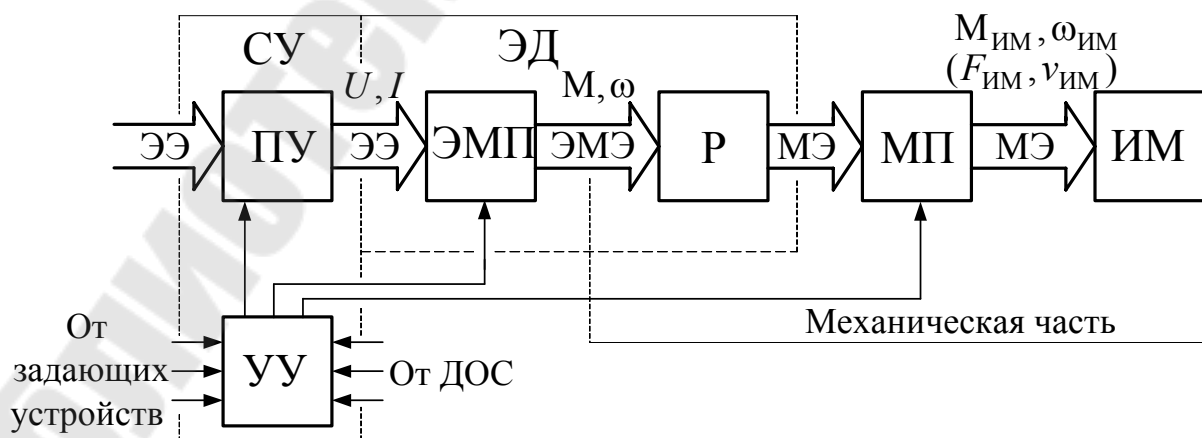


Рис. 4

На рисунке 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 ω , т. е. вырабатывает электромагнитную энергию, передаваемую в реальный ротор (Р); МП – механическая передача, преобразовательное устройство (ПУ) – силовая часть системы управления (СУ); управляющее устройство (УУ) – слаботорочная информационная часть СУ, 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 расчетной скорости – к угловой скорости ЭД ω , т. е. составляют приведенную расчетную схему.

Условием соответствия приведенной расчетной схемы реальной механической системе является выполнение закона сохранения энергии, т. е. равенство запасенных кинетической 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 $(k + 1)$ – элементом механической связью, обладающей жесткостью c_k , а поступательно движущийся элемент с массой m_j связан с $j + 1$ 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:

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

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

Для поступательно движущегося j -го элемента:

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

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

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

$$d\varphi_{кпр} = i_k \cdot d\varphi_k \text{ и } d\varphi_{jпр} = \frac{ds_j}{\rho_j}, \text{ а при линейных механических}$$

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

$$\varphi_{кпр} = i_k \cdot \varphi_k \text{ и } \varphi_{jпр} = \frac{s_j}{\rho_j}.$$

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

$$M_k \cdot d\varphi_k = M_{кпр} \cdot d\varphi_{кпр}, \quad M_{кпр} = \frac{M_k}{i_k}$$

$$\text{и } F_j \cdot ds_j = M_{jпр} d\varphi_{jпр}, \quad M_{jпр} = F_j \cdot \rho_j.$$

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

$$c_j = \frac{F_p}{\Delta s},$$

где $M_{кр}$, F_p – соответственно крутящий момент и усилие растяжения или сжатия, а $\Delta\varphi_k$ и Δs – деформации механических связей.

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

$$\frac{c_k \cdot \Delta\varphi_k^2}{2} = \frac{c_{кпр} \cdot \Delta\varphi_{кпр}^2}{2},$$

$$\text{откуда } c_{кпр} = \frac{c_k}{i_k^2}, \text{ при линейной деформации } \frac{c_j \cdot \Delta s_j^2}{2} = \frac{c_{jпр} \cdot \Delta\varphi_{jпр}^2}{2}$$

$$\text{и } c_{jпр} = c_j \cdot \rho_j^2.$$

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_C 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 приведенный момент: $M_{\text{кпр}} = \frac{M_k}{i_k \cdot \eta_k}$.

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

$$-M'_{\text{кпр}} = \frac{-M'_k}{i'_k} \cdot \eta'_k,$$

где η'_k – КПД передачи при обратном направлении потока, т. к. 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 ΔM – момент механических потерь в ЭД, составляющий $\Delta M = (0,01 \div 0,05)M_H$ и которым в некоторых практических случаях можно пренебречь.

1.2. Расчетные схемы механической части

Механическая часть ЭМС, т. е. 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 (рис. 5):

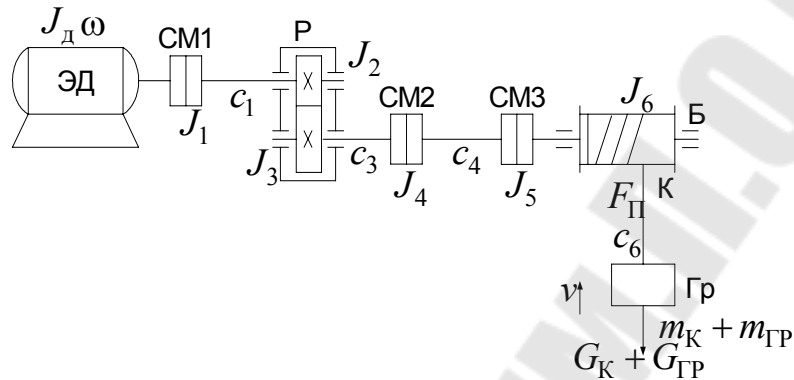


Рис. 5

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 $G_{гр}$; $F_п$ – усилие натяжения каната, определяемое $G_k + G_{гр}$.

Рассмотрим порядок составления расчетных схем. Для их составления предварительно все движущие массы, моменты, усилия и жесткости 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.

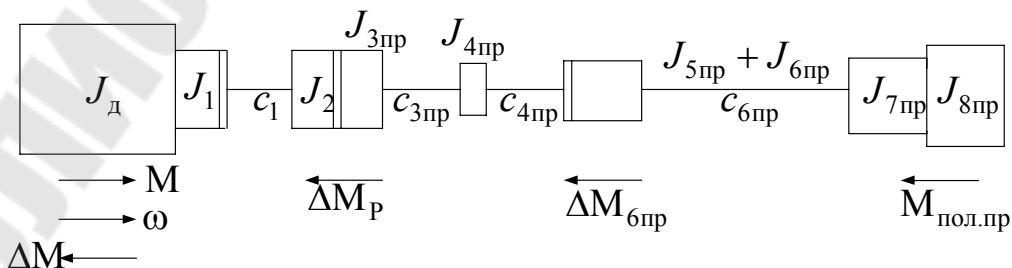


Рис. 6

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

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 $M_{\text{пол}}$ определяется весом каната и груза. $\Delta M_{\text{Б.пр}}$ 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. 7):

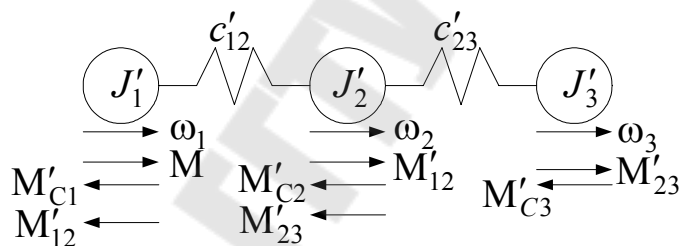


Рис. 7

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

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

Моменты инерции обобщенной схемы:

$$J'_1 = J_{\text{д}} + J_1 + J_2 + J_{3\text{пр}} + J_{4\text{пр}};$$

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

Статические моменты:

$$M'_{\text{C1}} = \Delta M + \Delta M_{\text{р}}; \quad M'_{\text{C2}} = \Delta M_{\text{Б.пр}}; \quad M'_{\text{C3}} = M_{\text{пол.пр}}.$$

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:

$$M'_{12} = c'_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) \text{ и } M'_{23} = c'_{23} (\varphi_2 - \varphi_3),$$

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 (рис. 8, а):

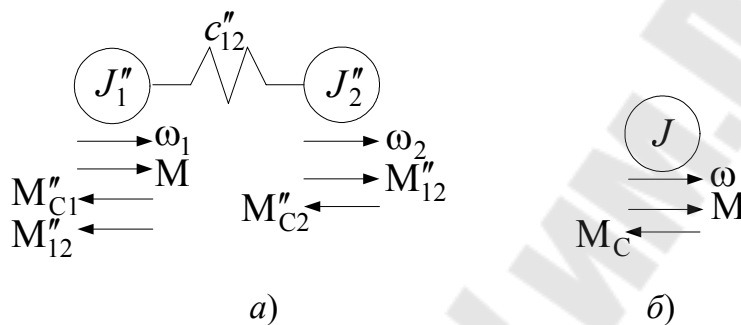


Рис. 8

Параметры данной схемы:

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

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

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

Наименьшая жесткость 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 (рис. 8, б):

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

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 (рис. 9), где J_1 – ЭД и жестко связанные с ним элементы цепи; J_2 – канатоведущий шкив; J_3 – кабина с грузом; J_4 – противовес.

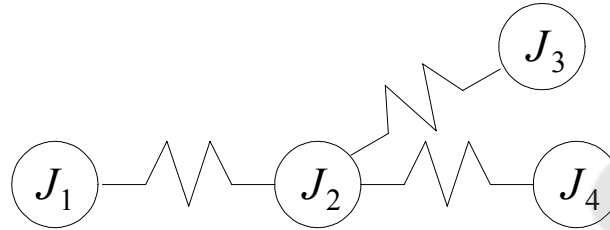


Рис. 9

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 исключение упругого взаимодействия, создают статическую нагрузку. В одномассовой схеме они объединены:

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

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:

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

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 (рис. 10).

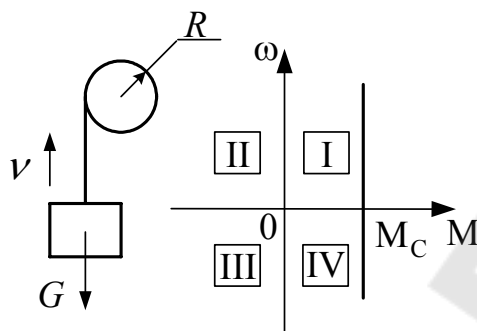


Рис. 10

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:

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

где 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.

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

$$M_C = F_z \cdot R = \text{const},$$

где F_z – сила резания (рис. 11).

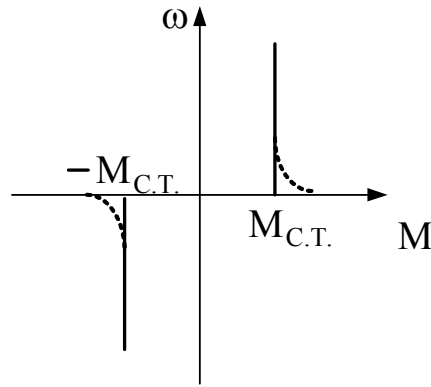


Рис. 11

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 ω_1, ω_2 – скорости на входе и выходе упругой связи; β_{12} – коэффициент пропорциональности (коэффициент внутреннего трения).

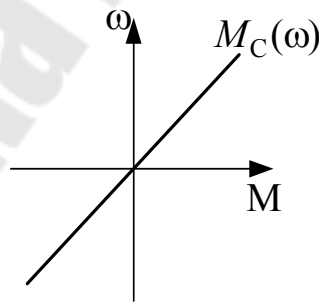


Рис. 12

Следует различать еще 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 проис-

ходит поглощение энергии колебаний. Их величина зависит от скорости (например, вязкое трение).

3. **Вентиляторная нагрузка.** Подобной характеристикой обладает идеальный центробежный вентилятор (без противодействия и трения) (рис. 13):

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

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

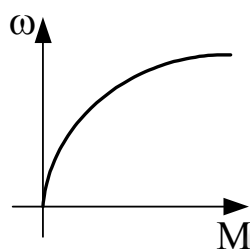


Рис. 13

4. **Конвейерная нагрузка.** Она характерна для механизмов с большим числом гнезд трения и с учетом 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:

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

где φ_2 – угол поворота вала кривошипа.

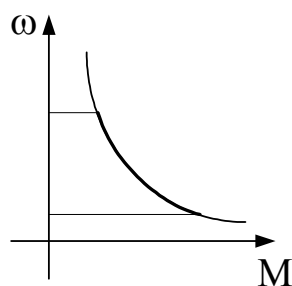


Рис. 14

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

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

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.

1.4. Уравнение движения электропривода

Механическая часть ЭП представляет собой систему твердых 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 обобщенные координаты q_i и обобщенные скорости \dot{q}_i ; $Q_i = \frac{\delta A_i}{\delta q_i}$ – обобщенные 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 возьмем линейными, тогда M_C и J не зависят от угла поворота φ (схема на рис. 15):

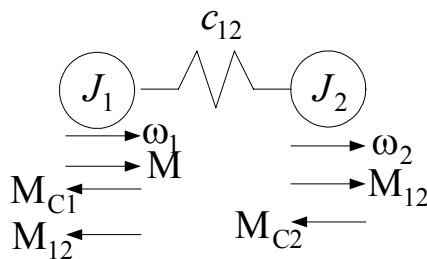


Рис. 15

$$\text{Запас кинетической энергии } W_K = \frac{J_1 \omega_1^2}{2} + \frac{J_2 \omega_2^2}{2}.$$

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

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

Обобщенная сила, приложенная к первой массе:

$$Q_1 = M - M_{C1} - M_{12}.$$

Аналогично, для второй массы: $Q_2 = M_{12} - M_{C2}$.

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

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

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

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

Для одномассовой системы, имеющей скорость ω и момент инерции J , получаем:

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

Откуда уравнение движения:

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

Выражение (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.

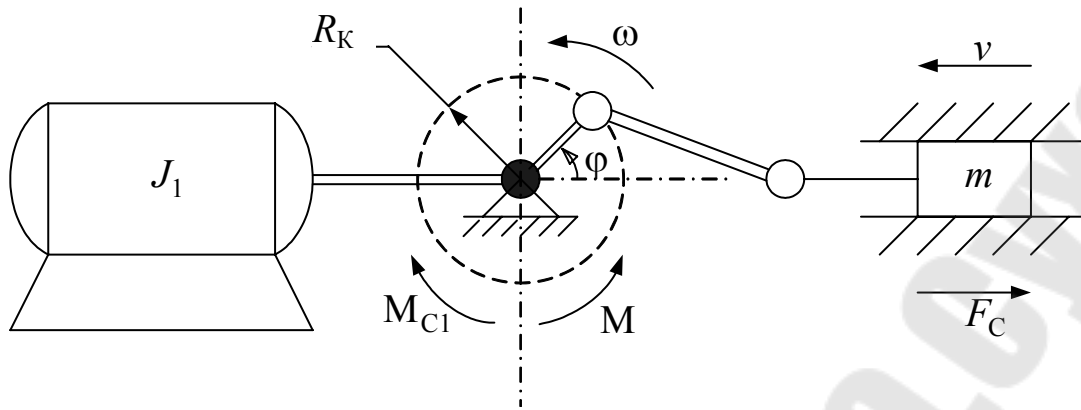


Рис. 16

Вал кривошипа приведен к скорости двигателя ω . 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:

$$J_{пр}(\varphi) = m \cdot \rho^2(\varphi) \text{ и суммарный } J(\varphi) = J_1 + J_{пр}(\varphi),$$

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: $M_C(\varphi) = M_{C1} + F_C \rho(\varphi)$ и обобщенная сила $Q = M - M_C(\varphi)$. Используем уравнение Лагранжа (1.4). Частные производные: $\frac{\partial W_K}{\partial \omega} = J(\varphi) \cdot \omega$,

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

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

Для рассмотрения 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, является выполнение неравенства $d\omega/dt \neq 0$. 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 $d\omega/dt = 0$. 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 (рис. 17):

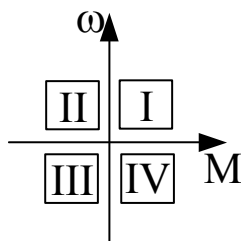


Рис. 17

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

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

1.6. Структурные схемы и динамические свойства механической части электропривода

I. Двухмассовая схема с линейными связями изображена на рис. 18:

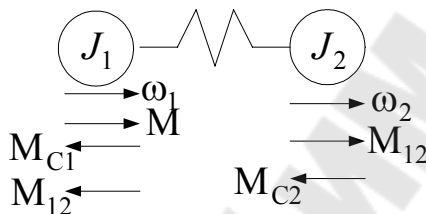


Рис. 18

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 ω_1 и ω_2 , а из 3-го M_{12} :

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

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

По полученным выражениям составим структурную схему со входным сигналом в виде M и выходным — ω_2 (скорость РО) (рис. 19):

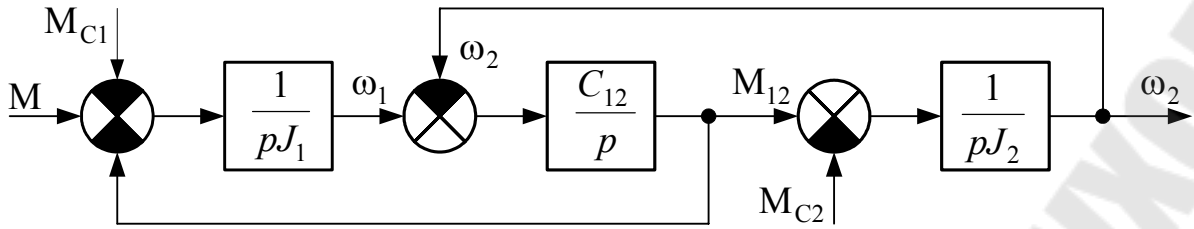
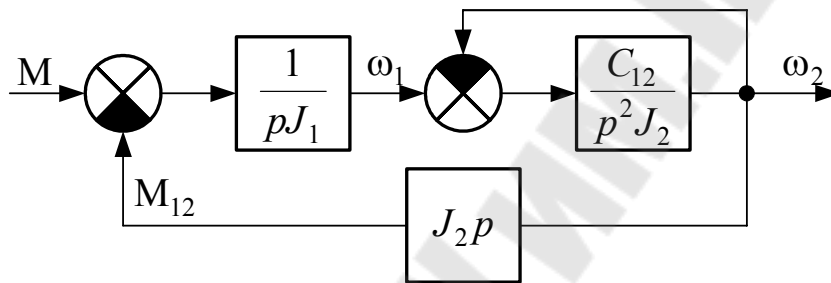


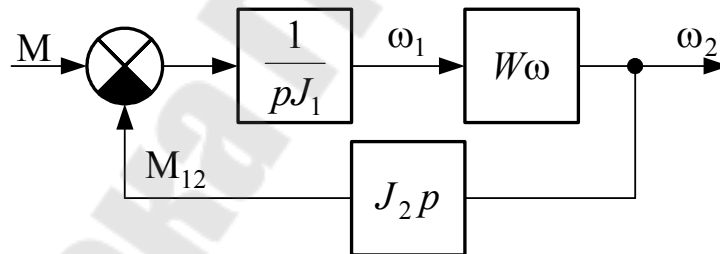
Рис. 19

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

Преобразуем схему (рис. 20):



а)



б)

Рис. 20

ПФ звена $W_ω$, связывающего скорости РО $ω_2(p)$ и ЭД:

$$W_ω(p) = \frac{ω_2(p)}{ω_1(p)} = \frac{1}{J_2 \frac{p^2}{c_{12}} + 1} = \frac{c_{12}}{J_2 \cdot p^2 + c_{12}}.$$

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

$$\Phi(p) = \frac{1}{W_o + 1/W_{пр}}.$$

Для скорости ЭД схему можно представить в следующем виде (рис. 21):

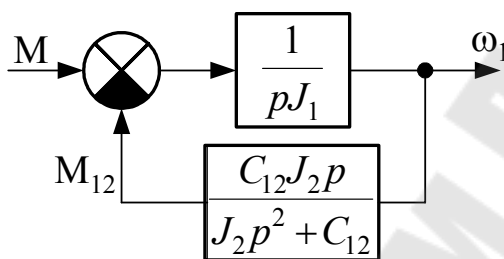


Рис. 21

ПФ будет выражен следующим образом:

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

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

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

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

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

и

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

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

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

где $\gamma = \frac{J_\Sigma}{J_1}$ – коэффициент соотношения масс, а $\Omega_{12} = \sqrt{\frac{c_{12} \gamma}{J_2}}$ – частота собственных колебаний механической части, т. е. резонансная частота кинематической цепи.

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

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

$$W\omega_1(p) = \frac{\omega_1(p)}{M(p)} = \frac{\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 + 1}{J_\Sigma p \left(\frac{1}{\Omega_{12}^2} p^2 + 1 \right)} = \frac{1}{J_\Sigma p} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{\Omega_{12}^2} p^2 + 1 \right)} \cdot \left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 + 1 \right); \quad (1.8)$$

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

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

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

Рассмотрим динамические свойства.

А. Проанализируем, как ведет 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_{Φ} (прямые линии – асимптоты звеньев), и затем суммарная $L\omega_1$ (рис. 22):

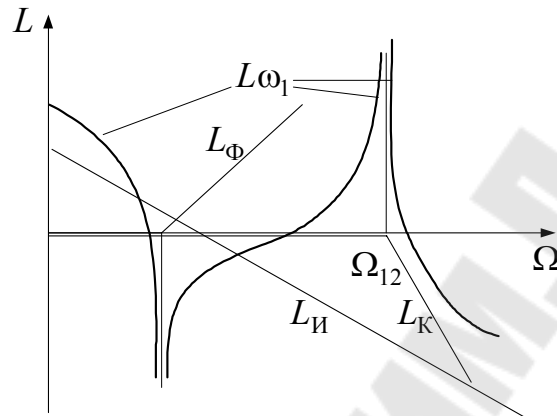


Рис. 22

При частоте Ω_{Φ} 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 Ω_{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 ведет себя как интегрирующее звено и при $M = \text{const}$ скорость ЭД ω_1 должна расти линейно с наложением колебаний, определяемых упругой связью.

2. При приближении частоты колебаний электромагнитного момента M к частоте Ω_{12} амплитуда колебаний скорости ω_1 должна стремиться к бесконечности. Однако наличие форсирующего звена оказывает существенное ограничивающее влияние. Так, при $J_1 \gg J_2$ γ стремится к 1, и к 1 стремится произведение $W_K \cdot W_{\Phi}$. В результате резонанс для скорости ω_1 исключается.

Б. Поведение второй массы проанализируем по (1.9). ЛАЧХ ($L\omega_2$) образуется характеристиками двух звеньев: интегрирующего и колебательного. Вид характеристик представлен на рис. 23:

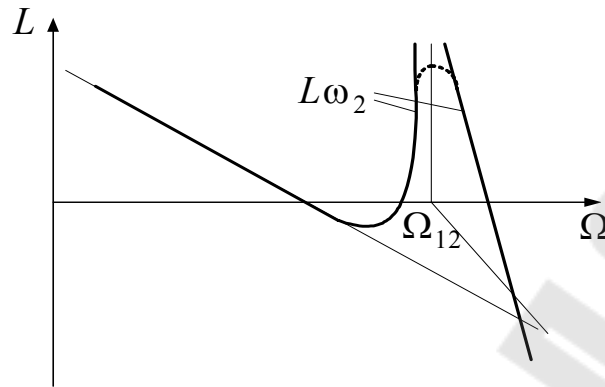


Рис. 23

На движение второй массы форсирующее звено не влияет. На частоте Ω_{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 Ω_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:

$M_{вн} = \beta_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2)$, 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 $p_{2,3} = -\alpha_{вн} \pm \sqrt{\alpha_{вн}^2 - \Omega_{12}^2}$.

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

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

II. Одномассовая схема.

Уравнение движения в операторной форме $M - M_C = Jp\omega$, а ПФ: $W(p) = \frac{\omega(p)}{M(p)} = \frac{1}{Jp}$. Структурная схема на рис. 24.

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

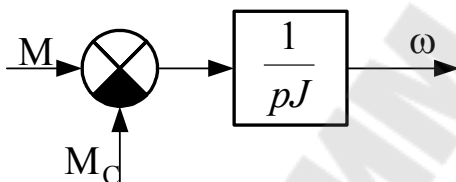


Рис. 24

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 $M = \text{const}$ и $M_C = \text{const}$. Уравнение

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

$d\omega = \frac{M - M_C}{J} \cdot dt$. Интегрируем $\int_{\omega_{\text{нач}}}^{\omega} d\omega = \int_0^t \frac{M - M_C}{J} \cdot dt$. 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 $M_{\text{Д}} = M_1 - M_{\text{С}}$ и ЭП равномерно разгоняется (рис. 25):

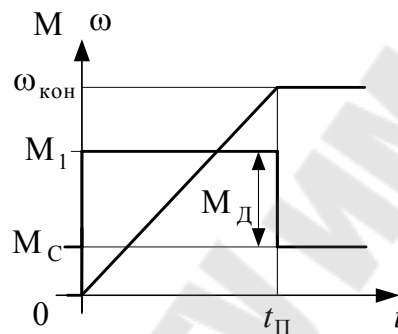


Рис. 25

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

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

Торможение

Предшествующее установившееся состояние $M(-0) = M_{\text{С}}$, $\omega(-0) = \omega_{\text{нач}}$. При $t = 0$ момент ЭД меняется до значения $M = -M_1$. Динамический момент при торможении $M_{\text{Д}} = -M_1 - M_{\text{С}}$, а ускорение $\varepsilon = -\frac{(M_1 + M_{\text{С}})}{J}$. Для остановки с реактивным $M_{\text{С}}$ при $\omega = 0$ момент ЭД должен стать $M = 0$, и время торможения

$$t_{\text{Т}} = \frac{-\omega_{\text{нач}}}{-(M_1 + M_{\text{С}})} \cdot J.$$

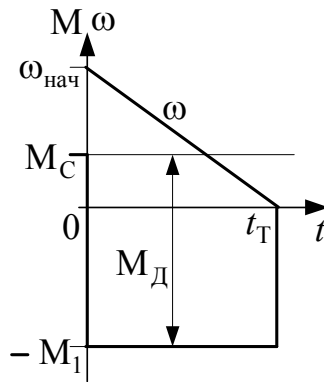


Рис. 26

Реверс

В зависимости от характера нагрузки возможны два варианта:

1-й вариант: M_C – активный и не зависит 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. 27):

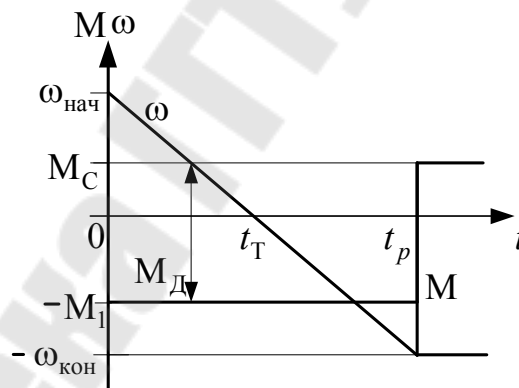


Рис. 27

Динамический момент и ускорение остаются неизменными $M_Д = -(M_1 + M_C)$, $\varepsilon = \frac{-(M_1 + M_C)}{J}$. По окончании реверса, когда $\omega = -\omega_{кон}$, момент ЭД изменяется до значения M_C . Длительность реверса:

$$t_p = t_T + t_{II} = \frac{(-\omega_{кон}) - \omega_{нач}}{-(M_1 + M_C)} \cdot J.$$

2-й вариант: M_C реактивный. При переходе скорости через нулевое значение момент M_C изменяет знак. Ускорение при торможении $\varepsilon_T = -\frac{M_1 + M_C}{J}$, а при разгоне

$$\varepsilon_{II} = \frac{-M_1 + M_C}{J}.$$

Диаграмма на рис. 28.

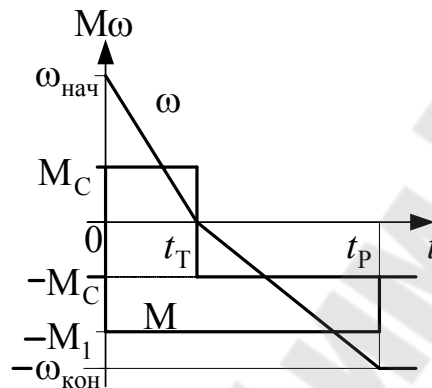


Рис. 28

Время реверсирования:

$$t_P = \frac{-\omega_{нач}}{-(M_1 + M_C)} J + \frac{-\omega_{кон}}{-M_1 + M_C} J.$$

1.8. Переходные процессы при нелинейных зависимостях $M(t)$ и $M_C(t)$

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

$$M_D = M(t) - M_C = \Delta M_{II} \cdot e^{-t/T_1},$$

где T_1 – постоянная времени, определяющая длительность пуска.

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

$$\int_{\omega_{нач}}^{\omega} d\omega = \int_0^t \frac{M(t) - M_C}{J} dt = \int_0^t \frac{\Delta M_{II}}{J} \cdot e^{-t/T_1} \cdot dt = \varepsilon_{нач} \int_0^t e^{-t/T_1} \cdot dt.$$

В результате:

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

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 $M_C = M_{C0} + (M_{CH} - M_{C0}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2$, или при более сложных нели-

нейностях, аналитические решения нецелесообразны по трудоемкости 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 $M_{Ди} = (M - M_C)_i = M_{Ди\text{ ср}} = \text{const}$. Затем для каждого участка решают уравнение движения в конечных приращениях:

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

Построение графика $\omega(t)$ производится с припасовыванием отдельных решений Δt , то есть на плоскости $t\omega$ откладывают время Δt_i для участков $\Delta\omega_i$ и получают $\omega(t)$ в виде ломаной линии, которую затем сглаживают (рис. 29):

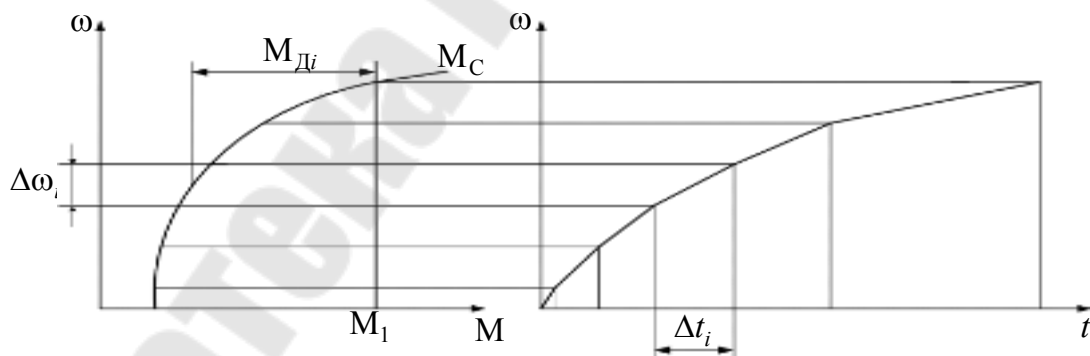


Рис. 29

Исходя из рассмотренных примеров, отметим, что изменение скорости во времени определяется зависимостями $M(t)$, $M_C(t)$, и т. к. $M_C(t)$ 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 $M(0) = M_1 = \text{const}$. Уравнение движения при условии $M_{C1} = M_{C2} = 0$ записывается

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

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

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

Операторное уравнение:

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

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

Дифференциальная форма:

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

С учетом, что $M_1 = \text{const}$:

$$\frac{1}{\Omega_{12}^2} \cdot \frac{d^3\omega_1}{dt^3} + \frac{d\omega_1}{dt} = \varepsilon_{\text{ср}},$$

где $\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{M_1}{J_{\Sigma}}$.

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

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

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

а производная решения:

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

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

Из первого уравнения исходной системы находим:

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

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

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

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

В итоге решение (1.11) :

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

Выражение (1.12) представляет закон движения первой массы при ступенчатом управляющем воздействии. Изменение упругого момента $M_{12}(t)$ определим из первого уравнения исходной системы

$$M_{12}(t) = M_1 - J_1 \frac{d\omega_1}{dt}. \quad \text{С учетом, что } M_1 = J_\Sigma \varepsilon_{\text{cp}} = (J_1 + J_2) \varepsilon_{\text{cp}},$$

$M_{12}(t) = (J_1 + J_2) \varepsilon_{\text{cp}} - J_1 \varepsilon_{\text{cp}} - J_2 \varepsilon_{\text{cp}} \cos \Omega_{12} t$ и окончательно получаем:

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

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

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

Выражение в скобках:

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

Окончательно:

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

Графики движения и M_{12} при условии $J_1 = J_2$ представлены на рис. 30.

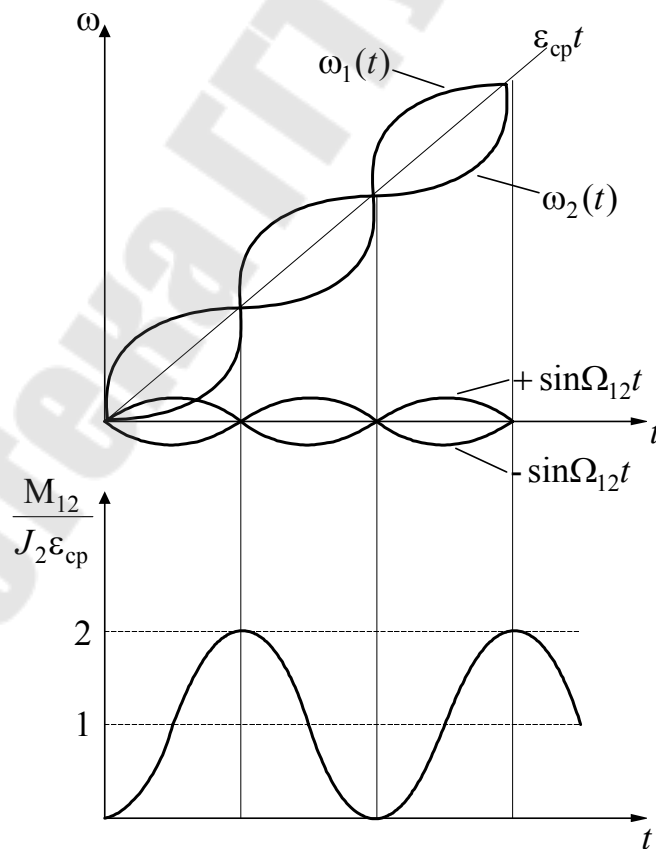


Рис. 30

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 $M_{\text{Дср}} = J_2 \varepsilon_{\text{ср}}$.

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

1.10. Контрольные вопросы

1. На чем основано и как проводится приведение к скорости ЭД масс и моментов инерции движущихся элементов?
2. Как приводятся к скорости ЭД моменты и силы статического сопротивления и производится учет потерь энергии в кинематической цепи?
3. Какими параметрами характеризуются схемы трех-, двух- и одномассовой механической части и как они определяются?
4. Какие статические нагрузки могут присутствовать в исполнительных механизмах?
5. Как описывается движение двух- и одномассовой механической части с линейными связями?
6. В чем особенность уравнения движения ЭП при нелинейных механических связях?
7. В каких режимах может работать ЭП?
8. Какими динамическими звеньями представляется двухмассовая механическая часть?
9. Как выглядят логарифмические частотные характеристики механической части ЭП?
10. Какой характер движения механической части при постоянных моментах?
11. Как анализируются переходные процессы при нелинейных механических характеристиках?
12. Какой характер движения двухмассовой механической части в переходных процессах?

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 ω (рис. 31): однако такая модель ЭД достаточно громоздкая, поэтому, когда допустимо, используют эквивалентную двухфазную модель – т. н. **обобщенную электрическую машину (ЭМ)**.

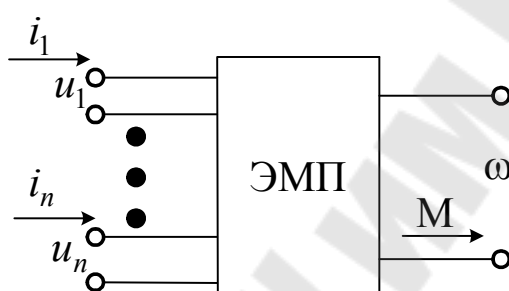


Рис. 31

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 количества 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- или 3-фазную, неподвижную или вращающуюся.

Исходная схема обобщенной машины:

α, β – оси координат связанные со статором (рис. 32);

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 φ реальной машины связаны через число пар полюсов p_d , как и соответствующие скорости ротора:

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

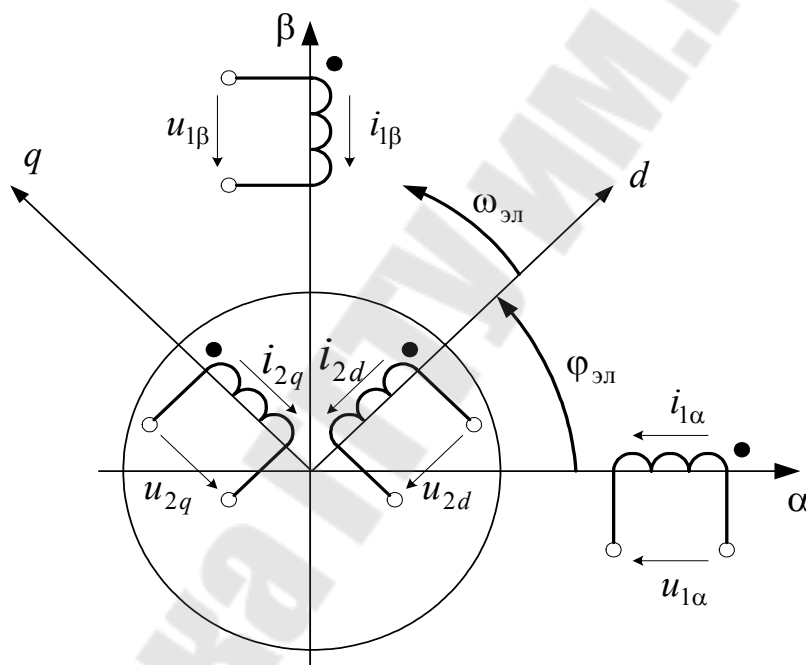


Рис. 32

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:

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

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

ψ_i – потокосцепление i -й 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 2π эл. рад.

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

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

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

Система (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, т. е. 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:

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

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

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

В соответствии с (2.4) можно представить, что напряжение подведенное к i -й обмотке уравновешивается падением напряжения Ri , ЭДС само- и взаимной индукции $L \frac{di}{dt}$, которые определяются изменением запаса электромагнитной энергии, и т. н. ЭДС вращения:

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

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

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)

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

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

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

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

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 ко-

эфициенты в виде тригонометрических функций. Они вызывают дополнительную нелинейность математической модели ЭД. Для исключения коэффициентов используют преобразование переменных к одной системе координат, т. е. переходят к модели, у которой обмотки статора и ротора не меняют взаимного расположения. Рассмотрим преобразование переменных к общей системе uv , вращающейся с некоторой скоростью ω_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 \bar{X}_1 в системе координат $\alpha\beta$, связанной со статором и получение его составляющих в осях uv , представим на рис. 33.

Просуммировав проекции по осям, получим формулы прямого преобразования:

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

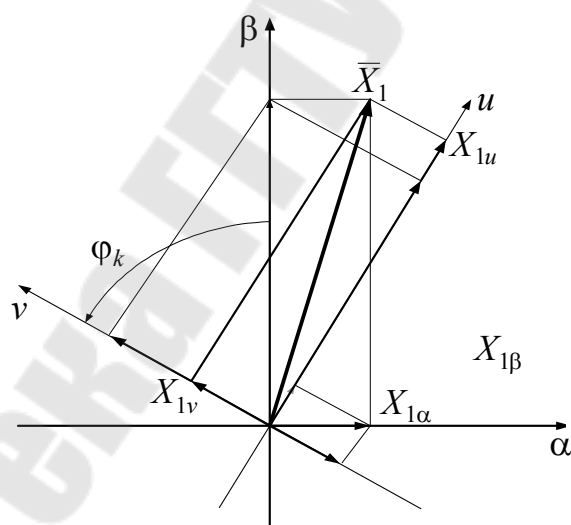


Рис. 33

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

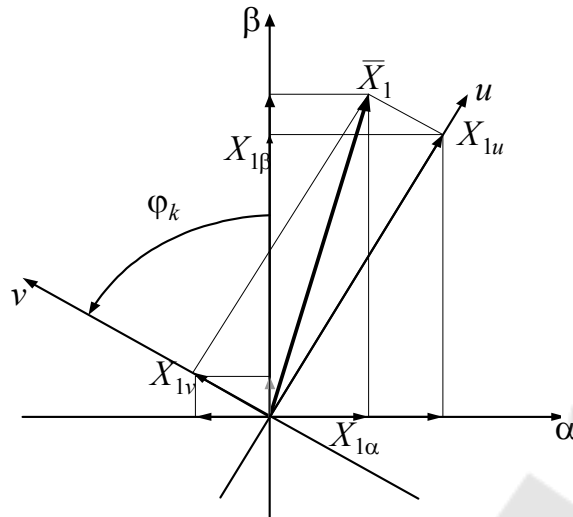


Рис. 34

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

Для получения преобразованных уравнений необходимо провести в них замену реальных переменных с помощью формул обратного преобразования. Для примера ограничимся уравнениями электрического уравнения статора, т. е. 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 также сложив, получим уравнение для оси v . Аналогично поступая для роторных цепей, получаем уравнение электромеханической характеристики ОМ в осях uv :

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

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. XU – 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: $I^2 R$. 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 превышать номинальное значение при его работе в номинальном, т. е. 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:

$$\lambda = \frac{M_{\text{доп}}}{M_{\text{H}}}, \quad \lambda_I = \frac{I_{\text{доп}}}{I_{\text{H}}}.$$

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 $0,9 \cdot U_{\text{H}}$:

$$\lambda = 0,8 \cdot \frac{M_{\text{K}}}{M_{\text{H}}},$$

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** ($di_{\text{я}} / dt$). В зависимости от мощности двигателя допустимые значения производной:

- для ЭД малой и средней мощности $\frac{di_{\text{я}}}{dt} \leq (30 \div 50) \cdot \frac{I_{\text{H}}}{\text{с}}$;
- для ЭД большой мощности $\frac{di_{\text{я}}}{dt} \leq (20 \div 30) \cdot \frac{I_{\text{H}}}{\text{с}}$.

2.5. Контрольные вопросы

1. Выполнение каких допущений позволяет перейти при описании процессов от реальной к обобщенной электрической машине?
2. Как описываются процессы преобразования энергии в обобщенной электрической машине?
3. В чем заключается сущность электромеханической связи в ЭМП?
4. Какие системы координат используются для математических моделей ЭД?
5. Чем вызваны ограничения на процессы преобразования энергии в ЭМП?

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 под воздействием нагрузки по его характеристикам. Например, с увеличением нагрузки от значения M_{C1} до M_{C2} скорость уменьшается от ω_{C1} до ω_{C2} (рис. 35):

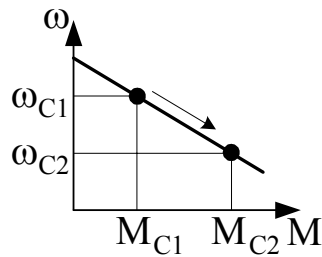


Рис. 35

2. Регулирование – получение новых искусственных характеристик по требованию технологического процесса. Например, при работе ЭД на естественной характеристике (M_e) в точке с координатами M_{C1}, ω_{C1} с вентиляторной нагрузкой, имеющей представленную на рис. 36 характеристику $M_C(\omega)$, необходимо уменьшить скорость вентилятора до значения ω_{C2} . Это потребует изменить характеристику двигателя (получить искусственную – $M_{и}$).

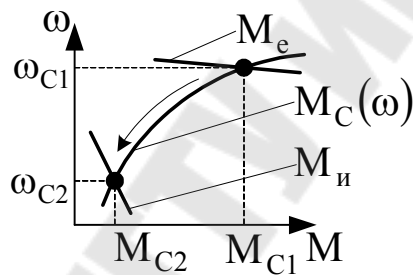


Рис. 36

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 ω_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).

Представим схему включения обобщенной ЭМ для модели ДПТ НВ (рис. 37):

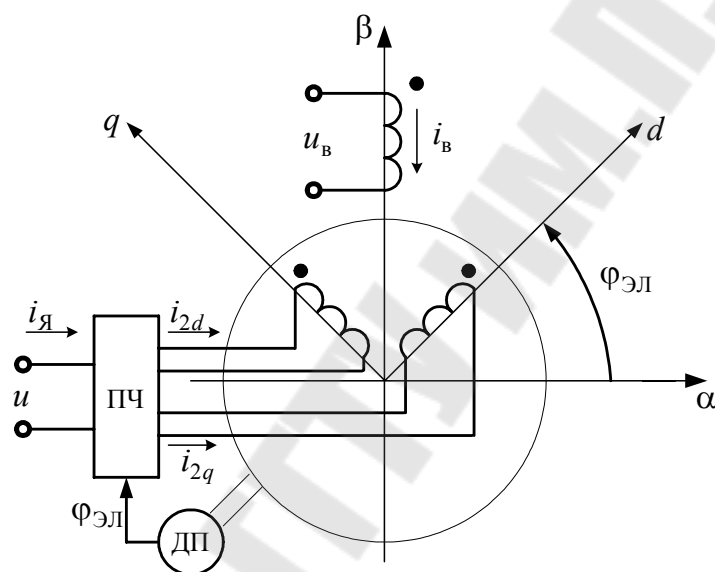


Рис. 37

Обмотка статора включена на напряжение возбуждения: $u_{1\beta} = u_{\beta}$, $i_{1\beta} = i_{\beta}$. 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:

$$i_{2d} = i_{я} \cdot \cos \omega_{эл} t ;$$

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

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

$$\left. \begin{aligned} i_{2\alpha} &= i_{\text{я}} \cdot \cos^2 \omega_{\text{эл}} t + i_{\text{я}} \cdot \sin^2 \omega_{\text{эл}} t = i_{\text{я}}, \\ i_{2\beta} &= i_{\text{я}} \cos \omega_{\text{эл}} t \cdot \sin \omega_{\text{эл}} t - i_{\text{я}} \cdot \sin \omega_{\text{эл}} t \cdot \cos \omega_{\text{эл}} t = 0. \end{aligned} \right\}$$

Таким образом, переменные токи обмоток ротора эквивалентны постоянному току якоря $i_{\text{я}}$, протекающему по одной обмотке, расположенной по оси α . НС от этого тока неподвижна в пространстве и направлена по оси α – 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 (рис. 38):

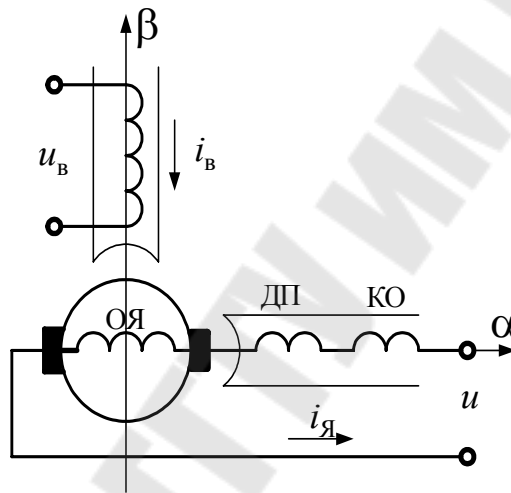


Рис. 38

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

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

В соответствии со схемой модели:

$$u_{1\alpha} = u_{2\beta} = 0, \quad i_{1\alpha} = i_{2\beta} = 0; \quad u_{1\beta} = u_{\text{в}}, \quad i_{1\beta} = i_{\text{в}}, \quad u_{2\alpha} = u, \quad i_{2\alpha} = i_{\text{я}};$$

$$R_{1\beta} = R_{\text{в}}, \quad R_{2\alpha} = R_{\text{ОЯ}} + R_{\text{ДП}} + R_{\text{КО}} + R_{\text{ЩК}} = R_{\text{Яд}}, \quad L_{1\beta} = L_{\text{в}} = \text{const},$$

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

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

Потокосцепление обмоток:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{1\beta} &= L_{1\beta}i_{1\beta} + L_{12}i_{2\beta} = L_{1\beta}i_{1\beta} = L_{\text{в}}i_{\text{в}}; \\ \Psi_{2\alpha} &= L_{12}i_{1\alpha} + L_{2\alpha}i_{2\alpha} = L_{2\alpha}i_{2\alpha} = L_{\text{Яд}}i_{\text{я}}; \\ \Psi_{2\beta} &= L_{12}i_{1\beta} + L_{2\beta}i_{2\beta} = L_{12}i_{\text{в}}. \end{aligned} \right\}$$

Теперь уравнение механической характеристики:

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

Если машина работает на линейном участке кривой намагничивания $L_{12} = \text{const}$, то 3-е слагаемое второго уравнения представляет собой ЭДС вращения $e = \omega_{\text{эл}}L_{12}i_{\text{в}}$, или суммируя по окружности во всех проводниках:

$$e = \frac{1}{2\pi} \frac{p_{\text{д}}}{a} N\Phi\omega,$$

где $p_{\text{д}}$ – число пар полюсов; N – число проводников в якоре; a – число пар параллельных ветвей; Φ – магнитный поток одного полюса.

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

$$e = k\Phi\omega; \quad (3.2)$$

$$M = k\Phi i_{\text{я}}. \quad (3.3)$$

Окончательно описание электромеханических процессов в ДПТ НВ:

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

3.3. Основные характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

На схемах включения ДПТ показывать обмотки ДП и КО не будем. Используем следующие изображения (рис. 39):

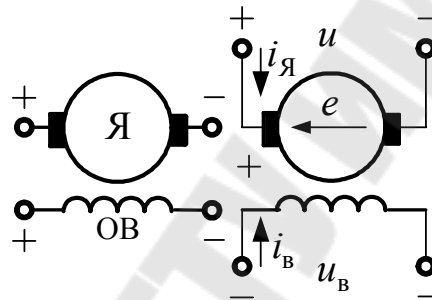


Рис. 39

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 $\Phi \cdot i_{Я}$. Они проявляются в динамических режимах с $\Phi = \text{var}$. Для основной массы режимов с $\Phi = \text{const}$ можно обозначить через постоянный коэффициент произведение: $c = k\Phi = \text{const}$. Из (3.4) получаем выражения для электромеханической и механической характеристик:

$$\omega = \frac{u}{k\Phi} - \frac{R_{Яд}}{k\Phi} \cdot i_{Я} - \frac{L_{Яд}}{k\Phi} \cdot \frac{di_{Я}}{dt} \quad (3.5)$$

и

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

Для статических режимов ($d/dt = 0$):

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

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

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

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

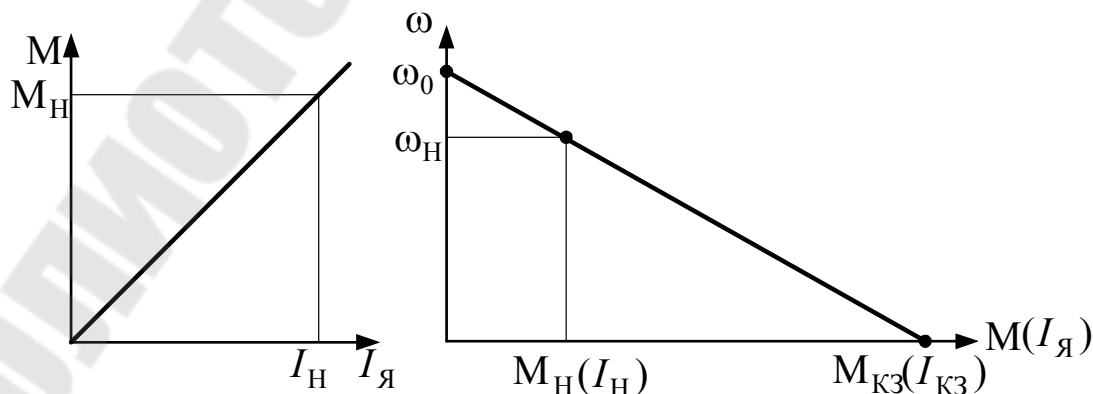


Рис. 40

Для оценки электромеханических свойств и вида характеристик используют следующие показатели:

1. Статизм характеристики – относительное изменение скорости при изменении нагрузки в пределах $M_C = 0 - M_H$:

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

где ω_H – скорость соответствующая номинальной нагрузке ($M_C = M_H$).

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

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

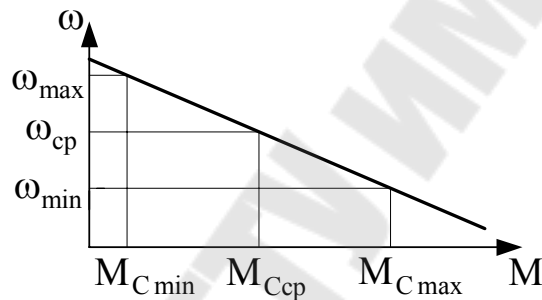


Рис. 41

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

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

или при линейной характеристике:

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

Для ДПТ НВ:

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

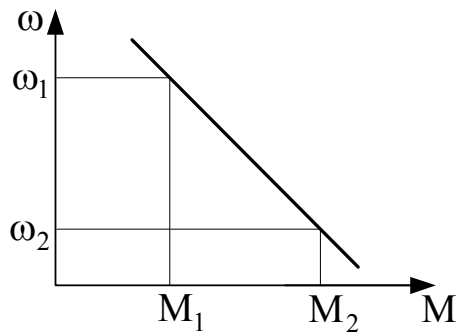


Рис. 42

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:

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

В зависимости от значений статизма различают 4 вида характеристик ЭД: а – абсолютно жесткая – $s_x = 0$, $\beta = \infty$; б – жесткая – $s_x \leq 5\%$; в – мягкая – обычно $s_x = (5-15)\%$; г – абсолютно мягкая – $s_x = \infty$, $\beta = 0$.

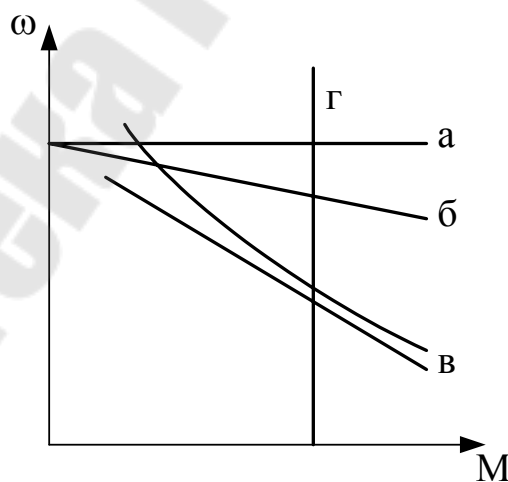


Рис. 43

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 (--- на рис. 44):

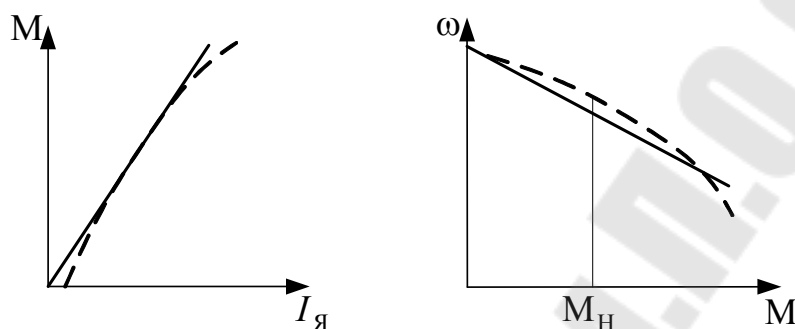


Рис. 44

Из-за влияния реакции якоря в механической характеристике может присутствовать участок с положительной жесткостью ($\frac{\Delta M}{\Delta \omega} > 0$), а при больших нагрузках сказывается уменьшение момен-

та и увеличение коэффициента $\frac{R_{яд}}{(k\Phi)^2}$.

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 (рис. 45).

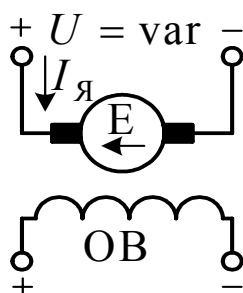


Рис. 45

Получение искусственных характеристик достигается уменьшением напряжения. При этом остаются неизменным отклонение скорости от идеального холостого хода $\Delta\omega = \frac{R_{\text{яд}}}{c^2} \cdot M$ и модуль жесткости $\beta = \frac{c^2}{R_{\text{яд}}}$. Скорость идеального холостого хода $\omega_0 = \frac{U}{c}$ пропорциональна напряжению. В результате искусственные характеристики располагаются параллельно естественной (рис. 46):

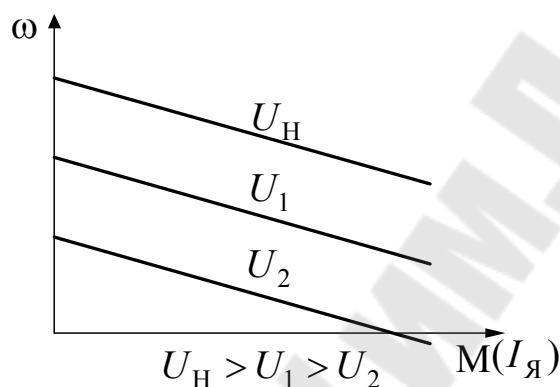


Рис. 46

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

2. *Реостатное регулирование.* При введении добавочного сопротивления $R_{\text{доб}}$ в цепь якоря (схема на рис. 47) наклон характеристик увеличивается, т. е. характеристики смягчаются: $\omega_0 = \text{const}$, а отклонение скорости $\Delta\omega = \frac{R_{\text{я}}}{c^2} M$ увеличивается (здесь $R_{\text{я}} = R_{\text{доб}} + R_{\text{яд}}$ – полное сопротивление якорной цепи).

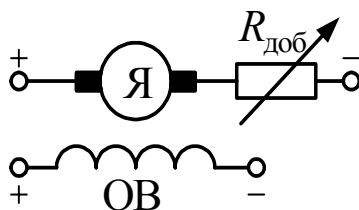


Рис. 47

Уменьшается модуль жесткости $\beta = \frac{c^2}{R_{\text{я}}}$, а статизм характери-

стик $s_x = \frac{\Delta\omega_{\text{H}}}{\omega_0} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{H}}}{\omega_0}$, увеличивается и их вид (рис. 48):

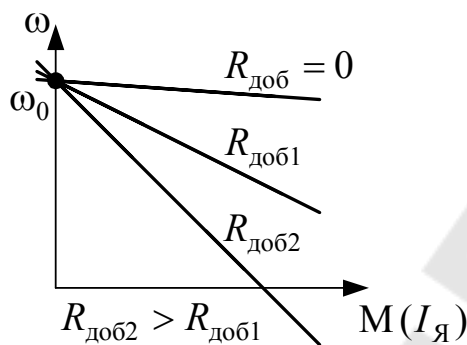


Рис. 48

Рассмотрим энергетическую сторону. Уравнение электрического равновесия для якорной цепи $U = \kappa\Phi\omega + I_{\text{я}}(R_{\text{яд}} + R_{\text{доб}})$ умножим на ток якоря $I_{\text{я}}$. В результате получим:

$$UI_{\text{я}} = \kappa\Phi I_{\text{я}}\omega + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} \text{ или } P_1 = M\omega + \Delta p_v,$$

где Δp_v – переменные потери в цепи якоря.

Если при регулировании $M_{\text{с}} = \text{const}$, то $I_{\text{я}} = \text{const}$ и потребляемая мощность $P_1 = U \cdot I_{\text{я}} = \text{const}$, а диаграмма регулирования $P(\omega)$ выглядит следующим образом (рис. 49):

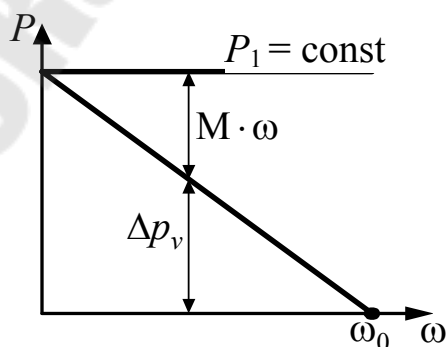


Рис. 49

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. Диапазон регулирования скорости $D_\omega \leq 5$ при $M = M_H$.

3. *Регулирование изменением магнитного потока.* Представим кривую намагничивания в виде зависимости $\Phi(I_B)$ (рис. 50):

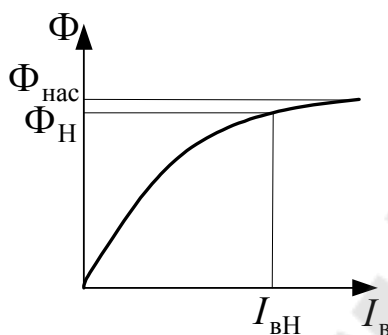


Рис. 50

Номинальное значение магнитного потока Φ_H незначительно отличается от значения $\Phi_{нас}$ при насыщении магнитной системы, поэтому регулирование производится уменьшением тока возбуждения и потока. При этом скорость холостого хода $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$ возрастает, а момент жесткости уменьшается и характеристики смягчаются. Статизм характеристик изменяется в меньшей мере, чем при реостатном регулировании. Для построения искусственных характеристик можно воспользоваться точкой короткого замыкания: $I_{кз} = \frac{U}{R_{яд}} = \text{const}$, а $M_{кз} = k\Phi I_{кз}$ уменьшается пропорционально потоку. Характеристики представлены на рис. 51.

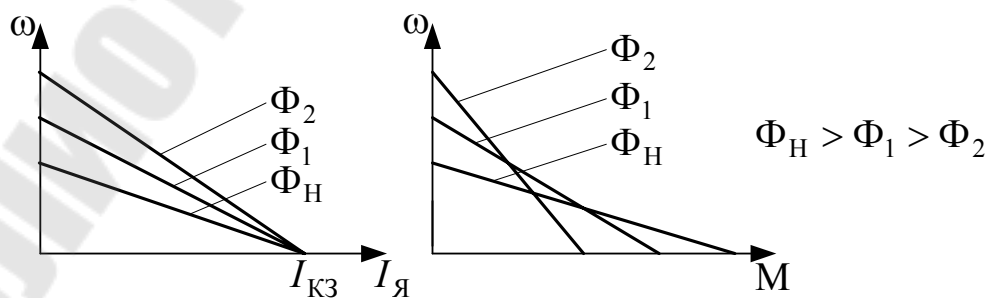


Рис. 51

С уменьшением магнитного потока основных полюсов усиливается действие реакции якоря. Поэтому кратковременно допустимый ток $I_{\text{доп}}$ и перегрузочная способность $\lambda_1 = \frac{I_{\text{доп}}}{I_{\text{H}}}$ уменьшаются. Если не учитывать незначительное изменение постоянных потерь мощности в ЭД, то его нагрев во всем диапазоне регулирования будет определяться допустимыми переменными потерями $\Delta p_{\text{вн}} = I_{\text{H}}^2 R_{\text{яд}}$, тогда длительно допустимый по условиям нагрева момент $M_{\text{дл.доп}} = k\Phi I_{\text{H}}$ с уменьшением потока уменьшается. Скорость увеличивается, а допустимая мощность $P_{\text{дл.доп}} = M_{\text{дл.доп}} \omega = \text{const}$.

Данный способ применяется как в разомкнутых, так и в замкнутых ЭП для получения $\omega > \omega_{\text{H}}$, или для регулирования при постоянстве мощности.

3.5. Пуск и торможение двигателей постоянного тока независимого возбуждения

При питании ЭД от сети с $U_{\text{C}} = \text{const}$ 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 $\frac{E}{k\Phi} > \frac{U}{k\Phi}$. При этом $I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}} < 0$ и $M < 0$ становится тормозным. Электрическая мощность $P_1 = U \cdot I_{\text{я}} < 0$. 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 (рис. 52):

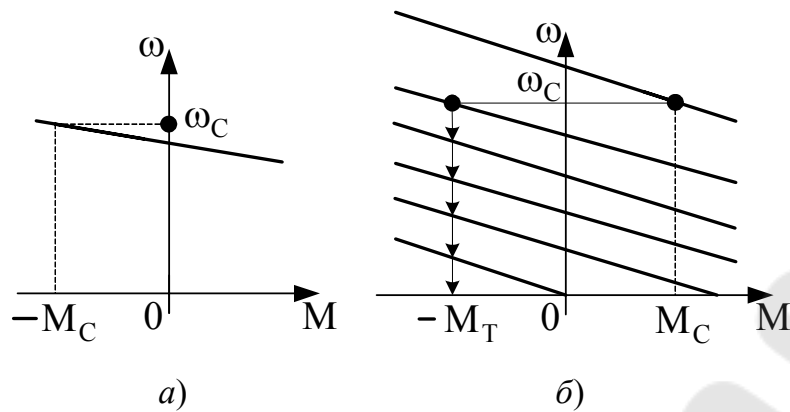


Рис. 52

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 (рис. 53)).

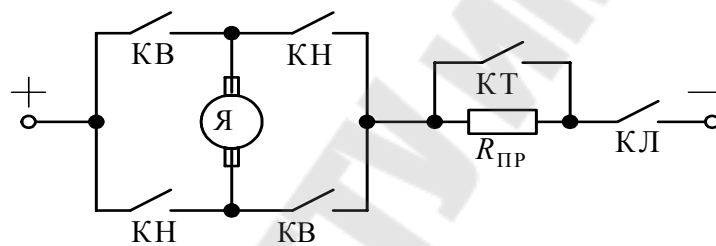


Рис. 53

После коммутации контактов (KB – разомкнулись, KH – замкнулись) двигатель переходит с характеристики 1 на характеристику 2 во второй квадрант с участком торможения – ab (рис. 54):

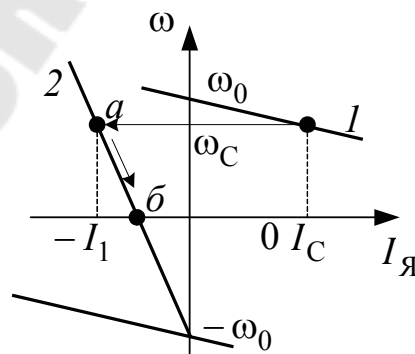


Рис. 54

Для ограничения тока при противовключении контактор КТ размыкает контакты, вводя $R_{пр}$.

Такой режим используется и при тормозном спуске тяжелого груза (четвертый квадрант: точка a на характеристике 2) (рис. 55):

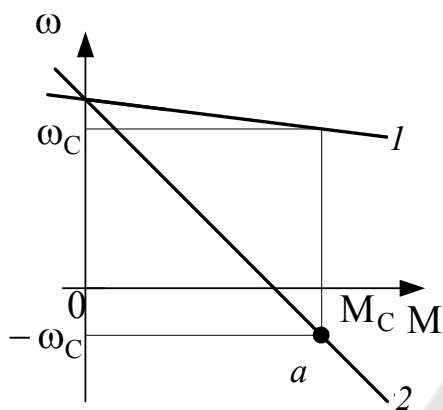


Рис. 55

Сопротивление ступени противовключения:

$$R_{\text{пр}} = \frac{-U - c\omega_C}{-I_1} - R_{\text{яд}} \quad \text{или} \quad R_{\text{пр}} = \frac{U - c(-\omega_C)}{I_C} - R_{\text{яд}}.$$

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 энергия рассеивается в цепи якоря.

3. *Динамическое торможение* соответствует режиму автономного генератора с независимым возбуждением. Схема включения и вид характеристик с участком торможения $a0$ (рис. 56):

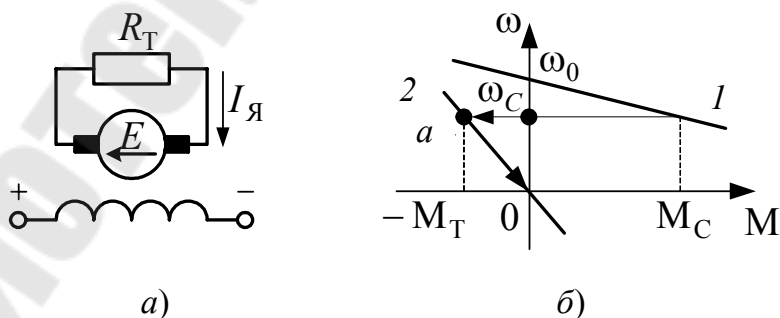


Рис. 56

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

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

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

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{в}} &= R_{\text{в}}(T_{\text{в}}p + 1)i_{\text{в}} \\ \Phi &= k_{\text{в}}i_{\text{в}} \\ u - e &= R_{\text{Яд}}(T_{\text{Яд}}p + 1)i_{\text{Я}} \\ M &= \mathcal{L}\{k\Phi i_{\text{Я}}\} \\ e &= \mathcal{L}\{k\Phi\omega\} \end{aligned} \right\},$$

где i , u , Φ , M – являются функциями оператора p ; $\mathcal{L}\{ \}$ – 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:

$$\left. \begin{aligned} i_{\text{в}} &= \frac{1/R_{\text{в}}}{T_{\text{в}}p + 1} u_{\text{в}} \\ \Phi &= k_{\text{в}}i_{\text{в}} \\ i_{\text{Я}} &= \frac{1/R_{\text{Яд}}}{T_{\text{Яд}}p + 1} [u - \\ &\quad - \mathcal{L}\{k\Phi\omega\}] \\ M &= \mathcal{L}\{k\Phi i_{\text{Я}}\} \end{aligned} \right\}.$$

Теперь полная структурная схема (с учетом механической части) будет выглядеть следующим образом (рис. 57):

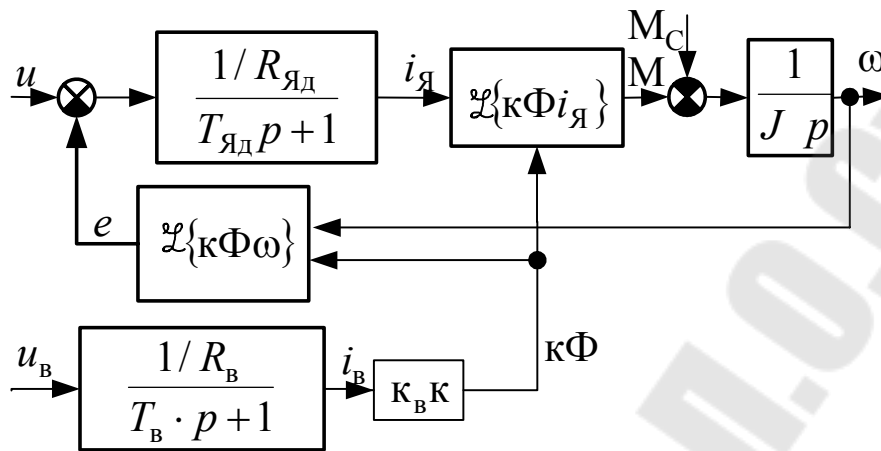


Рис. 57

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 М) ДПТ НВ по каналам представляется апериодическими звеньями. Для режимов с $c = кФ = const$ структурная схема изображена на рис. 58:

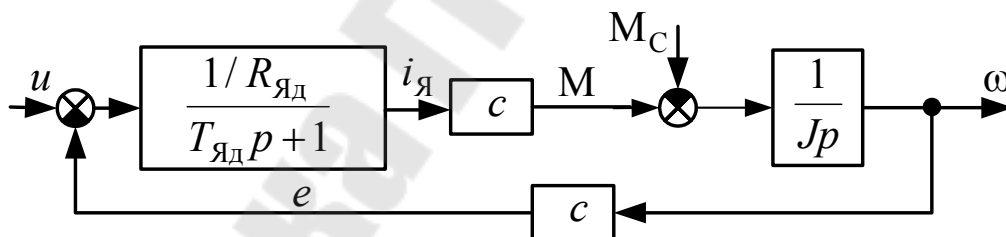


Рис. 58

Введем понятие «электромеханической» постоянной времени:
 $T_M = \frac{J}{\beta}$, или для ДПТ $T_M = \frac{J \cdot R_{Яд}}{c^2}$. Представляя ток нагрузки $I_C = \frac{M_C}{c}$, структурная схема будет выглядеть следующим образом (рис. 59):

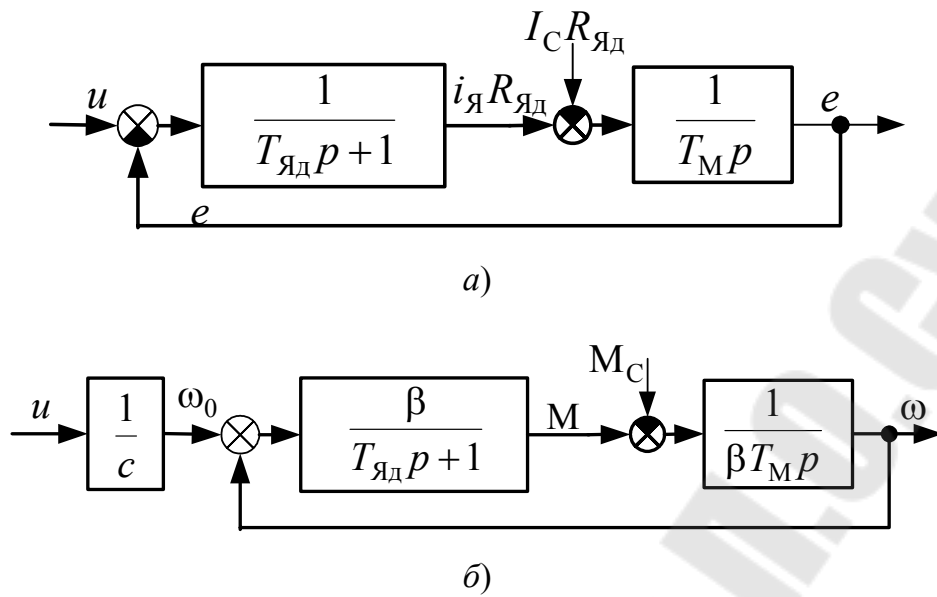


Рис. 59

При питании якорной цепи ЭД от источника тока, обеспечивающего определенное значение тока якоря $I_{\text{я}} = I_1 = \text{const}$ учитывая, что $k_{\text{в}} = \Phi/I_{\text{в}}$, управление производится только по цепи возбуждения (рис. 60):

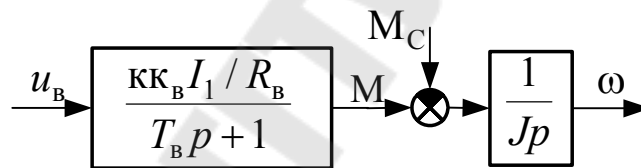


Рис. 60

ПФ по управлению со стороны цепи возбуждения:

$$M = \frac{1/R_{\text{в}}}{T_{\text{в}} p + 1} k k_{\text{в}} I_1 u_{\text{в}}.$$

В результате момент ЭД не зависит от скорости и механические характеристики абсолютно мягкие (рис. 61):

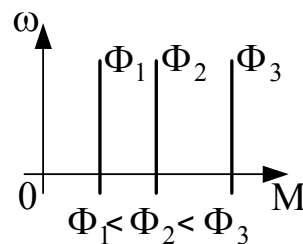


Рис. 61

3.7. Описание электромеханических процессов в двигателе постоянного тока последовательного возбуждения

Нормальная схема включения изображена на рис. 62.

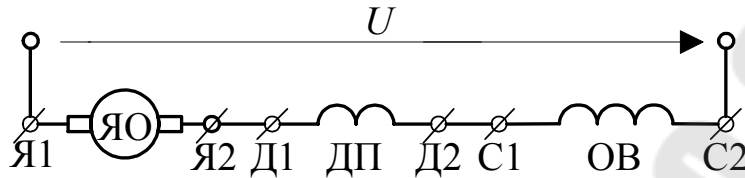


Рис. 62

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 $\alpha\beta$ представлена на рис. 63:

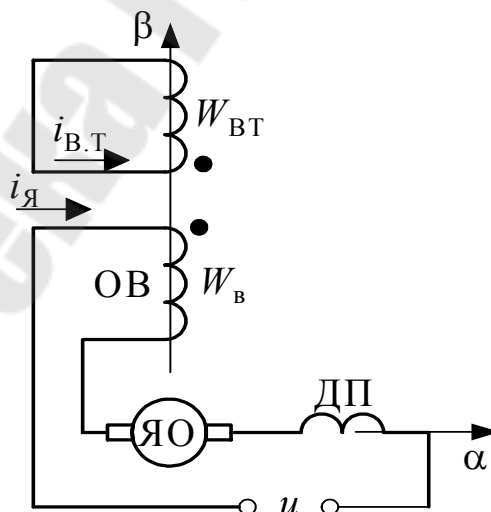


Рис. 63

Описание электромеханических процессов можно представить уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= R_{\text{ВТ}} i_{\text{ВТ}} + W_{\text{ВТ}} \frac{d\Phi}{dt}; \\ u &= R_{\text{Яд}} i_{\text{Я}} + L_{\text{Яд}} \frac{di_{\text{Я}}}{dt} + \kappa \Phi \omega + W_{\text{В}} \frac{d\Phi}{dt}; \\ M &= \kappa \Phi i_{\text{Я}}, \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

где W – число витков соответствующих обмоток;
 $R_{\text{Яд}} = R_{\text{ЯО}} + R_{\text{ДП}} + R_{\text{ОВ}} + R_{\text{ЦК}}$; $L_{\text{Яд}} = L_{\text{ДП}} + L_{\text{ЯО}} + L_{\text{ОВ}}$ – 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 $\Phi(I_{\text{В}})$ (рис. 64):

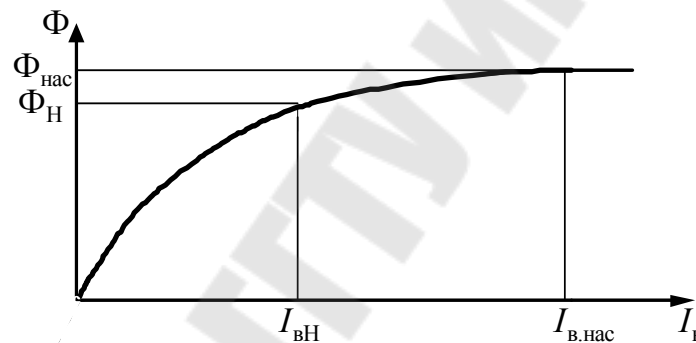


Рис. 64

Ток, приводящий к насыщению магнитной системы, составляет $I_{\text{В.нас}} = (1,6 \div 1,8) I_{\text{ВН}}$ и сама характеристика не линейна. Для анализа режимов, при которых $I_{\text{В}} \leq (1,2 \div 1,25) I_{\text{ВН}}$, кривую намагничивания обычно аппроксимируют двумя отрезками прямых (рис. 65):

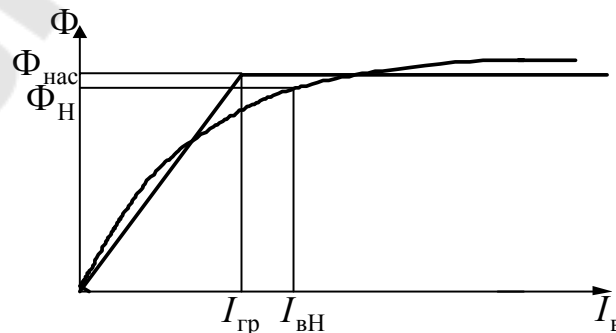


Рис. 65

3.8. Статические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

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

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

$$\omega = \frac{U}{k\Phi(M)} - \frac{R_{\text{яд}}}{k\Phi(M)} M.$$

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

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

Можно представить $I_{\text{я}} = \frac{\Phi}{k_{\text{в}}}$ и тогда:

$$M = k k_{\text{в}} I_{\text{я}}^2 = \frac{k}{k_{\text{в}}} \Phi^2 \quad \text{или} \quad \Phi = \sqrt{\frac{k_{\text{в}}}{k}} \cdot M.$$

В результате:

$$\omega = \frac{U}{k k_{\text{в}} I_{\text{я}}} - \frac{R_{\text{яд}}}{k k_{\text{в}}} \quad \text{и} \quad \omega = \frac{U}{\sqrt{k k_{\text{в}}} M} - \frac{R_{\text{яд}}}{k k_{\text{в}}}.$$

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

2. $I_{\text{в}} \geq I_{\text{гр}}$ и $k\Phi = k\Phi_{\text{нас}} = c = \text{const}$. Статические характеристики становятся линейными: $\omega = \frac{U}{c} - \frac{R_{\text{яд}}}{c} I_{\text{я}}$ и $\omega = \frac{U}{c} - \frac{R_{\text{яд}}}{c^2} M$.

Однако, учитывая вид действительной кривой намагничивания, реальная характеристика (штриховая линия) отличается от полученной (рис. 66):

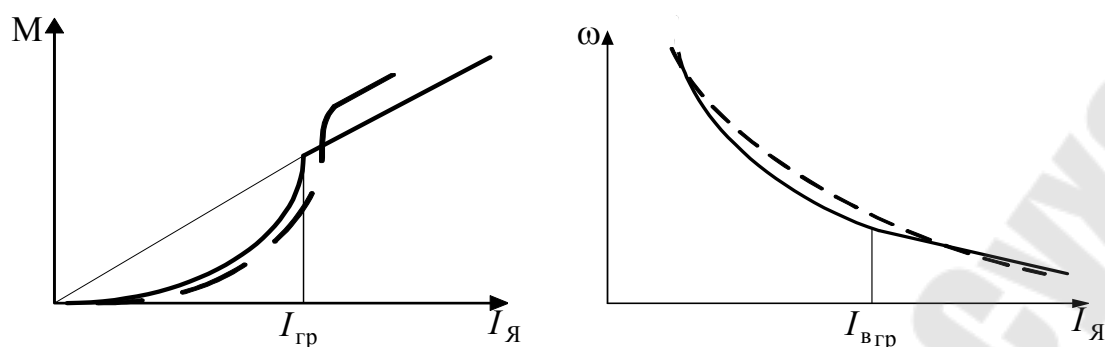


Рис. 66

Рассматривая характеристики, можно отметить основные свойства:

1. Отсутствует идеальный холостой ход и *недопустим режим* с $M_c = 0$, 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 λ_I .

Для серийных ДПТ ПВ в справочной и технической документации приводятся естественные универсальные характеристики в относительных величинах, например зависимости $M(I_Я)$ и $n(I_Я)$ (рис. 67):

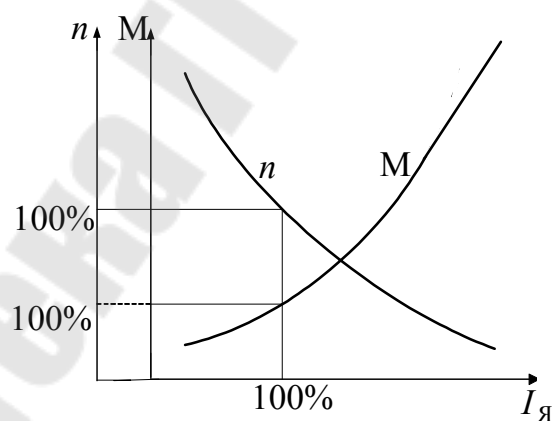


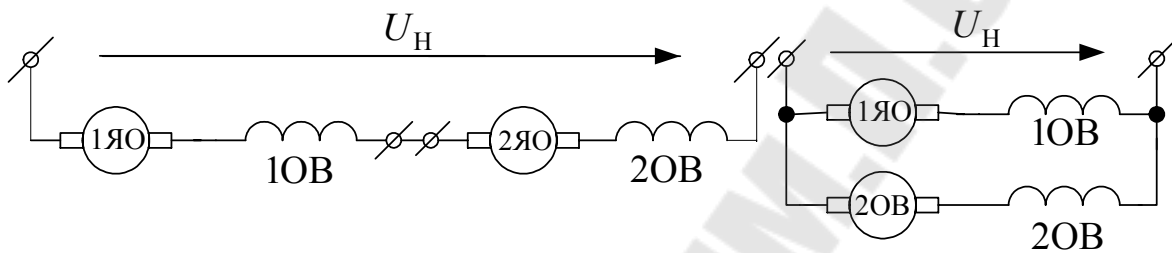
Рис. 67

За базовые значения (100 %) принимаются номинальные величины. Имея подобные характеристики, можно построить зависимость $\cos\Phi = f(I_Я)$ в абсолютных величинах, и на ее основании рассчитать электромеханическую и механическую характеристики.

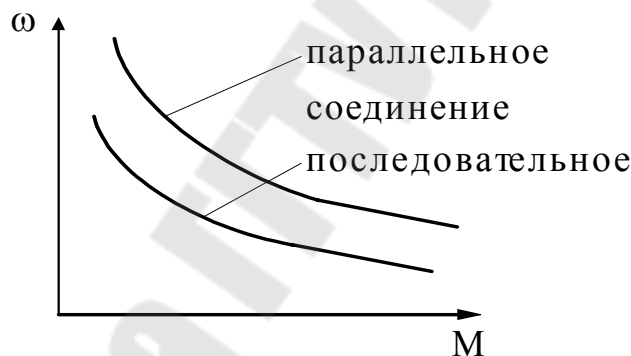
3.9. Искусственные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

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 (рис. 68, а). Характеристики изображены на рис. 68, б).



а)



б)

Рис. 68

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

2. *Регулирование введением добавочного сопротивления в цепь якоря (реостатное регулирование).* Введение добавочного сопротивления приводит к увеличению угловых коэффициентов искусственных характеристик по отношению к естественной: $\frac{R_{я}}{k\Phi}$ или $\frac{R_{я}}{(k\Phi)^2}$,

где $R_{я} = R_{яд} + R_{доб}$.

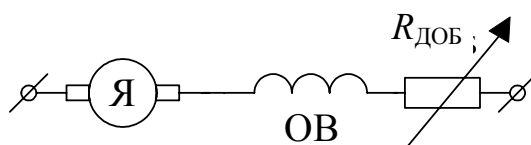


Рис. 69

Вид характеристик представлен на рис. 70:

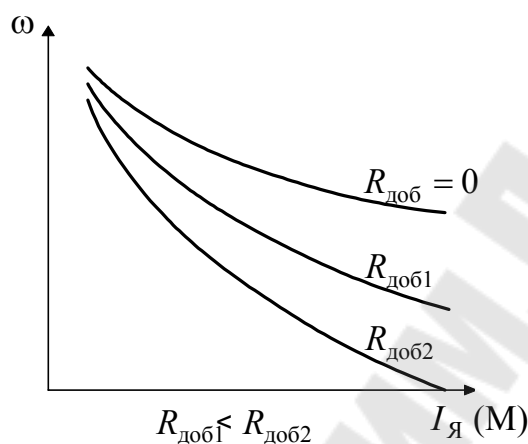


Рис. 70

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 $(кФ)_{Иi} = (кФ)_{Еi}$:

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

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 (рис. 71):

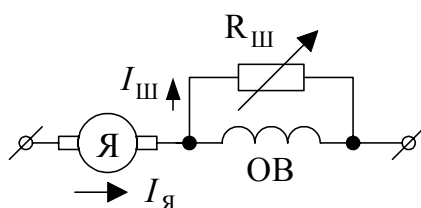


Рис. 71

Вид характеристик изображен на рис. 72.

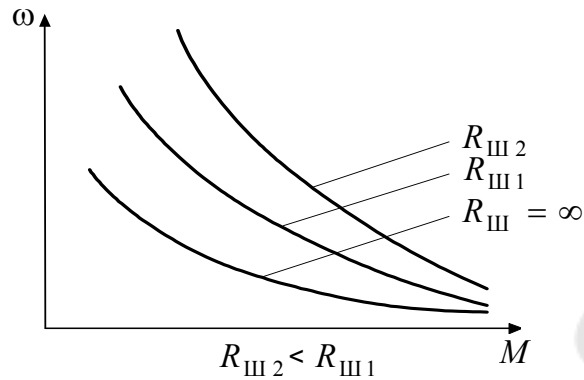


Рис. 72

При этом $I_B = I_Y - I_{ш}$, и искусственные характеристики располагаются выше естественной. Диапазон регулирования скорости:

$$D_\omega = \frac{\omega_{\max}}{\omega_E} \leq 1,25 \div 1,5.$$

Для увеличения магнитного потока шунтируется обмотка якоря. Схема и вид характеристик изображены на рис. 73 и 74:

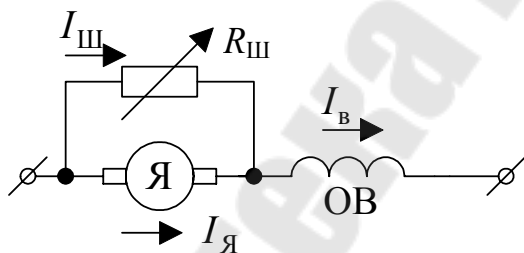


Рис. 73

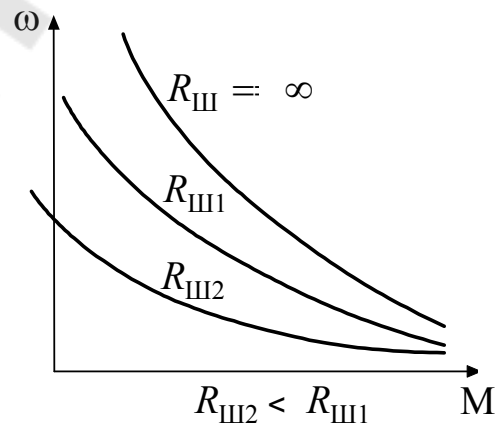


Рис. 74

Ток возбуждения состоит из 2-х составляющих: $I_B = I_Y + I_{ш}$. 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 подъемно-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 $I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}} = \frac{k\Phi\omega_0 - k\Phi\omega}{R_{\text{я}}} < 0$ – 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-мя способами.

А. С *независимым возбуждением* при включении ОВ в сеть, но с регулировочным сопротивлением большой мощности (рис. 75):

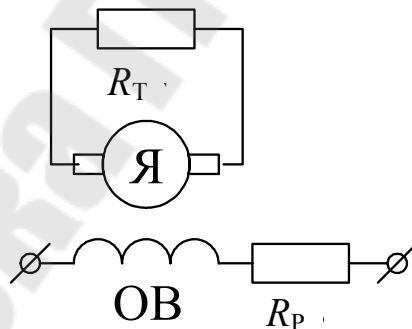


Рис. 75

Характеристики ЭД линейны и аналогичны характеристикам ДПТ НВ при динамическом торможении.

Б. *Торможение с самовозбуждением.* Схемы включения в двигательном и тормозном режимах изображены на рис. 76:

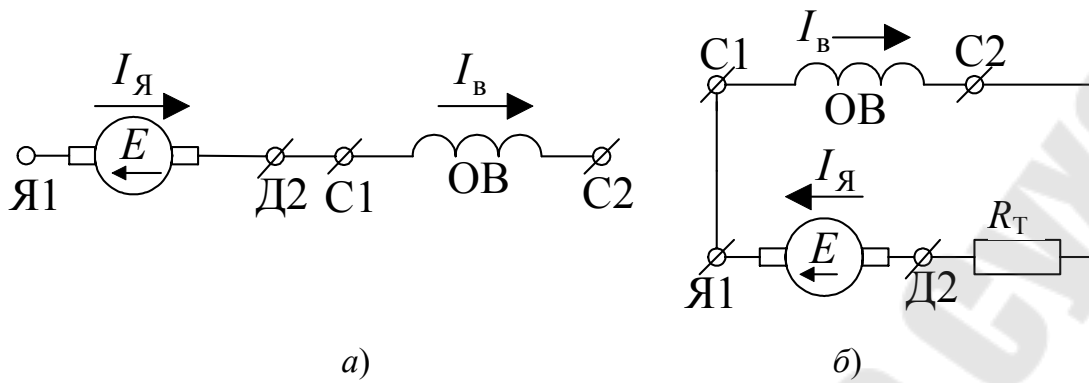


Рис. 76

При переключении ЭД на схему торможения необходимо в *OB* 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 $\Delta U = I_{\text{я}}(R_{\text{яд}} + R_{\text{т}})$ и зависимости $E = k\Phi\omega$, которую можно считать кривой намагничивания при данной скорости ω . Графически покажем их с учетом аппроксимации кривой намагничивания двумя отрезками.

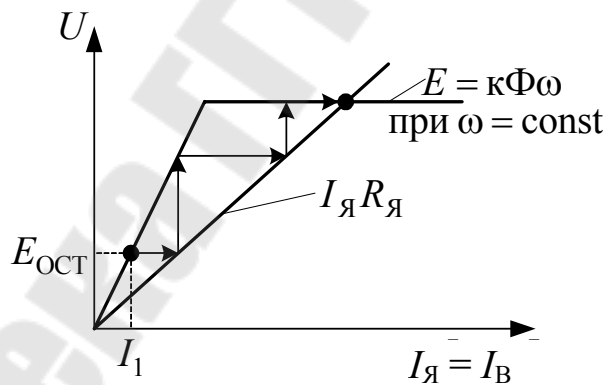


Рис. 77

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 изображены на рис. 78.

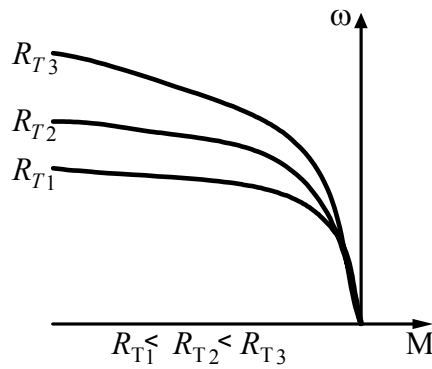


Рис. 78

3.11. Особенности двигателя смешанного возбуждения

Нормальная схема включения представлена на рис. 79:

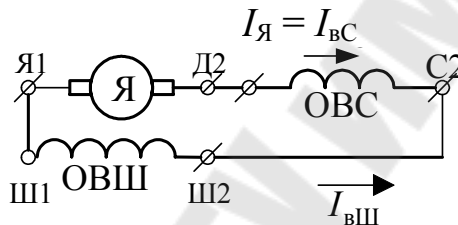


Рис. 79

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 $\Phi(I_{я})$ (рис. 80):

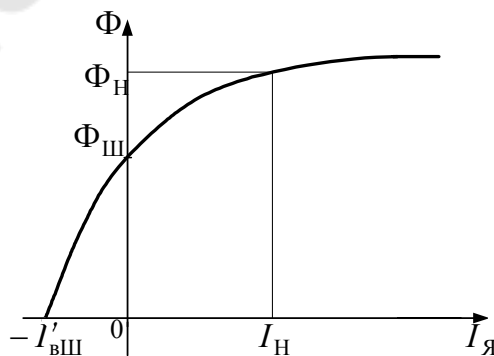


Рис. 80

При токе якоря $I_{\text{я}} = 0$ действует ОВШ и поток равен $\Phi_{\text{ш}}$. С изменением полярности тока якоря (рекуперативный режим) Н.С. обмоток направлены встречно и с увеличением тока суммарный поток уменьшается. При $|I_{\text{я}}| = I'_{\text{вШ}}$ поток становится равным нулю. Скорость идеального холостого хода: $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_{\text{ш}}}$, причем $\Phi_{\text{ш}} = (0,7 \div 0,85)\Phi_{\text{н}}$.

С увеличением нагрузки от нуля (при положительном $I_{\text{я}}$) поток увеличивается, а скорость резко уменьшается. Когда наступает насыщение, механическая характеристика линейна и достаточно жесткая. В зависимости от соотношения Н.С. обмоток возбуждения $\omega_0 = (1,3 \div 1,6)\omega_{\text{н}}$.

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

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

но смещенными вдоль оси абсцисс влево (рис. 81):

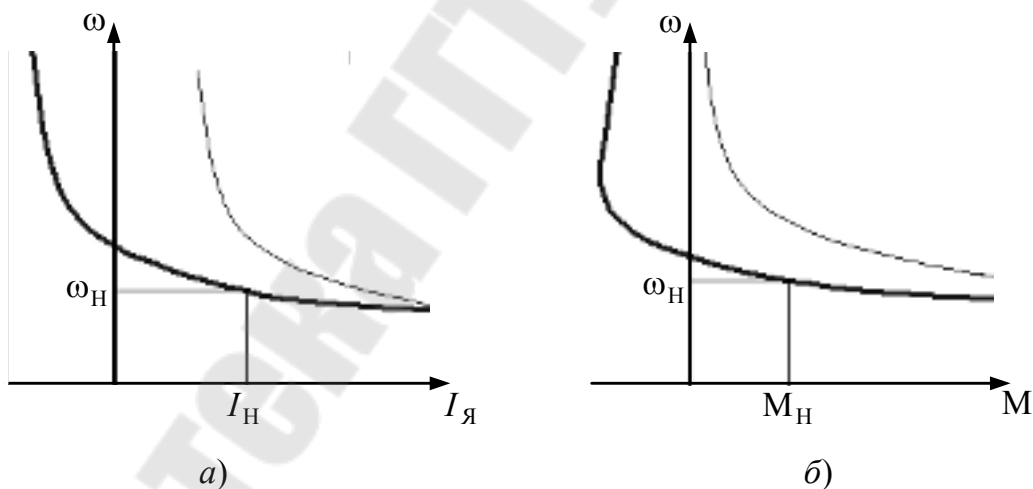


Рис. 81

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 изображены на рис. 82.

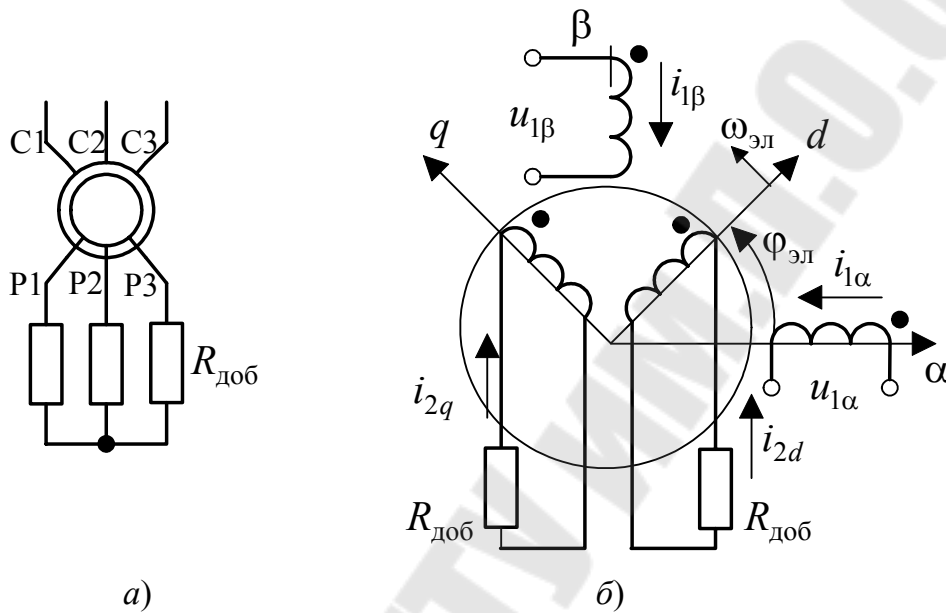


Рис. 82

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

В комплексной форме уравнения преобразования энергии:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_1 &= R_1 \bar{i}_1 + \frac{d\bar{\psi}_1}{dt} + j\omega_{0эл} \bar{\psi}_1; \\ 0 &= R'_{2\Sigma} \bar{i}'_2 + \frac{d\bar{\psi}_2}{dt} + j(\omega_{0эл} - \omega_{эл}) \bar{\psi}_2; \\ M &= p_d L_{12} \operatorname{Im}[\bar{i}_1 \cdot \bar{i}'_2^*], \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

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:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\Psi}_1 &= L_1 \bar{i}_1 + L_{12} \bar{i}'_2; \\ \bar{\Psi}_2 &= L_2 \bar{i}'_2 + L_{12} \bar{i}_1. \end{aligned} \right\}$$

Откуда выразим токи:

$$\left. \begin{aligned} \bar{i}_1 &= \frac{\bar{\Psi}_1}{L_1} - \frac{L_{12}}{L_1} \cdot \bar{i}'_2; \\ \bar{i}'_2 &= \frac{\bar{\Psi}_2}{L_2} - \frac{L_{12}}{L_2} \cdot \bar{i}_1, \end{aligned} \right\} \text{или} \left. \begin{aligned} \bar{i}_1 &= \frac{\bar{\Psi}_1 L_2 - \bar{\Psi}_2 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2}; \\ \bar{i}'_2 &= \frac{\bar{\Psi}_2 L_1 - \bar{\Psi}_1 \cdot L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2}. \end{aligned} \right\}$$

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

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_1 &= \frac{R_1 L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \bar{\Psi}_1 - \frac{R_1 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \bar{\Psi}_2 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + j\omega_{0\text{эл}} \bar{\Psi}_1; \\ 0 &= \frac{R'_{2\Sigma} L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \bar{\Psi}_2 - \frac{R'_{2\Sigma} L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \bar{\Psi}_1 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + j(\omega_{0\text{эл}} - \omega_{\text{эл}}) \bar{\Psi}_2; \\ M &= p_d \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \text{Im}(\bar{\Psi}_1 \cdot \bar{\Psi}_2^*). \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

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 $\bar{\Psi}_\mu = \bar{I}_\mu L_{12}$ – 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:

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_1 &= R_1 \bar{I}_1 + jX_1 \bar{I}_1 + jX_\mu \bar{I}_\mu; \\ 0 &= R'_{2\Sigma} \bar{I}' + jX'_2 s \bar{I}'_2 + jX_\mu s \bar{I}_\mu, \end{aligned} \right\}$$

где $s = \frac{\omega_{0\text{эл}} - \omega_{\text{эл}}}{\omega_{0\text{эл}}} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ – скольжение, или относительная раз-

ность скоростей, которая определяет частоту тока ротора $f_2 = f_1 \cdot s$.

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

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_1 &= R_1 \bar{I}_1 + jX_1 \bar{I}_1 + \bar{E}_1; \\ \bar{E}'_2 &= \frac{R'_{2\Sigma}}{s} \bar{I}'_2 + jX'_2 \bar{I}'_2. \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

Система (3.14) справедлива как для 2-фазной модели, так и для 3-фазного АД, поскольку их переменные пропорциональны и представлены в векторной форме. Можно также видеть, что (3.14) соответствует Т-образной схеме замещения одной фазы (рис. 83):

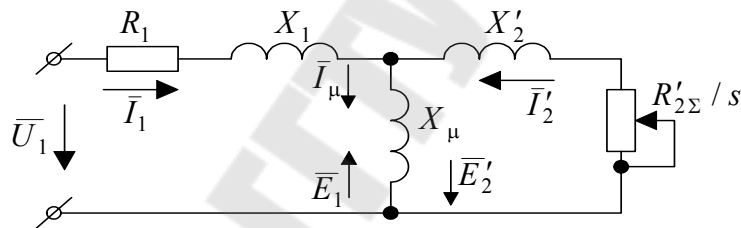


Рис. 83

Погрешность этой схемы определяется неучетом 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 (рис. 84):

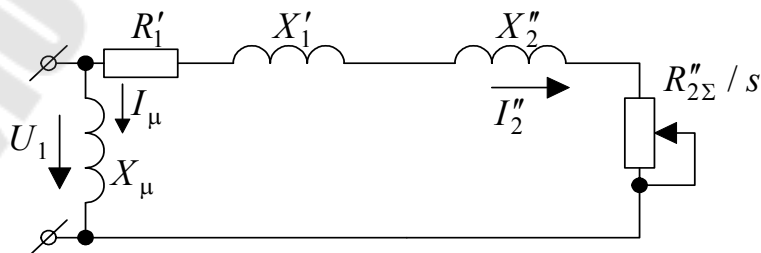


Рис. 84

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

3.14. Статические характеристики асинхронного двигателя

Электромагнитная мощность, передаваемая магнитным полем в ротор: $P_{12} = M(\omega_0 - \omega) = M\omega_0 s$. В соответствии со схемой замещения она расходуется на потери в роторной цепи:

$$\Delta p_2 = P_{12} = m_1 (I'_2)^2 R'_{2\Sigma},$$

где m_1 – число фаз статора.

$$\text{Теперь } M = \frac{m_1 (I'_2)^2}{\omega_0} \cdot \frac{R'_{2\Sigma}}{s}.$$

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

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

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

Выражение (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:

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

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

и $\omega_K = \omega_0 \cdot (1 - s_K)$. Знаки «+» относятся соответственно к двигательному и тормозному режимам.

Естественная механическая характеристика представлена на рис. 85.

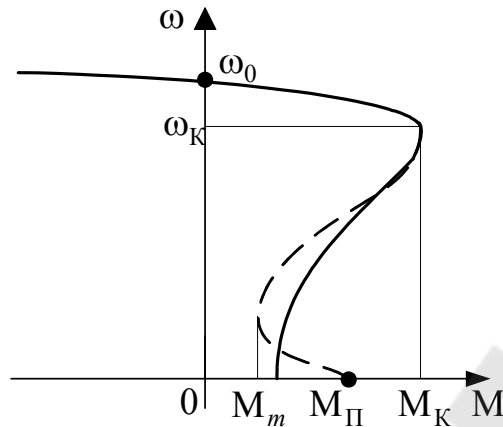


Рис. 85

Выражение (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.

Если разделить (3.16) на (3.17) с учетом (3.18), то получаем выражение механической характеристики в виде формулы Клосса:

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

где $q = \frac{R_1}{R'_{2\Sigma}}$.

Если допустимо принять $q = 0$, то $M = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}$ – упрощенная

формула Клосса.

Основные точки характеристики:

1. Идеальный холостой ход при синхронной скорости ротора:

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

2. Номинальный режим:

$M = M_H$, ω_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):

$\omega = 0$, $s = 1$, $M = M_{\Pi}$, кратность пускового момента $\lambda_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_H} = 1 \div 2$.

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

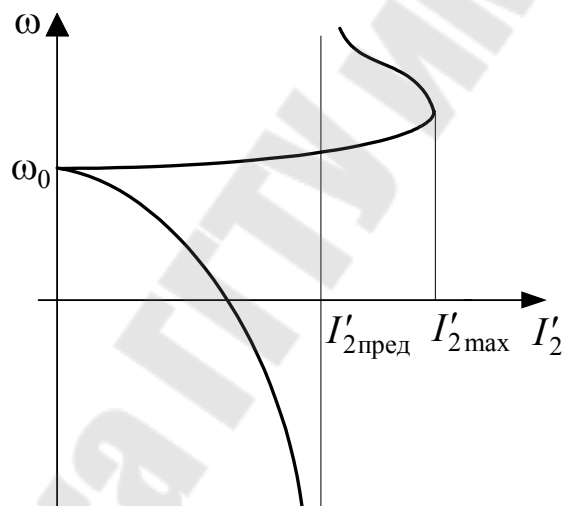


Рис. 86

Электромеханическая характеристика (рис. 86), описываемая (3.15), также нелинейная и имеет экстремумы. При синхронной скорости ($s = 0$) ток ротора $I'_2 = 0$. Максимальное значение тока:

$$I'_{2\max} = \frac{U_1}{(X_1 + X'_2)} \text{ при } s = -\frac{R'_{2\Sigma}}{R_1} \text{ в генераторном режиме.}$$

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

$$I'_{2\text{пред}} = \frac{U_1}{\sqrt{R^2_1 + (X_1 + X'_2)^2}}.$$

3.15. Искусственные характеристики асинхронного двигателя

С учетом зависимости ω_0 от параметров АД механическая характеристика (3.16) запишется:

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

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 также выражениями (3.16)–(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 принимают следующий вид (рис. 87):

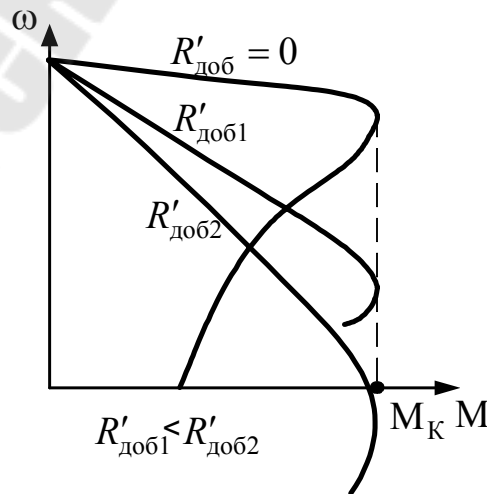


Рис. 87

Полная электромагнитная мощность $P = M\omega_0$. Потери в цепи ротора $\Delta p_2 = m_1 I_2'^2 (R_2' + R_{доб}')^2$ 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 (рис. 88).

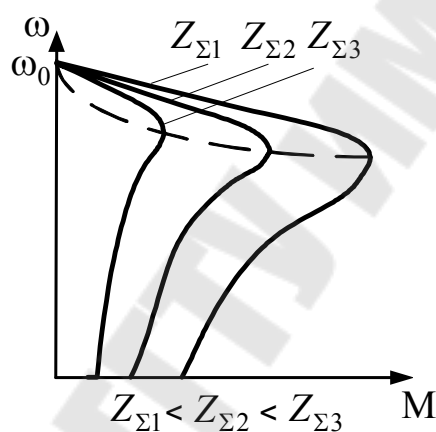


Рис. 88

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 АД ФР в отдельных случаях применяют *одновременное введение индуктивного и активного сопротивлений в цепь ротора*.

Характеристики представлены на рис. 89, где 1 – естественная; 2 – введение только $X_{доб}$; 3 – последовательное включение $X_{доб}$ и $R_{доб}$; 4 – параллельное включение сопротивлений.

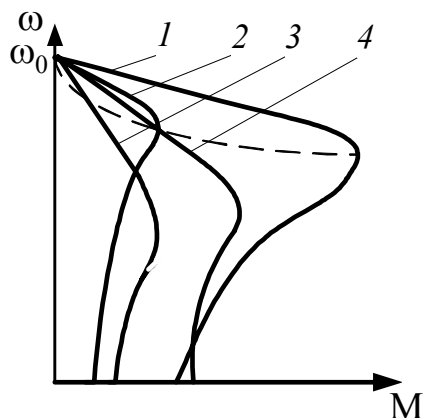


Рис. 89

При параллельном включении, за счет перераспределения тока ротора между активным и индуктивным 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 др.) обмотка статора имеет дополнительные выводы и при их переключении соотношение $p_{д2} : p_{д1} = 2$. Характеристики представлены на рис. 90, где 1 – характеристика при $p_{д1}$; 2 – характеристика при $p_{д2}$ и схеме переключения с постоянством момента (например, Y/Y); 3 – характеристика при $p_{д2}$ и схеме переключения с постоянством мощности (например, Δ/Y); 4 – характеристика при $p_{д2}$ для ЭД, предназначенного для центробежных машин.

При наличии 2-х обмоток выпускают 3- и 4-скоростные ЭД. Для подъемно-транспортных машин выпускают 2-скоростные двигатели с двумя обмотками при соотношениях числа пар полюсов $p_{д2} : p_{д1} = 4 \div 8$.

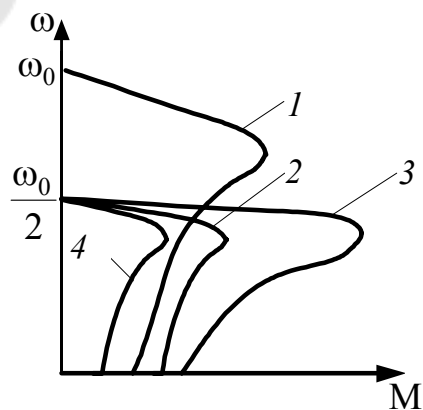


Рис. 90

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:

$$U_1 = E_1 = 4,44k_{\text{обм}}W_1f_1\Phi. \quad (3.20)$$

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 $s_K = \text{const}$, а критический момент уменьшается пропорционально квадрату напряжения. Вид характеристик изображен на рис. 91.

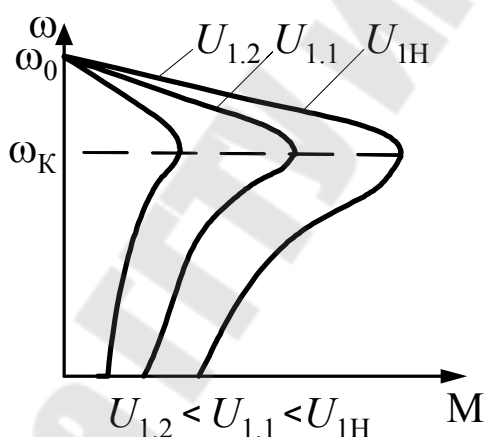


Рис. 91

Диапазон регулирования ограничен ω_K . Для его расширения применяют АД КЗ с повышенным скольжением или АД ФР 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 изображены на рис. 92.

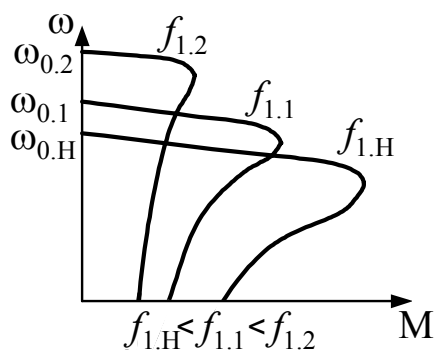


Рис. 92

Для расширения диапазона и более полного использования ЭД одновременно с частотой уменьшают и напряжение. Если производить регулирование, обеспечивающее $\Phi = \text{const}$, то по (3.20) закон частотного регулирования (взаимосвязь U_1 и f_1): $U_1/f_1 = \text{const}$. Для сохранения же перегрузочной способности по (3.17) необходим закон $U_1^2/f_1 = \text{const}$. 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 $M_{C.1}$ – 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):

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

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

$$\bar{\psi}_1 = -j \frac{\bar{u}_1}{2\pi f_1}.$$

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_{1H}).

Используя выражения электромагнитной постоянной времени АД:

$$T_{\Theta} = \frac{L_{1\sigma} + L'_{2\sigma}}{R'_2} = \frac{1}{\omega_{0\text{эл.Н}} \cdot s_K},$$

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

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

где для переменных 3-фазного АД (с учетом $R_1 = 0$):

$$M_K = \frac{3(U_1 / \omega_0)^2}{2(X_{1H} + X'_{2H})}.$$

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:

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

где для линеаризованной характеристики модуль жесткости:

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

Структурная схема АД для участка характеристики при $s_a < s_K$ представлена на рис. 93:

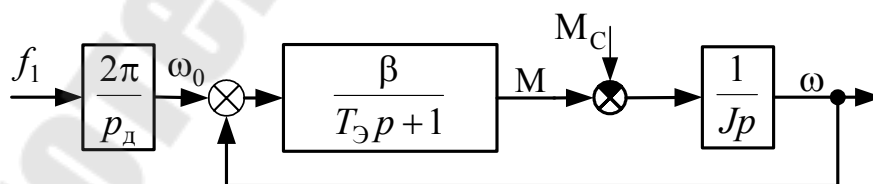


Рис. 93

Таким образом, по окончании процессов связанных с включением (т. е. после выхода на устойчивую часть характеристики) и при питании от источника напряжения, АД представляется аperiodиче-

ским звеном 1-й степени в контуре регулирования момента при условии, что $\psi_1 = \text{const}$, аналогично ДПТ НВ при $\Phi = \text{const}$.

3.17. Электромеханические свойства синхронного двигателя

Рассмотрим в общем случае явнополюсную машину с ОВ на роторе. Схемы включения ЭД и его двухфазной модели (рис. 94):

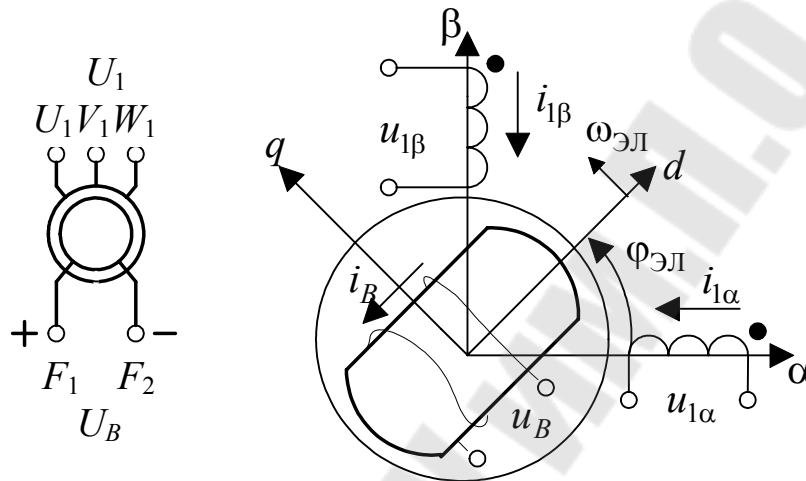


Рис. 94

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:

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

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, получим:

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

Переходя к переменным трехфазного СД, получим:

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

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

(3.24) представляет собой зависимость $M(\theta_{\text{эл}})$ 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 (рис. 95):

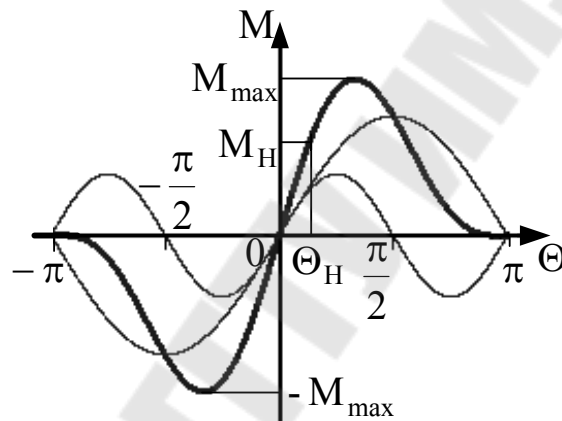


Рис. 95

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

Для неявнополюсного СД:

$$X_{1d} = X_{1q} \text{ и } M = \frac{3EU_1}{\omega_0 X_1} \cdot \sin\theta_{\text{эл}}.$$

При работе СД в статическом режиме на устойчивом участке угловой характеристики среднее значение скорости $\omega_{\text{ср}} = \omega_0$ и механическая характеристика в пределах $-M_{\text{max}} < M < M_{\text{max}}$ абсолютно жесткая. Для пуска ЭД используется обмотка типа «белчья клетка». В результате при скорости, отличной от синхронной, СД обладает характеристикой, подобной АД. Механические характеристики (рис. 96):

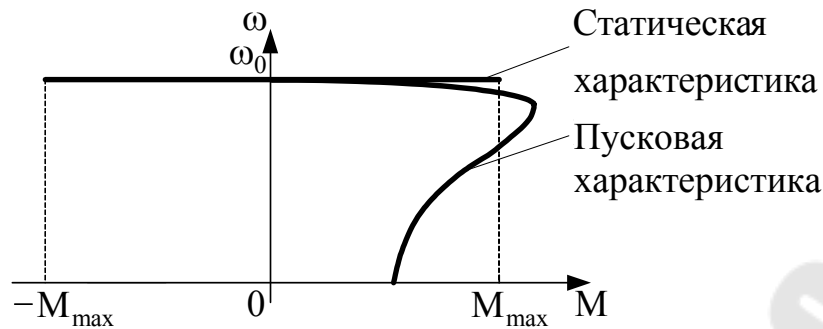


Рис. 96

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 β – модуль жесткости асинхронной характеристики СД.

В соответствии с (3.25) структурная схема будет иметь следующий вид (рис. 97):

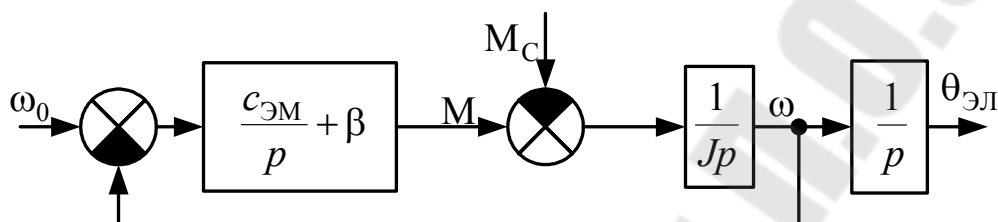


Рис. 97

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.

3.19. Контрольные вопросы

1. В чем заключается отличие естественных и искусственных характеристик ЭД?
2. Как представляется и описывается обобщенная модель машины постоянного тока независимого возбуждения?
3. Как описываются электромеханические процессы в ДПТ НВ, ДПТ ПВ, АД, СД?
4. Как аналитически и графически представляются естественные электромеханические и механические характеристики ДПТ НВ, ДПТ ПВ, АД?
5. Какие способы регулирования допускают и как выглядят электромеханические и механические искусственные характеристики ДПТ НВ, ДПТ ПВ, АД?
6. Как аналитически и графически представляются угловые и механические характеристики СД?
7. Как описываются динамические режимы ДПТ НВ, АД, СД?
8. В чем заключается особенность характеристик ДПТ смешанного возбуждения?

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 Δp_c и переменные Δp_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:

$$\Delta p_v = \begin{cases} I_{я}^2 R_{яд} - \text{ДПТ}; \\ 3I_1^2 R_1 - \text{СД}; \\ 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2' - \text{АД}. \end{cases}$$

При работе АД на участке $|s| < s_k$ можно считать $\varphi_2 = 0$, а $I_{\mu} = \text{const}$. Учитывая, что $I_1^2 = I_{\mu}^2 + I_2'^2$, то потери от тока намагничивания относят к постоянным. Таким образом, для АД:

$$\Delta p_c = \Delta p_{ст} + \Delta p_{мех} + I_{\mu}^2 R_1, \quad \Delta p_v = 3I_2'^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) R'_{2\Sigma}. \quad (4.1)$$

Когда ЭД работают в номинальных режимах и на естественной характеристике переменные потери Δp_{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 $P_{ЭМ} = \omega M$ 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. 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

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 ω_0 . При $M_s = 0$ 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 ω_0 и текущей ω . 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 для прямого пуска (для ДПТ с пусковым сопротивлением) при $s_{\text{нач}} = 1$ и $s_{\text{кон}} = 0$ 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 $M = M_C + J \cdot \frac{d\omega}{dt}$ и на основании (4.5) и (4.6) потери энергии:

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

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

Если для АД необходимо учесть потери в обмотке статора, то

$$\Delta A_{\text{шт}} = (\Delta A_{\text{штх}} + \Delta A_{\text{штм}}) \cdot (1 + R_1/R'_{2\Sigma})$$

и только в ЭД $\Delta A_{\text{шт}} = (\Delta A_{\text{штх}} + \Delta A_{\text{штм}}) \cdot (1 + R_1/R'_{2\Sigma} - R'_{\text{доб}}/R'_{2\Sigma})$.

В системе УП–Д при пуске или регулировании скорости закон $\omega_0(t)$ задается системой управления, причем значение ω_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 определить потери. 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:

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

Представим изменение скорости на i -й ступени пуска через значение ω_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 -й 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:

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

Таким образом, при пуске в k -ступеней изменения ω_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 табл. 1.

Таблица 1

Класс изоляции	Связующие материалы	$t_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{раб}}, ^\circ\text{C}$
В	органические	130°	120°
F	синтетические	155°	140°
H	кремнийорганические	180°	165° (серия «Д» –160°)

Нагрев ЭД определяется также и температурой окружающей среды, для которой за стандартное принято значение $t_0 = 40^\circ\text{C}$. 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 $t_0 = \text{const}$.

Теперь уравнение теплового баланса $Cdt + A\tau dt = \Delta p dt$, где C – теплоемкость, т. е. количество тепла, необходимая для нагрева ЭД на 1°C , Дж/ $^\circ\text{C}$; A – теплоотдача – количество тепла, выделяемого

в окружающую среду за единицу времени при разности температур в $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, Дж/с $\cdot\text{ }^{\circ}\text{C}$; Δp – потери мощности в ЭД.

Разделив переменные, получим уравнение нагрева:

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

где $T_{\text{н}} = \frac{C}{A}$ – 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) дает экспоненциальный закон изменения температуры во времени:

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

Графически, при пуске с холодного состояния, решение (4.10) представляется кривой 1 (рис. 98):

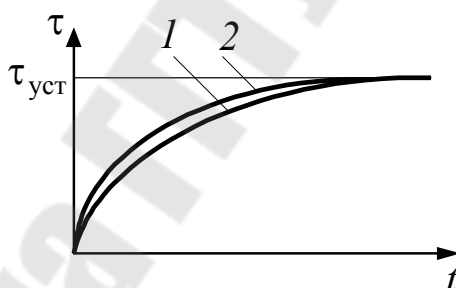


Рис. 98

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 ω_H , а A_i – при текущей ω_i .

При неподвижном роторе коэффициент β_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 $T_{\text{охл}} > T_H$.

На практике наиболее часто сталкиваются с изменением теплоотдачи при пуске и торможении. Принимая, что скорость изменяется линейно:

$$\beta_{\text{п}} = \beta_{\text{т}} = (1 + \beta_0) / 2.$$

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 (рис. 99):

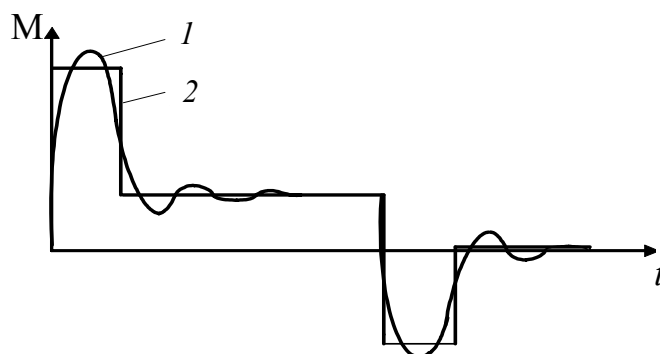


Рис. 99

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 ускорение $\varepsilon = \text{const}$.

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 пп. 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 другим 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 превышения температуры всех частей электрической машины достигают установившихся значений. Диаграммы изменения переменных для режима S1 изображена на рис. 100:

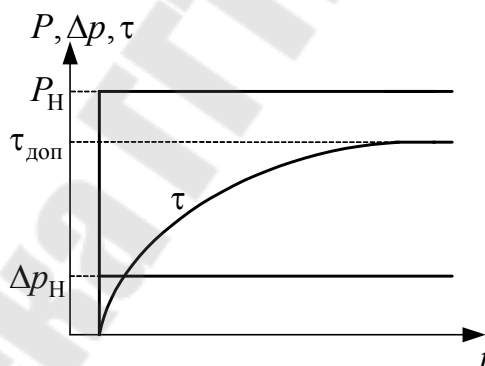


Рис. 100

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 представлены на рис. 101:

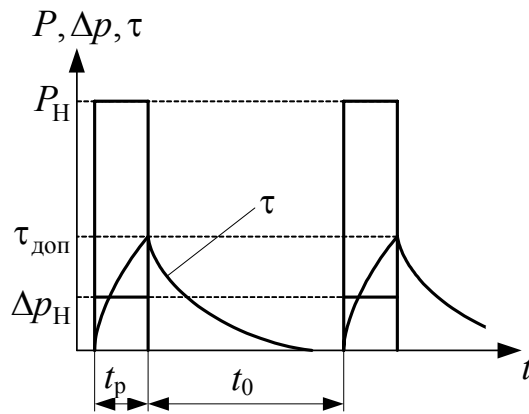


Рис. 101

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 представлены на рис. 102:

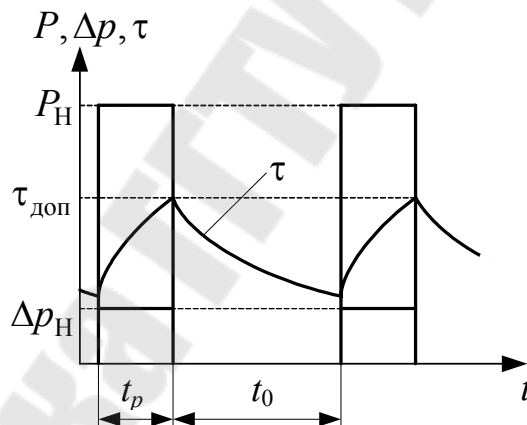


Рис. 102

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 $ПВ_H = 15 \%, 25 \%, 40 \%$ 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 $t_p < T_H$. Поэтому при выборе и проверке ЭД достаточно определить среднее значение $\tau_{\text{ср}}$, которое не должно превысить допустимое $\tau_{\text{доп}}$, используя линейную модель нагрева:

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

где $\Delta p_{\text{ср}}$ – средние потери в реальном режиме, а Δp_H – потери в номинальном режиме для выбранного ЭД.

Таким образом, для правильного выбора необходимо выполнение условия:

$$\Delta p_{\text{ср}} \leq \Delta p_H.$$

Имея нагрузочную диаграмму в виде зависимости $P(t)$ (рис. 103), можно рассчитать потери мощности на каждом участке Δp_i для предварительно выбранного ЭД и определить:

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

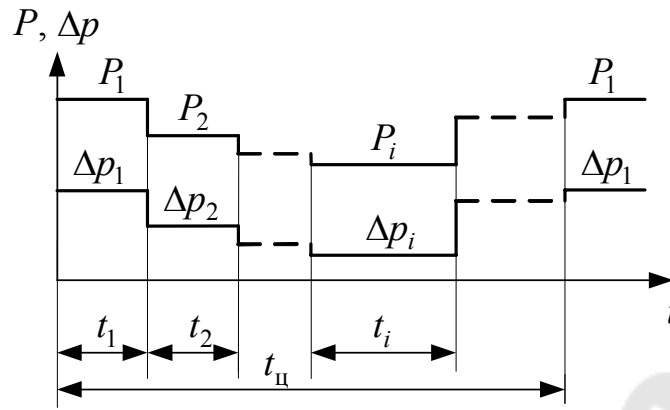


Рис. 103

Для правильного выбора необходимо:

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

Данный метод называют методом средних потерь. Порядок его применения:

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

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

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

2. Предварительно выбирают ЭД из условия

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

где $k_{\text{зд}} = 1,1-1,3$ – 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

$$P_{\text{Ди}} = P_{\text{Ci}} + M_{\text{Ди}} \cdot \frac{\omega_{\text{нач}i} + \omega_{\text{кон}i}}{2}.$$

4. По зависимости $\eta(P_2)$ или другим методом находят потери мощности на каждом участке Δp_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:

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

где I_3 – эквивалентный по условиям нагрева ток.

В соответствии с (4.12) запишем:

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

Если постоянные потери $\Delta p_c = \text{const}$, то

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

Таким образом:

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

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

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

ЭД выбран правильно, если $I_3 \leq I_{\text{н}}$.

Метод эквивалентного момента

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

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

Когда $M_{\text{э}} \leq M_{\text{н}}$, то ЭД выбран правильно.

Метод эквивалентной мощности

Если ЭД обладает жесткой механической характеристикой и допустимо считать скорость неизменной ($\omega = \text{const}$), то при сохранении условий для предыдущих методов мощность пропорциональна моменту, а эквивалентная за цикл определяется как:

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

Для правильного выбора необходимо выполнение условия $P_{\text{э}} \leq P_{\text{н}}$. У АД ток статора не пропорционален току ротора, поэтому использование данного метода требует учета изменения $\cos \varphi$ и η .

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 для тепловых процессов в установившемся тепловом режиме

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

количество тепла, выделяемого в ЭД равно количеству тепла, отдаваемому в окружающую среду; $\tau'_{\text{ср}}$ – среднее превышение температуры за цикл с учетом ухудшения условий охлаждения. В соответствии с определением $A_i = \beta_i \cdot A$, можно представить, что:

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

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

Теперь, учитывая ухудшение условий охлаждения, длительность цикла рассчитывается:

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

где в общем случае

$$\beta_i = \beta_0 + (1 - \beta_0) \frac{\omega_i}{\omega_{\text{H}}}. \quad (4.18)$$

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 $t_p > 3T_{\text{H}}$ и при меньших значениях t_p , но с $t_{\text{ц}} > 10$ 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 $P_{\text{H}} \geq P_{\text{C}}$ или $M_{\text{H}} \geq M_{\text{C}}$ 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 ее разбивают на участки с усреднением переменной. Затем многоучастковую диаграмму приводят к одноучастковой, определяя эквивалентную величину за время работы (если рассматривается диаграмма для уже выбранного ЭД, то при приведении обязательно учитывается ухудшение охлаждения). Например, получена диаграмма $x(t)$ в следующем виде (рис. 104), где x – переменная, используемая в диаграмме (i, M, P); k – число рабочих участков.

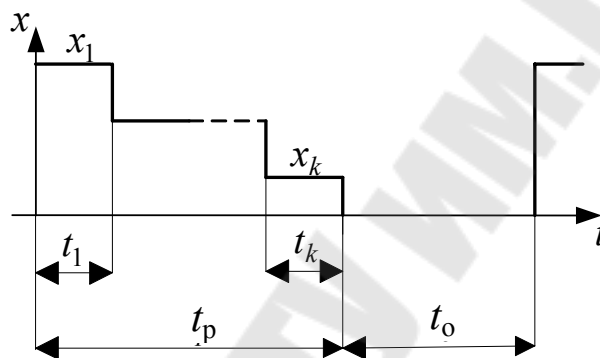


Рис. 104

Тогда эквивалентная величина для данного режима за время работы:

$$X_{э.р} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k x_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^k \beta_i \cdot t_i}}$$

Знаменатель представляет время работы с учетом ухудшения условий охлаждения: $t'_p = \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot t_i$.

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

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

где $\Delta p_{\text{э.п}}$ – 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 $t_{\text{рн}} \ll T_H$, то в первом приближении можно считать, что температура изменяется линейно и не превысит допустимое значение при

$$\Delta p_{\text{э.п}} \frac{t'_p}{T_H} \leq \Delta p_H \cdot \frac{t_{\text{рн}}}{T_H} \quad \text{или} \quad \Delta p_{\text{э.п}} \leq \Delta p_H \cdot \frac{t_{\text{рн}}}{t'_p}.$$

Для методов эквивалентных величин $X_{\text{э.п}} \leq X_H \cdot \sqrt{\frac{t_{\text{рн}}}{t'_p}}$.

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

$$\Delta p_{\text{э.п}} \leq \frac{\Delta p_H \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{рн}}}{T_H}} \right)}{1 - e^{-\frac{t'_p}{T_H}}}, \quad X_{\text{э.п}} \leq X_H \cdot \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_{\text{рн}}}{T_H}}}{1 - e^{-\frac{t'_p}{T_H}}}}.$$

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 одноучастковой. Средние потери и эквивалентная величина не должны вызывать недопустимый нагрев. Принимая, что при $t_{ц} < 10$ мин время работы много меньше постоянной времени нагрева, условие правильного выбора может быть записано:

$$\Delta p_{э.р} \leq \frac{\Delta p_H \cdot ПВ_H}{ПВ}, \text{ или } X_{э.р} \leq X_H \cdot \sqrt{\frac{ПВ_H}{ПВ}},$$

где $ПВ_H$ – нормированное значение продолжительности включения;

$ПВ = \frac{t_p}{t'_p + t_0} 100 \%$ – действительное значение для рассматриваемого режима.

4.12. Допустимое число включений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

При малом времени цикла $t_{ц}$ повторно-кратковременного режима в балансе потерь энергии возрастает доля потерь при пусках и торможениях. При этом с точки зрения теплового режима, на мощность двигателя будет влиять число включений в час или длительность цикла. К примеру, для ЭП подач координатно-расточных, сверлильных станков, для ЭП технологических подъемников число включений может достигать 600 в час и более. Применяемые в них АД, как правило, с самовентиляцией, что приводит к существенному изменению теплоотдачи при отключениях. Это требует проведения проверки двигателя на допустимое число включений.

Рассматривая цикл работы можно представить потери энергии: при пуске – $\Delta A_{п}$; при торможении – $\Delta A_{т}$; при установившемся режиме – $\Delta p t_y$. При номинальной скорости потери мощности, отводимые в окружающую среду, равны Δp_H , в периоды отключения – $\beta_0 \cdot \Delta p_H$, а при пуске и торможении – $\frac{1 + \beta_0}{2} \cdot \Delta p_H$. Теперь энергетический баланс за цикл можно представить:

$$\Delta A_{п} + \Delta A_{т} + \Delta p t_y = \frac{1 + \beta_0}{2} \Delta p_H (t_{п} + t_{т}) + \Delta p_H t_y + \beta_0 \Delta p_H t_0,$$

где $t_{п}, t_y, t_{т}, t_0$ – длительность периодов пуска, установившегося режима, торможения и отключения.

При длительности цикла $t_{\text{ц}} = t_y + t_{\text{п}} + t_{\text{т}} + t_0$ и числе включений в час $h = \frac{3600}{t_{\text{ц}}}$, время отключения $t_0 = \frac{3600}{h} \cdot (1 - \text{ПВ})$ и установившегося режима $t_y = \frac{3600}{h} \cdot \text{ПВ} - (t_{\text{п}} - t_{\text{т}})$, где $\text{ПВ} = (t_{\text{п}} + t_{\text{т}} + t_y) / t_{\text{ц}}$ — определяется в относительных единицах.

Подставляем эти выражения в энергетический баланс:

$$h = \frac{3600 \cdot (\Delta p_{\text{Н}} - \Delta p) \cdot \text{ПВ} + \beta_0 \cdot \Delta p_{\text{Н}} \cdot (1 - \text{ПВ})}{\Delta A_{\text{п}} + \Delta A_{\text{т}} - (t_{\text{п}} + t_{\text{т}}) \cdot \left(\Delta p + \frac{1 + \beta_0}{2} \cdot \Delta p_{\text{Н}} - \Delta p_{\text{Н}} \right)}. \quad (4.19)$$

Уравнение (4.19) представляет собой общее выражение для ЭД.

Для АД КЗ третьим слагаемым в знаменателе можно пренебречь, т. к. оно составляет не более 0,04 от полного значения знаменателя. В итоге допустимое число включений в час можно представить в виде:

$$h = \frac{3600 \cdot (\Delta p_{\text{Н}} - \Delta p) \cdot \text{ПВ} + \beta_0 \cdot \Delta p_{\text{Н}} \cdot (1 - \text{ПВ})}{\Delta A_{\text{п}} + \Delta A_{\text{т}}}. \quad (4.20)$$

Если в установившемся режиме ЭД работает с номинальной нагрузкой, то $\Delta p = \Delta p_{\text{Н}}$ и

$$h = \frac{3600 \cdot \beta_0 \cdot \Delta p_{\text{Н}} \cdot (1 - \text{ПВ})}{\Delta A_{\text{п}} + \Delta A_{\text{т}}}.$$

Из (4.20) следует, что число включений зависит от нагрузки (Δp), ПВ, способа охлаждения (β_0) и потерь энергии в переходных процессах.

Анализируя выражение можно отметить, что при малых нагрузках, когда $(\Delta p_{\text{Н}} - \Delta p) > \beta_0 \cdot \Delta p_{\text{Н}}$, увеличение ПВ позволяет увеличить число включений. При больших нагрузках $(\Delta p_{\text{Н}} - \Delta p) < \beta_0 \cdot \Delta p_{\text{Н}}$ увеличение ПВ требует уменьшения h .

Для увеличения числа включений можно использовать независимую вентиляцию или уменьшить потери энергии в переходных процессах.

4.13. Контрольные вопросы

1. Как определяются потери энергии в ЭД в статических и динамических режимах?
2. Как описываются процессы нагрева и охлаждения ЭД?
3. Чем ограничивается длительно допустимая нагрузка ЭД и его рабочая температура?
4. Что представляют собой нагрузочные диаграммы и какой вид они имеют для основных номинальных режимов ЭД?
5. Каков общий порядок выбора ЭД?
6. Какими методами выбирают и проверяют ЭД и как учитывается изменение теплоотдачи при скорости отличной от номинальной?
7. Как выбирается и проверяется ЭД с S1 для различных реальных режимов?
8. Как выбирается и проверяется ЭД с номинальным режимом S2?
9. Как выбирается и проверяется ЭД с номинальным режимом S3?

Литература

1. Лачинов, Д. А. Электромеханическая работа. «Электричество» / Д. А. Лачинов. – Санкт-Петербург, 1880.
2. Войнаровский, П. Д. Электрическая передача и распределение механической энергии / П. Д. Войнаровский. – Санкт-Петербург, 1900.
3. Андреев, В. П. Основы электропривода / В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин. – Москва–Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. – 496 с.
4. Ключев, В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
5. Ключев, В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. – Москва : Энергоатомиздат, 1998. – 697 с.
6. Ковчин, С. А. Теория электропривода / С. А. Ковчин, Ю. А. Сабинин. – Санкт-Петербург : Энергоатомиздат, 2000. – 496 с.
7. Фираго, Б. И. Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2004. – 527 с.
8. Чиликин, М. Г. Теория автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер. – Москва : Энергия, 1979. – 616 с.

Содержание

Введение.....	3
1. Механика электропривода.....	7
1.1. Приведение моментов, сил и жесткостей.....	7
1.2. Расчетные схемы механической части.....	10
1.3. Механические характеристики исполнительных механизмов.....	13
1.4. Уравнение движения электропривода.....	17
1.5. Режимы работы электропривода.....	20
1.6. Структурные схемы и динамические свойства механической части электропривода.....	21
1.7. Переходные процессы в механической части электропривода.....	27
1.8. Переходные процессы при нелинейных зависимостях $M(t)$ и $M_C(t)$	30
1.9. Переходные процессы в механической части с упругой связью.....	32
1.10. Контрольные вопросы.....	35
2. Динамические процессы в электромеханическом преобразователе.....	36
2.1. Обобщенная электрическая машина.....	36
2.2. Электромеханическая связь в электромеханическом преобразователе.....	39
2.3. Системы координат обобщенной электрической машины.....	40
2.4. Ограничения на процессы преобразования энергии в ЭМП.....	43
2.5. Контрольные вопросы.....	45
3. Электромеханические свойства электродвигателей.....	45
3.1. Естественные и искусственные характеристики. Виды изменения переменных.....	45
3.2. Обобщенная модель машины постоянного тока независимого возбуждения.....	46
3.3. Основные характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения.....	50
3.4. Естественные и искусственные характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения.....	54
3.5. Пуск и торможение двигателей постоянного тока независимого возбуждения.....	58
3.6. Структурные схемы двигателя постоянного тока независимого возбуждения.....	61
3.7. Описание электромеханических процессов в двигателе постоянного тока последовательного возбуждения.....	64
3.8. Статические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.....	66

3.9. Искусственные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.....	68
3.10. Торможение двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.....	71
3.11. Особенности двигателя смешанного возбуждения.....	73
3.12. Математическое описание электромеханических процессов в асинхронном электродвигателе.....	75
3.13. Описание статических режимов асинхронного двигателя.....	76
3.14. Статические характеристики асинхронного двигателя.....	78
3.15. Искусственные характеристики асинхронного двигателя.....	81
3.16. Динамические свойства асинхронного двигателя.....	85
3.17. Электромеханические свойства синхронного двигателя.....	88
3.18. Динамические свойства синхронного двигателя.....	91
3.19. Контрольные вопросы.....	92
4. Энергетика электропривода.....	93
4.1. Потери энергии в статических режимах.....	93
4.2. Потери энергии в переходных процессах.....	94
4.3. Нагрев и охлаждение электродвигателей.....	97
4.4. Нагрузочные диаграммы.....	99
4.5. Общий порядок выбора электродвигателей.....	100
4.6. Номинальные режимы электродвигателей.....	101
4.7. Методы выбора электродвигателей по мощности.....	103
4.8. Учет ухудшения условий охлаждения.....	106
4.9. Выбор электродвигателя для продолжительного режима.....	107
4.10. Выбор электродвигателя для кратковременного режима.....	108
4.11. Выбор электродвигателя для повторно-кратковременного режима.....	109
4.12. Допустимое число включений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	110
4.13. Контрольные вопросы.....	112
Литература.....	113

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Захаренко Сергей Иванович

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Пособие

**по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-53 01 05
«Автоматизированные электроприводы»
дневной и заочной форм обучения
В двух частях
Часть 1**

Электронный аналог печатного издания

Редактор *Н. В. Гладкова*
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 10.07.09.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 6,74. Уч.-изд. л. 5,8.

Изд. № 117.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр учреждения образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0549424 от 08.04.2009 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.