

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального  
образования

Санкт-Петербургский государственный горный институт  
им. Г.В. Плеханова (технический университет)



**Алексеев В.В.**

**КРАТКИЙ  
КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ  
"ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД"**  
Часть I  
*для специальности ЭР*

**Санкт-Петербург' 2009**

## 1. Основные законы, назначение, классификация, составные части ЭП

Электроэнергия является одним из эффективных видов энергии, используемых в промышленности. Электрическая энергия большей частью преобразуется в механическую энергию, (для приведения в действие машин, механизмов, станков) с помощью электрических *двигателей* (ЭД).

*Электрический привод (ЭП) служит не только для преобразования энергии, но и для управления энергией с помощью электрических сигналов.* ЭП кроме двигательного устройства ДУ и рабочей машины РМ может иметь: задающее устройство ЗУ, управляющее устройство УУ (САУ), преобразователь энергии Пр передаточное устройство ПУ, датчики-преобразователи информации ДПИ. Основное звено ЭП - *электрическая машина ЭМ {ЭД или далее просто (Д)}* [1-4]. *Разомкнутая система привода не содержит устройств обратной связи.*

Выходными координатами привода являются электромагнитный момент  $M$ , (или сила  $F$ ), обеспечивающие функционирование РМ, координаты движения угловая  $\omega$  или линейная  $v$  скорости (или соответствующие отрезки пути  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta s$ ).

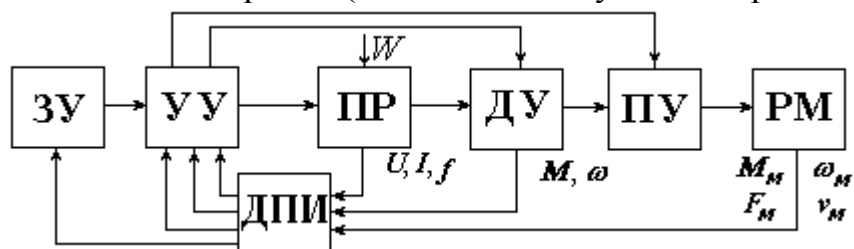


Рис.1

Назначение основных элементов ЭП

1. *Передаточное устройство* - для преобразования форм движения и передачи механической энергии от двигателя к рабочим органам машины.

2. *Двигательное устройство* преобразует электрическую энергию в механическую, а также формирует совместно с ПУ заданные формы движения рабочих органов и, обычно, содержит один или несколько электродвигателей. В современных электроприводах применяются различные типы ЭД, отличающиеся по роду тока, типу исполнения, принципу действия и т.д. Двигатель в ЭП может работать не только в двигательном, но и в тормозном (генераторном) режиме.

3. *Преобразователь* – это устройство связанное с источником электроэнергии  $W$  служащее для преобразования одного вида электроэнергии в другой, формирования и усиления по мощности сигналов управления УУ. Например, Пр может быть выпрямителем или служить для преобразования напряжения 380 В, 50Гц в напряжение переменной амплитуды и частоты.

4. *Управляющее устройство совместно с информационным устройством* (датчиками-преобразователями информации ДПИ) формируют заданные законы управления (потоком энергии  $W$  и движением рабочей машины РМ). *ДПИ преобразует координаты ЭП в электрические сигналы.*

5. *Задающее устройство* формирует управляющие воздействия УУ, используя информацию ДПИ.

Таким образом, автоматизированный ЭП по рис.1 – это разновидность электромеханической системы автоматического управления САУ.

### Основные законы электромеханических преобразований

**Первый закон.** *Электромеханическое преобразование энергии не может осуществляться с КПД, равным 100% (КПД < 100%).*

**Второй закон.** *Все электрические машины обратимы, т. е. одна и та же*

*машина может работать в режимах двигателя и генератора.*

**Третий закон.** *Электромеханическое преобразование энергии осуществляется полями, неподвижными относительно друг друга, а результирующее поле в машине создается полями статора и ротора. Ротор может вращаться с той же скоростью, что и поле, или с другой скоростью, однако поля ротора и статора в установившемся режиме неподвижны относительно друг друга.*

В самом простейшем случае электропривод представляет собой двигатель, получающий питание от сети, и, приводящий в движение какой-либо механизм. В этом случае преобразовательное устройство отсутствует. Передаточное устройство представляет собой соединительную муфту, а управляющее устройство сводится к тривиальному рубильнику или пакетному выключателю, подключающим двигатель к сети.

### Классификация электроприводов

Электроприводы, применяющиеся в настоящее время, принято классифицировать по следующим критериям:

- ☐ по способу передачи энергии от ЭД к механизму;
- ☐ по виду движения;
- ☐ по типу передаточного устройства;
- ☐ по роду тока (например, с двигателем постоянного тока ДПТ).

В зависимости от способа передачи энергии электроприводы в свою очередь делятся на:

- ☐ групповые;
- ☐ индивидуальные (одиночные);
- ☐ взаимосвязанные;
- ☐ многодвигательные

**Групповым** называется электропривод, в котором один двигатель приводит в движение с помощью передаточных устройств группу машин или механизмов одной машины. Кинематическая цепь такого электропривода является чрезвычайно сложной, а сам электропривод неэкономичным и ненадежным. Групповой электропривод в настоящее время применяется крайне редко. В качестве примера группового электропривода можно привести электропривод угольного комбайна, у которого от одного двигателя приводится в движение механизмы исполнительного органа и подачи.

**Индивидуальным** называется электропривод, в котором один двигатель приводит в движение *только одну производственную машину или один механизм*. Этот тип электропривода не имеет недостатков, присущих групповому. Индивидуальный электропривод позволяет обеспечивать оптимальные режимы работы механизма, при которых достигается либо наибольшая производительность, либо наибольшая экономичность технологического процесса. В качестве примеров индивидуального электропривода можно привести электроприводы буровых установок, шахтных подъемников, вентиляторов, насосов и т.д.

**Взаимосвязанный электропривод представляет собой совокупность индивидуальных электроприводов, объединенных общностью функционального назначения производственной машины.** Например, взаимосвязанный электропривод карьерного экскаватора объединяет три индивидуальных электропривода механизмов тяги или напора, подъема и поворота.

**Многодвигательный электропривод характеризуется тем, что одна производственная машина или механизм приводится в движение несколькими двигателями.** Такая необходимость возникает обычно по конструктивным соображениям. В ряде случаев это позволяет в механизмах распределить усилия равномерно, устранить несимметрию, перекосы и т.д. Примерами такого электропривода являются электроприводы цепного конвейера, разводного моста, большегрузного крана.

По виду движения электроприводы делятся на вращательные и линейные. Первые обеспечивают вращательное однонаправленное и вращательное двунаправленное движение рабочего органа производственной машины.

По виду передаточного устройства ЭП делятся на редукторные и безредукторные.

По роду тока электроприводы, в зависимости от рода тока ЭД, подразделяются на электроприводы постоянного и переменного тока.

По регулируемости – регулируемые и нерегулируемые.

По управляемости – с ручным, полуавтоматическим управлением, замкнутые.

Задача любого электропривода, в конечном счете, состоит в выполнении заданных по технологическим требованиям законов движения рабочего органа с максимальным приближением. При реализации этой задачи часто исходят из того, что закон движения ротора двигателя пропорционален закону движения для рабочего органа, т.е. имеется жесткая система (одномассовая). Однако нельзя забывать, что механические звенья передаточных устройств могут вносить искажения в передаваемые движения. Последние возникают из-за наличия в механических звеньях инерционности, зазоров и упругих связей. (К передаточным устройствам относятся: редукторы, винтовые, зубчато-реечные, ременные передачи, барабаны с тросами, кривошипно-шатунные механизмы и т.д.). Зачастую эти искажения являются несущественными и с ними можно не считаться. В настоящем курсе влияние перечисленных параметров не рассматривается.

## **2. Характеристики электрических приводов**

### **Статические и динамические характеристики**

Так как при изучении «электрического привода» рассматривается процесс преобразования электрической энергии в механическую, то основной интерес представляют механические характеристики ЭП.

**Механические характеристики ЭП – это зависимости скорости от момента на его валу  $\omega = f(M)$  или электромагнитного момента от частоты вращения его вала.** Следует иметь в виду, что  $M$  – это электромагнитный момент, и, следовательно механические и магнитные потери ( $M_0$ ) ЭД относят к статической нагрузке  $M_c = M_0 + M_2$ .

**Статический момент нагрузки ( $M_{ст}$  или  $M_c$ ) – момент на валу рабочего органа производственной машины, обусловленный действием полезных и**

**вредных сил.** При этом зависимость статического момента от скорости рабочего органа (рис.2,а) называется **механической характеристикой механизма**. На практике используют  $\omega_M = f(M_c)$ . Зависимости, рассматриваемые в установившихся режимах работы ЭП, называют статическими техническими характеристиками. Например, **механическая характеристика представляет собой прямую параллельную оси частот вращения у грузоподъемного механизма. Механическая характеристика (вентиляторная) центробежного насоса представляет собой параболу (турбомеханизмы).**

Учитывая, что электрическая машина реверсивна, т.е. в зависимости от способа включения может иметь вращение в ту или другую сторону, а также обратима, **механические характеристики ЭП рассматривают в 4-ех квадрантах на плоскости ( $\omega, M$ )** с учетом того, что в генераторном режиме ЭМ, поглощает механическую энергию вращающей ее машины.

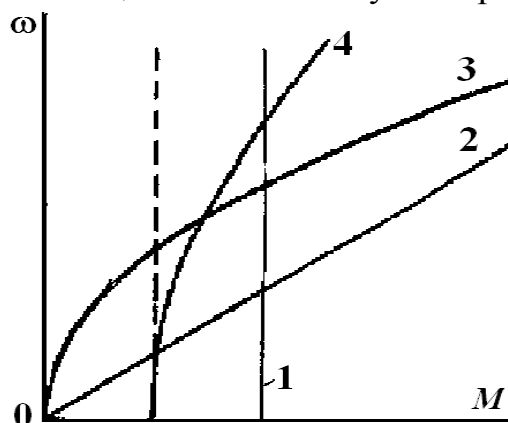


Рис.2,а. Зависимости статических моментов PM от скорости. 1.  $M=const$ ; 2.  $M=K\omega$ ; 3.  $M=K\omega^2$ ; 4.  $M=M_0+K\omega^2$

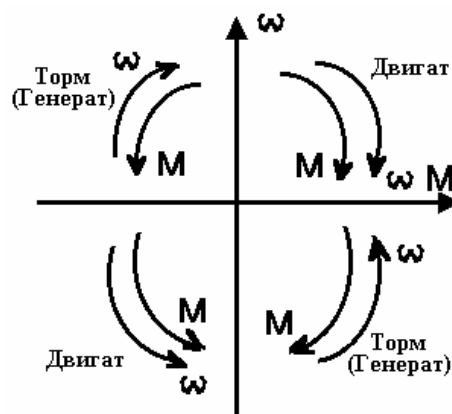


Рис.2,б. механические характеристики двигателя при разных режимах работы.

**Двигательный режим** работы изображается в I и III четвертях (**декартовой плоскости**), где направление вращения и направление момента совпадают.

**Генераторный режим** изображается в II и IV четвертях. В этих квадрантах момент, развиваемый машиной, направлен встречно вращению и препятствует вращению, т.е. электрическая машина является тормозом. **В режиме генераторного торможения электромагнитный момент, развиваемый двигателем, изменяет свой знак и препятствует вращению, т.е. машина является тормозом. Направление действия ЭДС в проводнике определяется правилом правой руки.**

**Механические характеристики электрических машин:**

**Естественной механической характеристикой** называют зависимость  $\omega = f(M)$  при номинальном напряжении (и частоте питающей сети), при штатном соединении обмоток и отсутствии добавочных сопротивлений в электрических цепях двигателя.

**Искусственные механические характеристики**, - это зависимости  $\omega = f(M)$  при напряжении или частоте, отличающихся от номинальных значений, (и) или при наличии сопротивлений в цепях машины.

**Для оценки жесткости** (наклона характеристики к оси абсцисс) используют

а) **Показатель жесткости** или коэффициент крутизны характеристик (см. рис.3), представляющий собой отношение изменения скорости к изменению момента, **выраженное в процентах** или относительных единицах

$$\beta = \frac{\delta\omega}{\delta M_{\Sigma}} \times 100\%; \quad \beta = \Delta v / \Delta \mu = (\Delta\omega / \omega_n) / (\Delta M / M_n); \quad (\text{см. рис.3}).$$

К относительным единицам относятся:

$$\mu = M / M_n; \quad v = \omega / \omega_n; \quad u = U / U_n; \quad \rho = r / R_n, \quad \text{где } R_n = U_n / I_n; \quad i = I / I_n; \quad \varphi = \Phi / \Phi_n; \quad \Delta v = \Delta\omega / \omega_n.$$

Принято считать **характеристики**: при  $\beta=0$  **абсолютно жесткими** (синхронный двигатель); при  $\beta=1...10\%$  – **жесткими** (двигатель независимого возбуждения – ДПТ НВ); при  $\beta>10$  – **мягкими** (серийный двигатель) см. рис.4

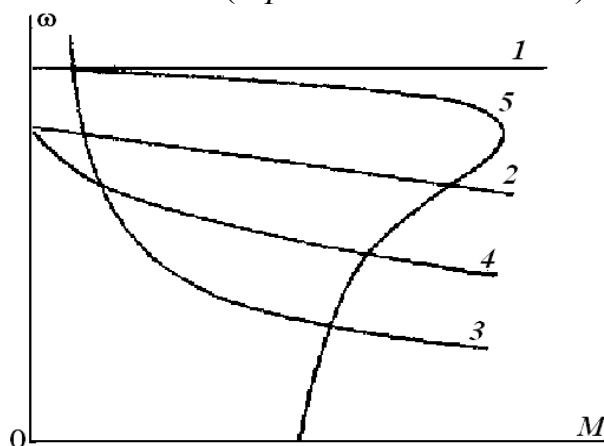
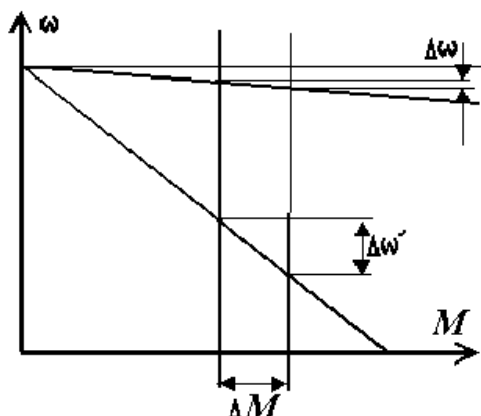


Рис.3. К понятию показателя жесткости или коэффициента крутизны характеристики

Рис.4. механические характеристики ЭД.

1 — абсолютно жесткая СД; 2 — жесткая ДПТ НВ; 3 — мягкая серийного двигателя; 4 — мягкая ДПТ смешанного возбуждения; 5 — характеристика АД

Величина, обратная коэффициенту крутизны

$$\gamma = \frac{1}{\beta}, \quad \gamma = \Delta \mu / \Delta v = (\Delta M / M_n) / (\Delta \omega / \omega_n) - \text{коэффициент жесткости.}$$

б) для сравнения естественных и искусственных характеристик пользуются коэффициентом статизма (статизм).

$$\delta = \frac{\Delta \omega_{\text{иск}}}{\Delta \omega_{\text{ест}}} \quad \text{при } \Delta M = \text{const}$$

в) регулировочные свойства двигателя или системы электропривода оцениваются величинами:

Диапазон регулирования  $D = \omega_{\text{max}} / \omega_{\text{min}}$ . Коэффициент плавности  $k_{\text{пл}} = \frac{\omega_i}{\omega_{i-1}}$ . При

$k_{\text{пл}} \rightarrow 1$  регулирование считается плавным, при  $k_{\text{пл}} > 1$  – ступенчатым.

**Также оцениваются:** *Плавность регулирования. Диапазон регулирования. Стабильность частоты вращения, степень воздействия на технологические параметры производственного процесса (давление, химический состав, температуру и т.д.).*

Кроме статических характеристик электрические приводы оцениваются также **динамическими характеристиками**, отражающими поведение электрического привода при переходных процессах. Наиболее часто используются переходные характеристики, т.е. зависимость для интересующих нас координат (скорости, тока, момента) во времени при единичном воздействии скачка на входе системы (Рис.5). Обычно качество переходного процесса оценивается следующими показателями:

а) время процесса  $t_p$ , т.е. время вхождения величины в зону  $(0,95+1,05)X_{\text{уст}}$ , когда

отклонение выходной величины от ее установившегося значения делается менее 5%.

б) перерегулирование выходной величины

$$\sigma = \frac{\chi_{\text{вых max}} - \chi_{\text{вых уст}}}{\chi_{\text{вых уст}}} 100\%;$$

в) количество колебаний до окончания процесса (за время  $t_n$ ).

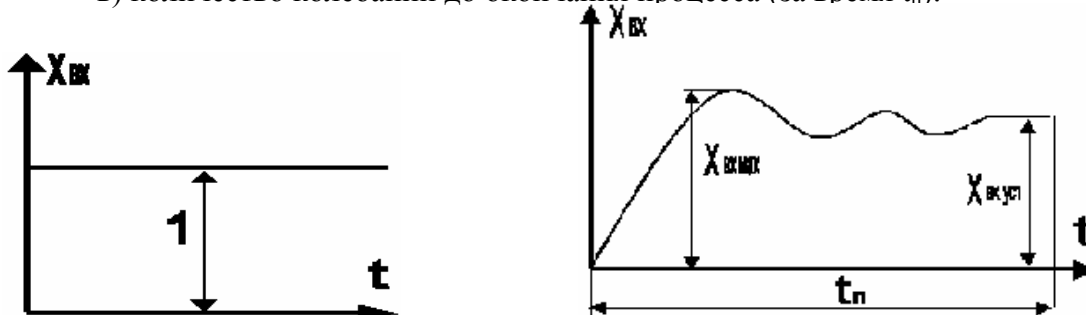


Рис.5,6. К понятию переходных характеристик.

### Условные обозначения и способы выполнения электрических схем

Виды электрических схем.

Принципиальные (развернутые) или элементные (рис.7). В этих схемах выделяются силовые цепи и цепи управления. Элементы аппаратов располагаются по условию простоты чтения схемы. Принадлежность элементов к одному и тому же аппарату отражается в одинаковых буквенных индексах.

Однолинейные схемы обычно используются при изображении схем электроснабжения. Все сети обозначаются одной линией. Аппараты управления защиты, контроля, сигнализации или не указываются или изображаются без схемы соединений (рис.8).

Монтажные. В монтажных схемах все элементы изображаются в соответствии с их формой и расположением. Соединения показываются расположенными так, как их должен выполнить монтажник. Показываются клеммники, точки соединений. Указывается тип провода или кабеля, способ прокладки, длина кабельных соединений.

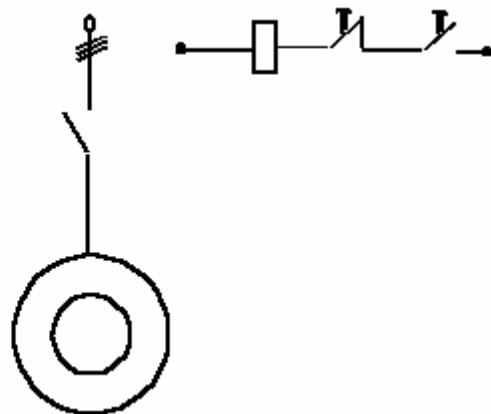
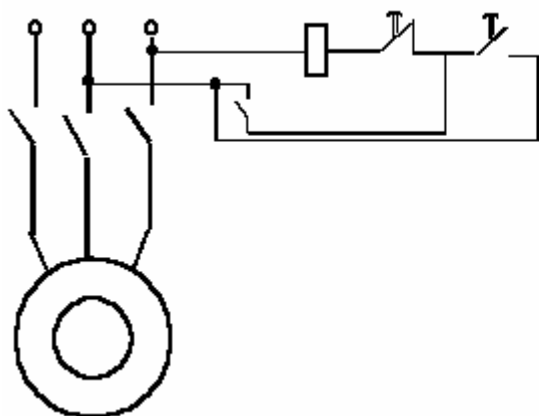


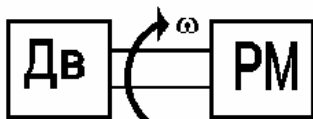
Рис.7. Принципиальные (развернутые) электрические схемы

Рис.8. Однолинейные электрические схемы

### 3. Механика электрического привода. Основные уравнения движения

Раздел "Механика электропривода" рассматривает движение рабочей машины и электропривода под действием моментов двигателя и рабочей

машины. Рассмотрим простейший механизм (рис.9), у которого все элементы имеют одну и ту же угловую скорость  $\omega$ , что и ротор (якорь) двигателя (насосы, вентиляторы).



**Рис. 9. Простейший механизм, у которого все элементы имеют одну и ту же угловую скорость  $\omega$ .**

Для этой системы уравнение закона сохранения энергии может быть записано в виде

$$A_{\text{дв}} = A_{\text{ст}} + A_{\text{кин}}$$

Работа, совершаемая двигателем, идет на преодоление статических сопротивлений как полезных (подъем или перемещение груза, измельчение породы и т.п.), так и сопротивлений, связанных с потерями (трение, потери в передачах и т.п.), а также на сообщение движущимся частями двигателя и механизма кинетической энергии.

Для вращательного движения  $A_{\text{кин}} = J\omega^2/2$  где:  $J$  – суммарный момент инерции всех движущихся частей системы. Так как  $dA/dt = P$ , то взяв производную по времени от уравнения работ, получим уравнение

$$P_{\text{дв}} = P_{\text{ст}} + d(A_{\text{кин}})/dt.$$

**При вращательном движении  $P = M\omega = M_{\text{дв}}\omega$ , поэтому, учитывая, что угловые скорости всех элементов одинаковы, запишем**

$$M_{\text{дв}}\omega = M_{\text{ст}}\omega + J \frac{2\omega}{2} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ}{dt}$$

$$\text{или } M_{\text{дв}} - M_{\text{ст}} = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ}{dt} \quad \text{основное уравнение движения ЭП.}$$

Для механизмов с неизменным моментом инерции, т.е.  $J = \text{const}$ ,

$$M_{\text{дв}} - M_{\text{ст}} = J \frac{d\omega}{dt} \quad \text{или } M_{\text{эд}} - M_{\text{с}} = M_{\text{дин}}.$$

где  $J$  – приведенный к валу двигателя момент инерции привода.

**\*Физической величиной, определяющей инерционность тела**, является масса, **вращающегося тела – момент инерции**. В практических расчетах момент инерции вращающегося тела относительно оси, проходящей через его центр тяжести, выражают через произведение массы тела на квадрат радиуса инерции  $\rho^2$ . Для цилиндра  $\rho^2 = R^2/2$  для полого цилиндра  $\rho^2 = (R^2 + r^2)/2$ ; для прямоугольной призмы  $\rho^2 = (b^2 + c^2)/12$  и т.д.

$J \frac{d\omega}{dt}$  – момент идущий на сообщение системе углового ускорения  $\frac{d\omega}{dt}$ . Эту величину принято называть динамическим моментом  $M_{\text{дин}} = J d\omega/dt$ .

При  $M_{\text{дв}} > M_{\text{ст}}$ ,  $M_{\text{дин}} > 0$ ,  $\frac{d\omega}{dt} > 0$ , что соответствует ускорению системы.

При  $M_{\text{дв}} < M_{\text{ст}}$ ,  $M_{\text{дин}} < 0$ ,  $\frac{d\omega}{dt} < 0$ , т.е. происходит замедление.

При  $M_{\text{дв}} = M_{\text{ст}}$ ,  $M_{\text{дин}} = 0$ ,  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ , т.е. система движется равномерно.

Основное уравнение движения написано для простейшего (одновального) механизма, у которого все элементы имеют одинаковую угловую скорость.

### Приведение моментов сил и маховых масс

Для более сложных машин, имеющих элементы, вращающиеся с другими угловыми скоростями, или элементы, движущиеся поступательно получают **приведенную механическую**

**часть ЭП** где имеется один вал и все движущиеся массы вращаются с одной скоростью. При этом все моменты, силы, а также инерционные массы заменяются эквивалентными моментами и маховыми массами, приложенными к одному валу.

Приведение моментов, сил и маховых масс **выполняется из условия сохранения неизменной механической мощности**, затрачиваемой для преодоления этих сил и кинетической энергии, запасаемой инерционными массами в исходной и приведенной системах. Приведение осуществляется обычно к валу двигателя.

**А. Приведение моментов (рис.10).** При установившемся режиме  $M_{дв} = M_{ст}$  мощность развиваемая двигателем в идеальной системе  $M_{дв} \omega_{дв}$ , а в реальной  $M_{дв} \omega_{дв} \eta_{ред}$



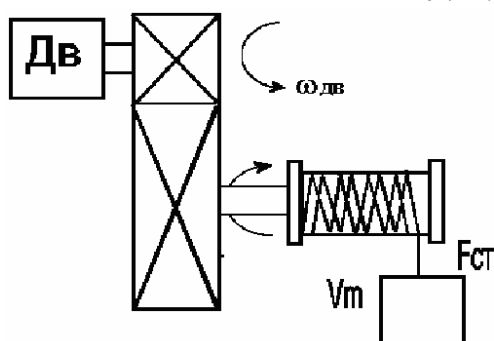
Рис.10. Приведение моментов.

т.к.  $\frac{\omega_{дв}}{\omega_{м}} = i$  - общее передаточное число редуктора, то  $M'_{ст} = \frac{M_{ст}}{i \eta_{ред}}$

$M'_{ст}$  - статический момент механизма, приведенный к валу двигателя.

**Б. Приведение статических сил в элементах, движущихся поступательно (рис.10):**

исходная система  $F_{ст} V_{м} = M_{дв} \omega_{дв} \eta_{ред}$ ; приведенная  $M_{дв} \omega_{дв} = M'_{ст} \omega_{дв}$



Для исходной системы

$$F_{ст} V_{м} = M_{дв} \omega_{дв} \eta_{ред}$$

Для приведенной системы

$$M_{дв} \omega_{дв} = M'_{ст} \omega_{дв}$$

$$M'_{ст} = (F_{ст} V_{м}) / (\omega_{дв} \eta_{ред})$$

Рис.11. Приведение статических сил в элементах, движущихся поступательно.

**В. Приведение моментов инерции элементов, совершающих вращательное движение:**  $\frac{J_{м} \omega_{м}^2}{2} = \frac{J' \omega_{дв}^2}{2}$ , отсюда  $J' = \frac{J_{м} \omega_{м}^2}{\omega_{дв}^2}$  или  $J' = \frac{J_{м}}{i^2}$ .

**Г. Приведение инерционных масс элементов, движущихся поступательно:**

$$m_{\text{м}} V_{\text{м}}^2 / 2 = J' \omega_{\text{дв}}^2 / 2; \quad J' = \frac{m_{\text{м}} V_{\text{м}}^2}{\omega_{\text{дв}}^2}$$

### Продолжительность переходного процесса

*Уравнение движения электропривода дает возможность найти продолжительность переходного процесса пуска, перехода с одной скорости на другую и торможения привода*, например при  $J = \text{const}$  ( $m = \text{const}$ ) уравнение

движения имеет вид  $M_{\text{дв}} - M_{\text{см}} = J \frac{d\omega}{dt}$ ; где  $J = J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{м}}}{i^2}$ .

После разделения переменных получим время пуска

$$dt = J \frac{d\omega}{M_{\text{дв}} - M_{\text{см}}}; \quad t = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{M_{\text{дв}} - M_{\text{см}}}.$$

Интегрирование в типовых случаях упрощается.

При разгоне (реостатный пуск) со скорости  $\omega_1$  до  $\omega_2$  с постоянными моментами двигателя, сопротивления и инерции приближенно время

$$t_{\text{п}} = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M_{\text{дв}} - M_{\text{см}}}$$

При пуске с нулевой скорости  $\omega_1 = 0$  до  $\omega_2 = \omega_c$  со средним моментом двигателя  $M_{\text{дв.ср}}$ , где  $M_{\text{дв.ср}} = \alpha M_{\text{ном}}$  ( $\alpha = 1,2 - 2$ );  $J = \text{const}$ ; получим

$$t_{\text{п}} = J \frac{\omega_c}{(\alpha \cdot M_{\text{ном}}) - M_{\text{см}}},$$

где  $\omega_c$  – скорость при  $M_{\text{дв}} = M_{\text{ст}}$  (при разгоне на участке  $\omega_c - \omega_1$ ).

При торможении, когда  $M_{\text{дв}}$  меньше  $M_{\text{ст}}$ , но  $M_{\text{дв}} \neq 0$ .

$$t_{\text{т}} = J \frac{\omega_c - \omega_2}{M_{\text{дв}} + M_{\text{см}}}.$$

При торможении только под действием постоянного момента статического сопротивления без использования тормозного момента двигателя  $M_{\text{дв}}$ , ( $M_{\text{дв}} = 0$ )

$$t_{\text{т}} = J \frac{\omega_c}{M_{\text{см}}}.$$

Из уравнения движения, пользуясь правилом определения максимума ускорения  $d\omega/dt = (i(M - M_{\text{ст}}))/J$ , можно найти оптимальное передаточное число редуктора, соответствующее минимальному времени переходного процесса

$$i_{\text{онм}} = \frac{M_{\text{см}}}{M_{\text{дв}}} + \sqrt{\left(\frac{M_{\text{см}}}{M_{\text{дв}}}\right)^2 + \frac{J_{\text{м}}}{K \cdot J_{\text{дв}}}}, \quad (\text{при } M_{\text{с}}/M_{\text{дв}} \ll 1) \quad i_{\text{онм}} = \sqrt{\frac{J_{\text{м}}}{K \cdot J_{\text{дв}}}}.$$

где  $K$  – коэффициент учитывающий момент инерции передачи.

### Механические характеристики рабочих машин

#### Определение скоростного режима ЭП на основании уравнения движения

На основании уравнения движения электропривода может быть определен скоростной режим работы электропривода. Однако, рассматривая уравнение движения, необходимо иметь в виду, что момент двигателя и момент

сопротивления в общем случае являются переменными величинами.

Изменение момента в зависимости от скорости может быть представлено механической характеристикой ЭМ в координатах  $M, \omega$ .

**Момент сопротивления рабочих машин** также является функцией скорости. В общем виде **механическая характеристика РМ** может быть представлена в виде

$$M_{ct} = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^x,$$

где:  $M_0$  - начальный момент (при  $\omega = 0$ );  $M_{сн}$  - момент сопротивления при работе с номинальной скоростью ( $\omega = \omega_{ном}$ );  $x$  - показатель степени.

Для ряда машин  $x = 0$ , тогда  $M_{ct} = M_{сн} = \text{const}$  (рис.12), т.е. момент сопротивления не зависит от скорости. Некоторые рабочие машины характеризуются **активным моментом, не зависящим не только от величины, но и от направления скорости**, который сам может вызвать движение привода. В этом случае при одном направлении вращения момент противодействует движению, а в противоположном – способствует. Примером таких механизмов являются **грузоподъемные механизмы: подъемные машины, лебедки, краны**, у которых момент сопротивления в основном определяется величиной поднимаемого (опускаемого) груза.

У других механизмов, особенно таких, где основным видом сопротивления является трение (**конвейеры**), при изменении направления движения момент сопротивления также меняет свой знак. **Такой момент сопротивления всегда направлен встречно направлению движения. Его принято называть реактивным** (рис.13).



Рис.12.  $\omega = f(M_c)$  при  $x=0$ ,  $M_c = \text{const}$

При  $x=2$

$$M_{ct} = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2$$

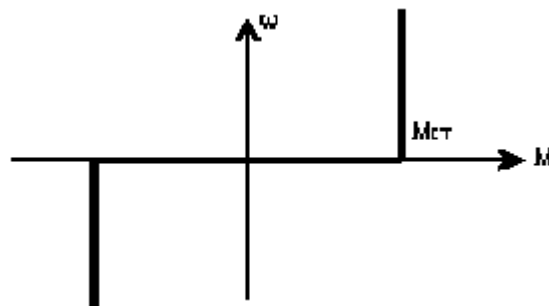


Рис.13. Реактивный момент сопротивления

Характеристики такого вида (вентиляторные характеристики) близкие к параболе (см. рис.2,а – характеристики 3 и 4) имеют **турбомашины (центробежные насосы, вентиляторы, турбокомпрессоры)**.

Для целого ряда механизмов момент сопротивления является функцией не только скорости вращения, но и других факторов (пути, времени и т.п.). Особо следует отметить механизмы, ведущие непрерывное разрушение неоднородного материала горных пород), таких, как например, дробилки. У этих механизмов момент сопротивления является случайной функцией времени. При точном определении режимов работы необходимо использовать математический аппарат теории вероятностей и математической статистики.

### Скоростные режимы электропривода. Статическая устойчивость

**Скоростной режим ЭП** определяется при совместном рассмотрении моментов двигателя и механизма и их механических характеристик путем применения основного уравнения движения.

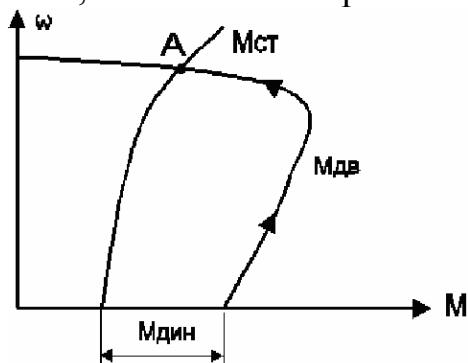
1. Рассмотрим, например, систему асинхронный двигатель (АД)-механизм (с вентиляторной характеристикой). Как видно из рис.14:

а) при пуске  $M_{дв} > M_{ст}$ ,  $\frac{d\omega}{dt} > 0$ , и привод будет разгоняться;

б) в точке А  $M_{дв} = M_{ст}$ , т.е. начнется равномерное движение;

2. Рассмотрим ту же систему при  $M_{ст} = \text{const}$  (рис.15)

В этом случае при пуске (при  $\omega = 0$ )  $M_{дв} < M_{ст}$ , т.е. пуск двигателя невозможен, т.к. момент сопротивления реактивный, то двигатель будет стоять.



Совместное рассмотрение механических характеристик двигателя и механизма

Рис.14

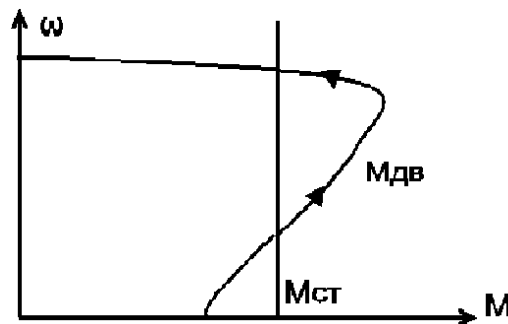


Рис.15

3. Рассмотрим случай спуска груза (активный  $M_{ст}$ ) (рис.16.), когда  $M_{ст} < 0$

а) при включении в сеть  $\omega = 0$   $J \frac{d\omega}{dt} = M_{\partial в} - (-M_{ст}) = M_{\partial в} + M_{ст}$ , т.е. привод будет разгоняться под действием момента двигателя и момента, развиваемого спускающимся грузом.

б) при разгоне АД до  $\omega_{синхр.}$  момент асинхронного двигателя делается равным нулю, но под действием груза происходит дальнейший разгон привода до скорости  $\omega > \omega_{синхр.}$  При этом АД переходит в тормозной режим, и его момент будет направлен встречно моменту нагрузки. Теперь уравнение движения примет вид:  $J \frac{d\omega}{dt} = -M_{\partial в} - (-M_{ст}) = -M_{\partial в} + M_{ст}$ . При  $|M_{\partial в}| = |M_{ст}|$ ,  $J \frac{d\omega}{dt} = 0$  и начинается равномерное движение электропривода в точке А.

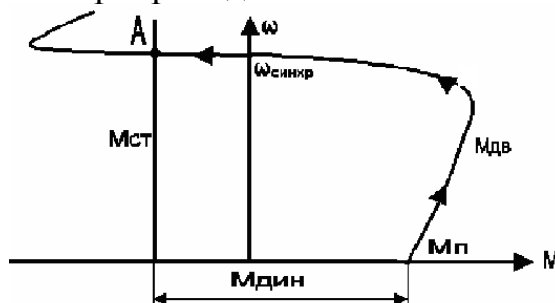


Рис.16. Совместное рассмотрение механических характеристик АД и механизма при  $M_{ст} < 0$

### Пример регулирования скорости электропривода

Рассмотрим скоростной режим (регулирование скорости) ЭП постоянного тока при изменении сопротивления якорной цепи (активный  $M_{ст}$ ).

Пусть двигатель постоянного тока (ДПТ НВ) с независимым возбуждением

имел характеристику I (рис.17). В точке 1 происходит равномерное движение системы, т.к. момент двигателя  $M = M_{ст}$ . Если в цепь ввести сопротивление, то характеристика двигателя увеличит свой наклон и примет вид II. Процесс введения сопротивления в якорную цепь происходит быстро и за это время скорость привода существенно измениться не успевает. Поэтому переход работы двигателя на новую характеристику может быть изображен горизонтальным отрезком 1-2. Но при работе двигателя в точке 2  $M < M_{ст}$ , что приведет к замедлению. В точке 3  $M = M_{ст}$  и наступит установившийся режим при скорости привода изменившей направление. Аналогично 3-4-1 изображает обратный процесс при уменьшении сопротивления в якорной цепи.

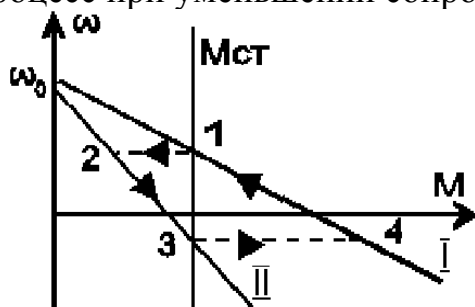


Рис.17

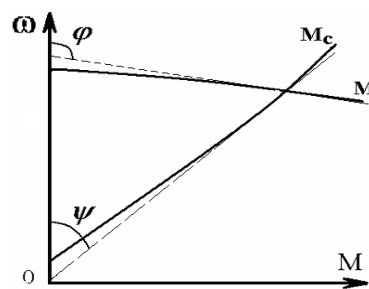


Рис.18

Таким образом, рассматривая совместно характеристики двигателей и рабочих машин, можно изучить скоростной режим электропривода, влияние на скорость, как нагрузки ( $M_{ст}$ ), так и электрических параметров, дающих возможность изменять момент двигателя ( $M$ ) и, следовательно, регулировать скорость электропривода.

Кроме того, рассмотрение характеристик дает возможность оценить **статическую устойчивость ЭП**. Считается, что ЭП статически устойчив, если при воздействии возмущающих воздействий возникают моменты, стремящиеся вернуть ЭП в равновесное состояние. Статическая устойчивость зависит от углов наклона механических характеристик двигателя и механизма рис.18.

**Условие статической устойчивости:**  $\operatorname{tg} \varphi < \operatorname{tg} \psi$  или  $dM/d\omega < dM_{ст}/d\omega$ .

### Статические характеристики ЭП постоянного тока

**Свойства ЭП определяют механическая (и скоростная) характеристики:**

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{M \cdot R_{я}}{k^2 \cdot \Phi^2}. \quad (\omega = \frac{U - I_a \cdot R_{я}}{k \cdot \Phi}); \quad (1)$$

где:  $\Phi$ —магнитный поток,  $k$ —конструктивная постоянная,  $R_{я}=r_{я}+R_{д}$ — сопротивление якоря  $r_{я}$  и всех добавочных реостатов  $R_{д}$  в цепи якоря,  $U=U_{я}$ —напряжение якоря.

Уравнение моментной характеристики  $M_{э} = M = k \Phi I$  (для ДПТ НВ момент  $\equiv$  току)

Уравнение ЭДС якоря (противо-ЭДС для ДПТ).  $E_a = k \Phi \omega$ ,

где значение конструктивной постоянной (в системе СИ)  $k=c_e=c_m = pN/2\pi a$ ;  $p$  — число пар полюсов;  $N$  — число проводников обмотки якоря;  $a$  — число пар параллельных ветвей ОЯ.

**Противо-ЭДС, генерируемая в цепи якоря  $E=k\Phi\omega$ , увеличивается при увеличении частоты вращения или увеличении магнитного потока.** Электромагнитный (вращающий) момент  $M$  или  $M_{эм}$  связан с электромагнитной мощностью  $P_{эм}=I_a E$  и угловой скоростью  $\omega$ :  $M = P_{эм}/\omega$ , также полезный момент пропорционален полезной мощности  $M_2 = P_2/\omega$ .

Уравнение равновесия моментов: в двигательном режиме (ДПТ):  $M = M_0 + M_2$ , в генераторном режиме (ГПТ):  $M_1 = M_0 + M$ .

где  $M_{ст}=M_0 + M_2$  - статический момент нагрузки;  $M_0$  - момент холостого хода;  $M_2$  - полезный момент на валу;  $M_1$  - активный (подкручивающий) момент на валу;  $M$  - момент двигателя.

#### 4. Режимы работы ДПТ в электроприводе

##### Двигательный и тормозные режимы работы двигателя

Режимы работы МПТ на примере ДПТ с независимым возбуждением (ДПТ НВ) при  $\Phi = \text{const}$  представлены на рис.19

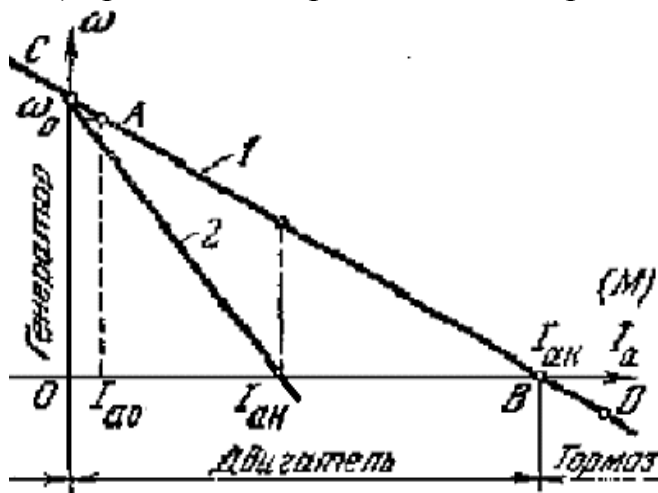


Рис.19,

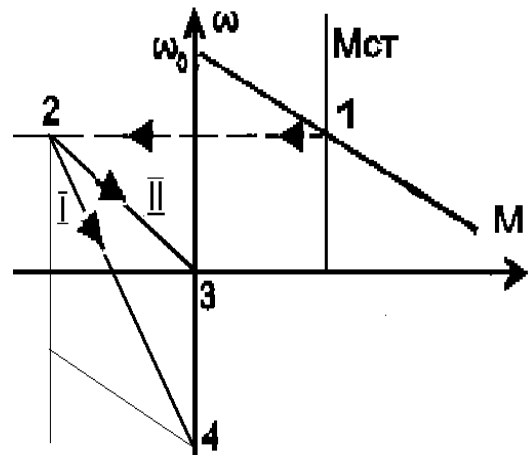


Рис.20

А. При работе в режиме двигателя на *естественной характеристике 1* ток равен  $I = (U - E_a) / r_{\text{я}}$ . В точке *В* ток (момент) двигателя достигает пускового значения  $I_n = I_{ak} = U / r_{\text{я}}$ .

**Пусковой ток ДПТ определяется напряжением и сопротивлением якоря  $I_n = U / R_{\text{я}}$ .**

**В цепь якоря ДПТ при пуске включают дополнительное сопротивление для ограничения величины пускового тока  $R_{\text{п}}$  [ $I_n = U / (r_{\text{я}} + R_{\text{п}})$ ].**

Б. При активном характере нагрузки, в (·) *Д*, электрическая машина может перейти в режим **торможения противовключением** при  $I = I_D = (U + E_a) / r_{\text{я}}$ . **Торможение противовключением (первого рода) применяется в электроприводах грузоподъемных механизмов** (например, привод барабана, на который наматывается трос с грузом). **Угол наклона характеристики в режиме торможения противовключением** можно менять, вводя дополнительное сопротивление в цепь якоря (характеристика 2) **для снижения тока до  $I_{\text{п}} = I_{an}$** . **Торможение противовключением (второго рода)** можно осуществить изменением знака или  $U$  или  $\Phi$  (характеристика *I*, рис.20).

**Динамическое торможение** – режим отключения от сети и включения на ходу сопротивления в цепь якоря  $\omega = - \frac{R_{\text{я}}}{k^2 \Phi^2} (-M_{\text{э}})$  (характеристика II на рис.20). При ( $M_{\text{т}} = k_1 / (r_{\text{я}} + R_{\text{т}})$ ). При этом **наклон механической характеристики определяется величиной сопротивления (тормозного) в цепи якоря  $R_{\text{т}}$ . Для увеличения тормозного момента при ДТ уменьшают величину тормозного сопротивления. Способ отличается большими потерями мощности.**

Если при работе ДПТ в режиме холостого хода к его валу приложить момент, направленный в сторону вращения якоря (разматывается трос с грузом), то скорость вращения, а, следовательно, и ЭДС  $E_a$  начнут возрастать, Частота

вращения якоря превысит  $\omega_0$ , частоту холостого хода (*пограничную скорость*). ЭДС станет больше напряжения, машина перейдет в **генераторный режим**: механическая энергия, затрачиваемая на вращение якоря, будет преобразовываться в электрическую и может поступать в сеть (*рекуперативное торможение*). Перевод в генераторный режим для **генераторного торможения** ДПТ НВ является **экономичным способом торможения**, но **недостатком его является осуществимость только при скоростях больше скорости холостого хода**. В генераторном режиме электромагнитный момент, не меняя знака  $\omega$ , является тормозящим, механическая характеристика имеет вид:

$$\omega = \omega_0 - \frac{R_{\text{я}}}{k^2 \Phi^2} (-M_{\text{э}}).$$

### Регулирование скорости ДПТ. Естественные, искусственные характеристики

Для регулирования скорости ДПТ используется изменение сопротивления якоря и магнитного потока (параметрические способы), регулирование напряжения якоря. Рассмотрим эти способы для двигателя с независимым возбуждением.

**А. Реостатная искусственная характеристика 2** (при  $U=U_n$ ,  $\Phi=\Phi_n$ ) получаются при введении сопротивления ( $R_p$ ) в цепь якоря (рис.21).

**Частота вращения холостого хода (пограничная скорость)  $\omega_0=U/(k\Phi)$  пропорциональна напряжению в цепи якоря** и при изменении сопротивления якорной цепи - не изменяется. **Наклон механических характеристик (рис.21) ДПТ НВ определяется величинами сопротивления в цепи якоря** ( $r_{\text{я}}$  – для естественной характеристики 1,  $(r_{\text{я}} + R_p)$  – для искусственной характеристики 2) **и величиной магнитного потока (прямая 3) (угловым коэффициентом  $b$ )**.

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{k^2 \Phi^2} M_{\text{э}}; \quad \omega = \omega_0 - b M_{\text{э}} = \omega_0 - \Delta\omega_{\text{иск}}; \quad b = \frac{r_{\text{я}} + R_p}{k^2 \Phi^2}; \quad \omega_0 = \frac{U}{k\Phi}.$$

По значениям  $M_0$ ,  $M_n$  и  $\omega_0$  строится естественная характеристика  $\omega = \frac{U_n}{k \cdot \Phi_n} - \frac{r_{\text{я}}}{k^2 \cdot \Phi_n^2} M_{\text{э}}$ .

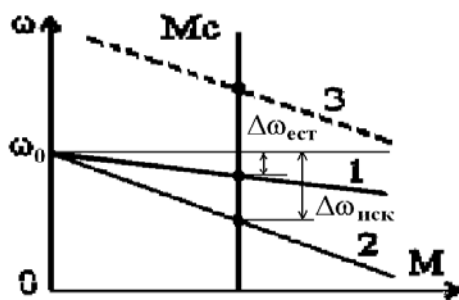


Рис.21. Характеристики ДПТ с независимым (параллельным) и возбуждением.

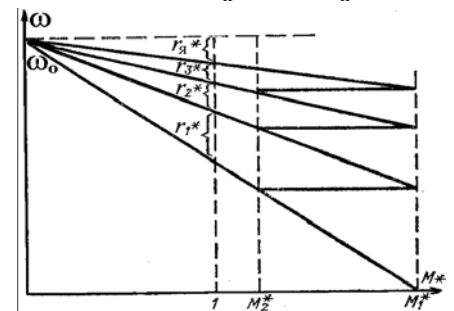


Рис.22 реостатные характеристики при реостатном пуске

*Изменение скорости вращения двигателя при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу, выраженное в процентах, называется **номинальным изменением скорости***

$$\Delta\omega_n = 100 (\omega_0 - \omega_n) / \omega_n$$

Зная коэффициент статизма  $\delta = \Delta\omega_{\text{иск}} / \Delta\omega_{\text{ест}} = r_{\text{я}} + R_p / r_{\text{я}}$ , можно построить искусственную характеристику по значению  $\Delta\omega_{\text{иск}} = (r_{\text{я}} + R_p) \Delta\omega_{\text{ест}} / r_{\text{я}} = \delta \Delta\omega_{\text{ест}}$ .

**Для способа регулирования мощных двигателей постоянного тока изменением сопротивления в цепи якоря характерна низкая экономичность процесса регулирования.**

Реостатные характеристики используются при пуске. Строится естественная характеристика. Определяются  $M_1$  и  $M_2$ , чтобы  $M_{cp} = (M_1 + M_2)/2$ ,  $M_2 > M_{ст}$ ,  $M_1 > 0,8M_{max}$ . Затем разбивка на ступени при  $m=3-8$ ,  $\Delta\omega \approx r_{я}$ , (рис.22) [4, 8]. **Реостат вводят и при торможении противовключением.**

**Б. Искусственные характеристики при изменении потока возбуждения** (при  $U=U_n$ ;  $R_p=0$ ), рис.23

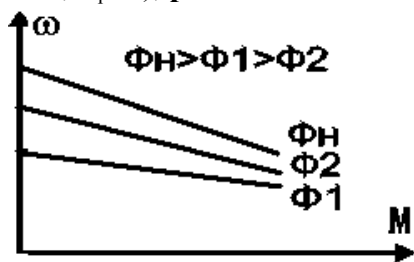


Рис.23: 
$$\omega = \frac{U_n}{k\Phi_n \alpha} - \frac{r_{я}}{k^2 \Phi_n^2 \alpha^2} M$$

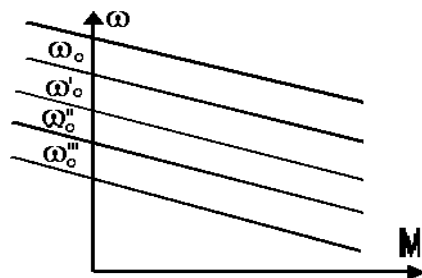


Рис.24: 
$$\omega = \frac{U}{k\Phi_n} - \frac{r_{я}}{k^2 \Phi_n^2} M$$

Номинальный магнитный поток машин близок к потоку насыщения. Поэтому изменение величины магнитного потока может вестись только в сторону снижения, т.е.  $\Phi < \Phi_n$  или  $\Phi = \alpha \Phi_n$ , где  $\alpha < 1$  – степень ослабления потока. При уменьшении потока пограничная скорость изменяется обратно пропорционально потоку ( $\omega \propto 1/\Phi$ ). Ослабление потока позволяет регулировать скорость вверх от естественной характеристики. При малых значениях тока обмотки возбуждения (ОВ), а тем более при обрыве цепи возбуждения ( $I_v = 0$ ) скорость вращения двигателя неограниченно возрастает, что приводит к «разносу» двигателя, т.е. его механическому разрушению. Поэтому в цепь ОВ не ставят выключатели и предохранители.

Следовательно, **нижний предел диапазона регулирования двигателя постоянного тока при изменении магнитного потока на холостом ходу ограничивается величиной индукции насыщения магнитной цепи.**

**Верхний предел диапазона изменения частоты вращения двигателя постоянного тока при регулировании изменением магнитного потока на холостом ходу ограничивается механической прочностью двигателя.**

**(Механические характеристики двигателя постоянного тока уменьшают свой наклон при увеличении магнитного потока  $\Phi$ ).**

Из уравнения моментной характеристики следует, что, **при неизменном моменте на валу и увеличении тока возбуждения (потока  $\Phi$ ) ток якоря двигателя постоянного тока уменьшится.** ( $\Phi$  увеличивается, ток уменьшается, а  $M_{э} = \text{const}$ )

**Способ регулирования двигателей постоянного тока изменением величины магнитного потока, не находит широкого применения в электроприводах из-за узости диапазона регулирования.**

**В. Изменение подводимого напряжения ( $\Phi = \Phi_n$ ,  $R_p = 0$ ).** Как видно из механической характеристики при изменении напряжения, подводимого к якорю ДПТ НВ, меняется пограничная скорость  $\omega_0$ , а угловой коэффициент остается неизменным (рис.24). **Искусственные механические характеристики двигателя постоянного тока сохраняют угол наклона при изменении напряжения якоря.**

Недостатком способа является необходимость генератора или управляемого выпрямителя, равного по мощности двигателю, что удорожает систему.

В настоящее время для **регулирования скорости изменением напряжения применяются тиристорные и транзисторные преобразователи (ТП), поэтому система носит название ТП-Д.** Двигатель в системе ТП-Д - независимого возбуждения (ДПТ НВ).

При использовании генератора в качестве регулируемого источника напряжения для якоря двигателя (ДПТ НВ) получают систему генератор–двигатель (Г-Д) рис.25. Система Г-Д предложена Леонардом и использует для регулирования скорости двигателя генератор, якорные цепи которых соединены. Напряжение изменяется по цепи возбуждения генератора.

## 5. Электропривод по системе Г-Д

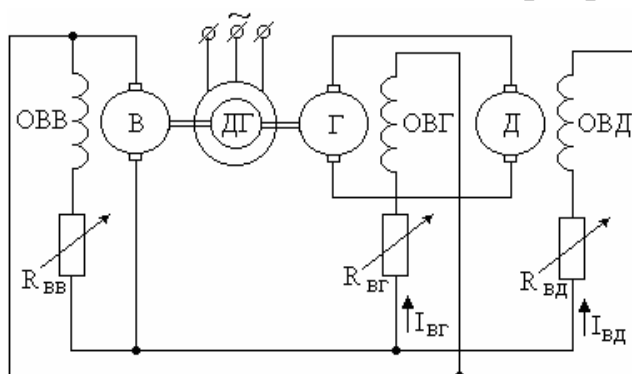


Рис.25 .

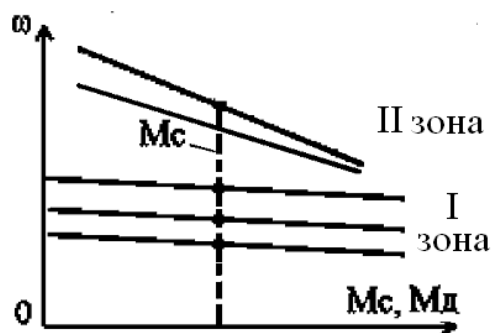


Рис.26.

Так выглядят схема и механические характеристики двигателя при двухзонном регулировании. (Скорость генератора поддерживается постоянной).

Основной недостаток электропривода, выполненного по системе Г-Д - низкий коэффициент полезного действия.

Основные элементы, входящие в состав системы Г-Д (в порядке роста мощности). Возбудитель генератора, исполнительный двигатель, генератор, гонный двигатель.

Выражение, описывающее механическую характеристику двигателя постоянного тока, работающего в системе Г-Д

$$\omega = \frac{E_{\Gamma}}{k\Phi_{\Gamma}} - \frac{r_{\Gamma} + r_{\Gamma}}{k^2\Phi_{\Gamma}^2} M_{\Sigma}$$

Угол наклона механической характеристики двигателя, работающего в системе Г-Д определяется величинами сопротивлений якорных обмоток генератора и двигателя  $r_{\Gamma}$  и  $r_{\Gamma}$ . **Высота положения параллельных характеристик пропорциональна току возбуждения генератора** (первая зона) рис.26.

**Чтобы осуществить двухзонное регулирование частоты вращения двигателя необходимо снабдить систему Г-Д дополнительным элементом - реостатом, включаемым в цепь возбуждения двигателя  $R_{ВД}$**  (вторая зона).

Чтобы перевести двигатель в новый режим работы, характеризуемый большим наклоном характеристики необходимо уменьшить ток возбуждения двигателя.

## 6. Характеристики ДПТ с последовательным возбуждением

Для ДПТ с последовательным возбуждением (сериесного двигателя СДПТ) является характерным то, что  $I_{\Gamma} = i_{\Gamma}$ , (рис.27) поэтому при изменении нагрузки меняется и магнитный поток машины  $\Phi \neq \text{const}$ .

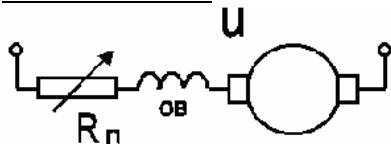


Рис.27. Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением (сериесный двигатель)

..

Для ненасыщенной машины ( $\Phi = K_{\Phi} i_{\Gamma} = k_{\Phi} I_{\Gamma}$ ) уравнение скоростной характеристики

$$\omega = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_{\Gamma} (r_{\Gamma} + r_{ov} + R_p)}{c_e \Phi} \quad \text{примет вид:}$$

$$\omega = \frac{U}{c_e K_{\Phi} I_{\Gamma}} - \frac{r_m + R_{\Pi}}{c_e K_{\Phi}}; \quad \text{где } r_m = r_{\Gamma} + r_{ov}; \text{ т.е. } \omega = \kappa / I_{\Gamma}$$

уравнение для момента  $M = c_m \Phi I_a = c_m k_\Phi I_a^2$ ;

электромагнитная мощность  $P = M \omega = k_2 I_a$

При насыщении ( $\Phi = \Phi_{\text{нас}} = \text{const}$ ).  $\omega = \frac{U}{c_e \Phi_{\text{нас}}} - \frac{I_a (r_m + R_p)}{c_e \Phi_{\text{нас}}}$ ;  $M = c_m \Phi_{\text{нас}} I_a$

Таким образом, скоростная характеристика  $\omega = f(I_a)$  имеет вид гиперболы, переходящей в прямую, а моментная характеристика  $M = f(I_a)$  – параболы, переходящей в прямую (рис. 28).

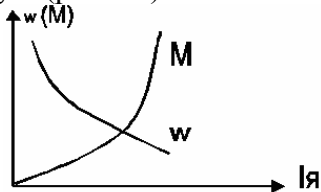


Рис.28. Скоростная и моментная характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

Особенностями серийных двигателей является следующее.

1. Этот двигатель не пускают вхолостую, так как возможен «разнос» машины
2. Так как пограничная скорость этих машин стремится к бесконечно большой величине, то режим рекуперации СДПТ невозможен.
3. Момент пропорционален квадрату тока, что важно при тяжелых условиях пуска и при перегрузках, так как мощность на входе СДПТ растет медленнее – пропорционально току, что важно в транспортных и крановых приводах.

#### Пуск и регулирование скорости СДПТ

1. Вид реостатных характеристик зависит от степени насыщения и применяется реостатное регулирование только для пуска из-за неэкономичности.
2. Ступенчатое регулирование включением двух двигателей параллельно или последовательно дополняется промежуточным реостатным
3. Для регулирования скорости вверх от номинальной изменением магнитного потока шунтируют ОВ (отключают секции).
4. Для регулирования скорости вниз от номинальной шунтируют якорь получая  $\omega_0$  без возможности рекуперации. (Способ не экономичен).
5. Широкий диапазон регулирования дает изменение напряжения.
6. СДПТ имеют два тормозных режима: противовключение 1 и 2 рода и динамическое торможение ДТ (ЭДТ) (рис.29).

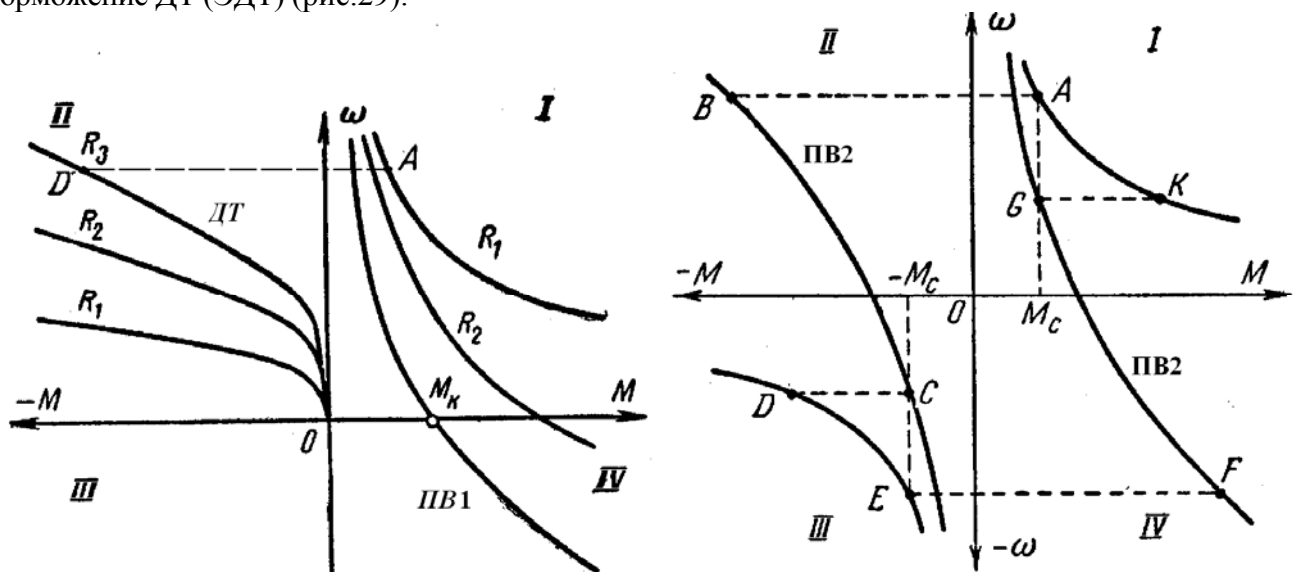


Рис.29

Противовключение серийной машины получается так же, как и у машин параллельного

возбуждения. Его можно получить либо за счет увеличения нагрузки (при активном характере нагрузки) ПВ1, либо при реверсировании на ходу ПВ2. При противовключении мощность, потребляемая из сети, и механическая мощность превращаются в тепло в якорной цепи. При торможении противовключением ( $Y_1 \leftrightarrow Y_2$ ) для ограничения тока необходим реостат  $R_{ПВ}$ .

Режим динамического торможения ЭДТ получается при работе машины генератором с последовательным возбуждением (рис.30).

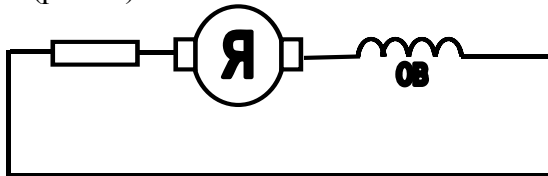


Рис.30.

Начальное возбуждение происходит за счет потока остаточного намагничивания. Поэтому при режиме ЭДТ необходимо соблюдать условия самовозбуждения, т.е. чтобы наведенная в якоре остаточным потоком ЭДС вызывала ток, протекание которого по обмотке возбуждения усиливало бы остаточный магнитный поток. Так, если перейти к режиму ЭДТ на ходу, необходимо переключить полярность обмотки возбуждения (Рис.30,б).

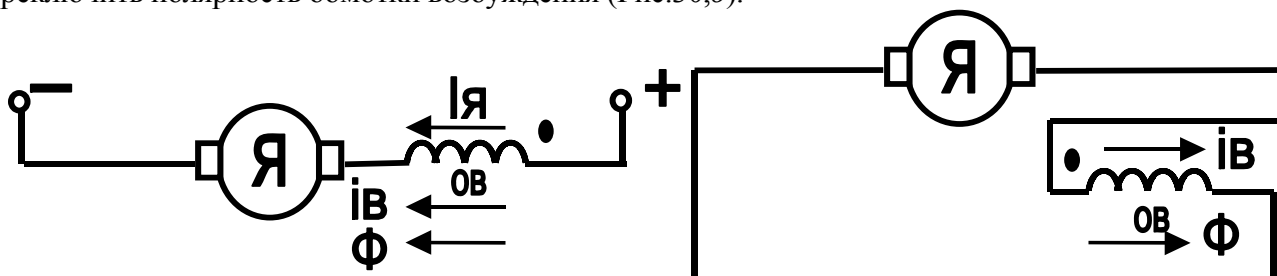


Рис.30,б. Переход в режим ЭДТ на ходу

При малых скоростях вращения  $\omega$  самовозбуждения не происходит, а тормозной момент, вызванный остаточным намагничиванием весьма мал. Режим ЭДТ в этой области срывается.

Следует отметить, что в двигателе смешанного возбуждения возможно генераторное торможение, но при зашунтированной последовательной обмотке (также как и более эффективное динамическое торможение) [2].

## 7. Основные свойства асинхронных двигателей (АД)

**Достоинства.** Простота конструкции, надежность, низкая стоимость, малые габаритные размеры, отсутствие скользящих электрических контактов (АДКЗР).  
**Недостатки.** Сложность реализации плавного регулирования частоты вращения.

В АДФР вместо беличьей клетки – фазная обмотка. Статоры не отличаются. *Конструктивно полюса статора отсутствуют.*

Отличительное свойство – наличие скольжения  $s$

$$s = (n_1 - n_2)/n_1; \quad s = (\omega_1 - \omega_2)/\omega_1 = (\omega_0 - \omega)/\omega_0.$$

Синхронная частота вращения  $n_0 = 60f/p$ ,  $\omega_1 = \omega_0 = 2\pi f/p = n_0/9,55$ ;  $n_2 = (1-s) n_0$ .

### Режимы работы АД

Частота холостого хода  $60f_1/p$  зависит от числа пар полюсов и частоты напряжения,  $s=0$  (синхронная частота).

величины скольжения асинхронного двигателя могут находиться в интервале

$0 \leq s \leq 1$  **в двигательном режиме** ( $s=1$  при пуске)

$s < 0$  - генераторное торможение

$s > 1$  – электромагнитное торможение (торможение противовключением).

### КПД и потери

$$\eta = P_2/P_1 = (P_1 - \Sigma p)/P_1 = 1 - (\Sigma p/P_1), \text{ сумма потерь } \Sigma p = P_{ст1} + P_{эл1} + P_{эл2} + P_{мех} + P_{доб}.$$

Электромагнитной мощностью  $P_{эм}$  АД называется мощность, передаваемая магнитным потоком в ротор.

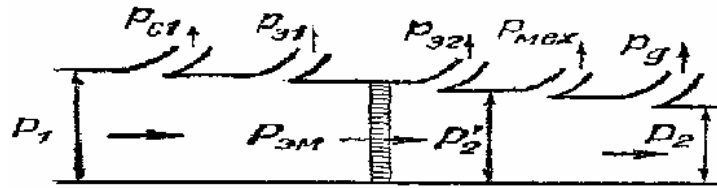


Рис.31

Из энергетической диаграммы рис.31 следует, что механическая мощность АД отличается от электромагнитной на величину потерь в роторе.

### Основные зависимости и характеристики АД в электроприводе

Значение номинального фазного тока статора асинхронного двигателя по паспортным данным определяется по формуле  $I_n = P_n / (m U_{нф} \cdot КПД \cdot \cos \phi)$ , где  $m$  - число фаз.

Согласно выражению для электромагнитного момента АД, **момент пропорционален квадрату фазного напряжения**  $M = m_1 U_1^2 r_2' / \{ \omega_1 s [(x_1 + x_2')^2 + (R_1 + r_2' s^{-1})^2] \}$ . Поэтому **при снижении напряжения** механическая характеристика  $1 [\omega = f(M)]$  **приобретает вид 2** (рис.32). (При неизменном моменте сопротивления снижается частота вращения  $\omega$ ).

**Значение критического момента.**  $M_{кр} = m_1 U^2 / \{ 2 \omega_1 [(x_1 + x_2')^2] \}$ , при  $R_1 = 0$  ( $M_{кр} = k U^2$ ).

**Типичное значение**  $M_{кр} / M_{ном} = \lambda = 1,8 - 2,5$ .

**Выражение для критического скольжения, пропорционального активному сопротивлению ротора**  $s_{кр} = +r_2' / \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}$ . Приблизленно  $s_{кр} = s_H (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$ .

**$M_{кр}$  не зависит от сопротивления ротора АД(ФР)  $r_2$**  согласно выражению для критического момента АД  $M_{кр} = m_1 U^2 / \{ 2 \omega_1 [(x_1 + x_2')^2] \}$ , (при  $R_1 = 0$ ). Поэтому характеристика 1 на рис.33 при введении в ротор сопротивления  $r_2 + R_2$  имеет вид 2.

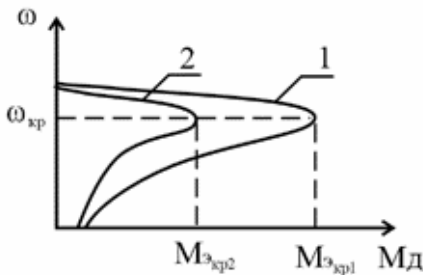


Рис.32.

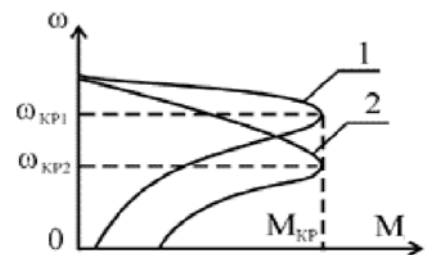


Рис.33

### Механические характеристики АД и их свойства

Для приближенного построения рабочей части ( $0 < s < s_{кр}$ ) естественной механической характеристики  $M = f(s)$  АД используется формула  $M = 2 \cdot M_{кр} / [(s_{кр} / s) + (s / s_{кр})]$ . Это выражение используется для приближенного построения механической характеристики АД и называется формулой Клосса.

При холостом ходе ( $s \approx 0$ ) частота вращения ротора равна  $n_2 = (1 - s) 60 f_1 / p \approx 60 f_1 / p$ , следовательно, определяется только частотой питающей сети ( $U = \text{const}$ ).

1. Искусственные механические характеристики АД, получаемые путем увеличения сопротивления в цепи ротора (рис.34) отличаются тем, что при увеличении сопротивления ротора  $R_2$  увеличивается наклон (растет  $s$  при  $M = \text{const}$ ) растет  $M_{п}$ ,  $M_{кр} = \text{const}$ , увеличивается критическое скольжение согласно формуле  $s_{кр} = R_2' / (x_1 + x_2')$ .

2. Искусственные механические характеристики асинхронного двигателя, получаемые путем увеличения фазного напряжения, характеризуются тем, что при этом увеличивается критический момент  $M_{кр}$  (рис.32).

3. *Искусственные механические характеристики асинхронного двигателя, получаемые путем увеличения частоты фазного напряжения характеризуются тем, что согласно формулам для частоты вращения АД,  $M_{кр}$  и  $S_{кр}$  при этом уменьшаются  $M_{кр}$ , но при неизменном  $M_c$  (токе  $I$ ) увеличивается частота вращения  $\omega$  (Рис.35).*

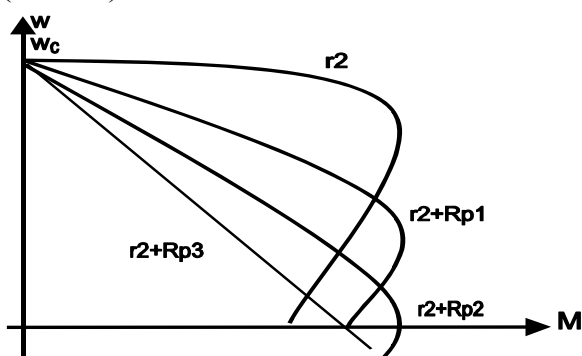


Рис.34

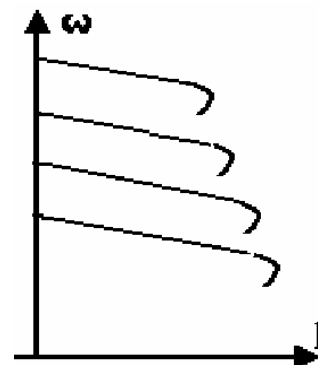


Рис.35

Из формулы Клосса (для упрощения принято  $r_1=0$ ) при  $|s| < |s_{кр}|$   $\frac{s_{кр}}{s} < \frac{s}{s_{кр}}$ , пренебрегая меньшей величиной получим  $M_{эм} \approx \frac{2M_{кр}}{S_{кр}} s$ , т.е. момент на рабочей части характеристики прямо пропорционален скольжению (рис.36). При  $|s| > |s_{кр}|$   $\frac{s_{кр}}{s} < \frac{s}{s_{кр}}$ . В этом случае  $M_{эм} = \frac{2M_{кр}s_{кр}}{s}$ , т.е. момент обратно пропорционален скольжению. При критических величинах  $|s| = |s_{кр}|$   $M = M_{кр}$ .

Перейдем от скольжения к скорости.

|            |              |              |            |   |             |
|------------|--------------|--------------|------------|---|-------------|
| $s$        | -2           | -1           | 0          | 1 | 2           |
| $\omega_0$ | $3 \omega_0$ | $2 \omega_0$ | $\omega_0$ | 0 | $-\omega_0$ |

Согласно таблице положительные направления осей  $S$  и  $\omega$  ориентированы в разные стороны. При этом точке  $s=0$  соответствует  $\omega=\omega_c$ , а точке  $\omega=0$ ,  $s=1$ .

Как видно из рис.36 в механической характеристике имеется явно выраженный максимум. Если нагрузка превысит это значение, то происходит быстрая остановка машины (явление «опрокидывания»), однако ток в машине продолжает расти до пускового значения, что приводит к быстрому перегреву машин. При неподвижной машине  $I_1 = I_{пуск} = (5 \dots 7) I_n$ , вследствие чего может произойти выход машины из строя (перегорание) (рис.37).

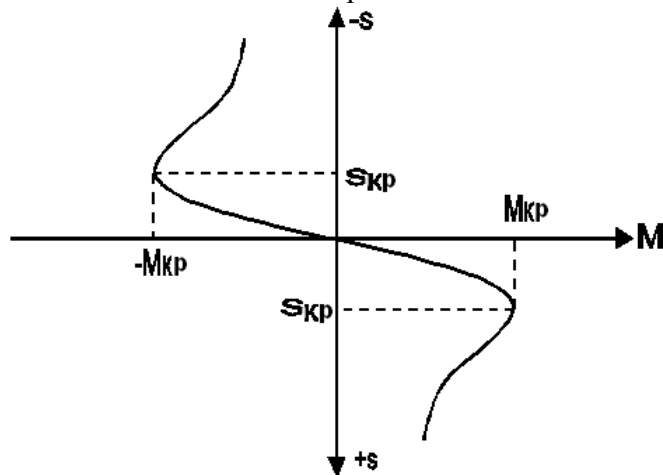


Рис.36

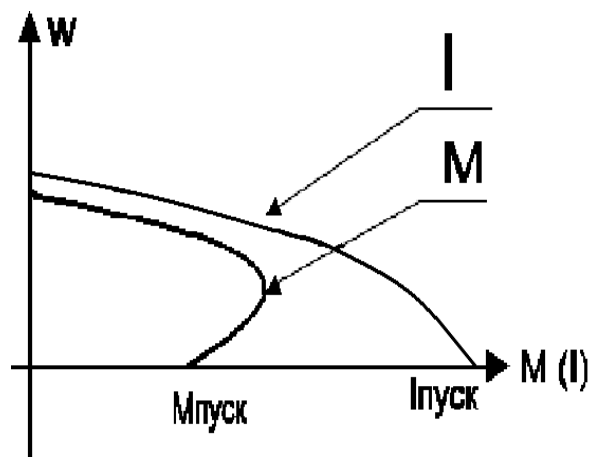


Рис.37

## Пуск асинхронного двигателя

Применяют прямой пуск, пуск при пониженном напряжении, введением сопротивлений в ротор и статор, частотный пуск.

Согласно формуле  $M_n = m_1 U_1^2 r_2' / \{ \omega_1 [(x_1 + x_2')^2 + (r_1 + r_2')^2] \}$  сопротивление в цепи ротора не только увеличивает  $M_n$ , но и снижает пусковой ток  $I_n = U_1 / [(x_1 + x_2')^2 + (r_1 + r_2')^2]^{0.5}$ .

Расчет характеристик реостатного пуска (рис.38, рис.39) электропривода с асинхронным двигателем с фазным ротором (АДФР) при реостатно-релейном управлении проводят с учетом известных соотношений.

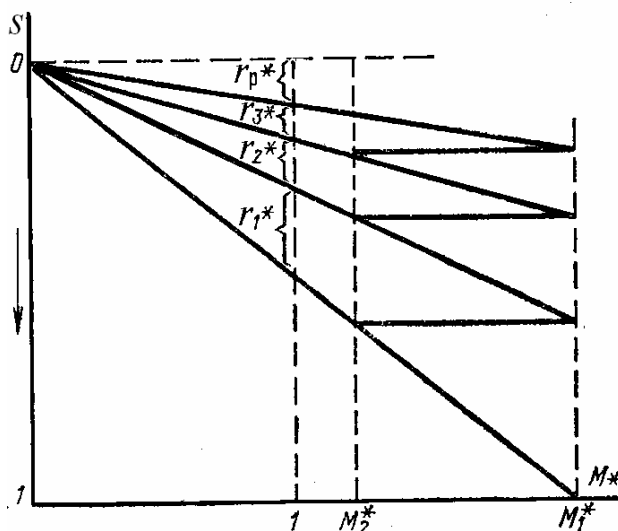
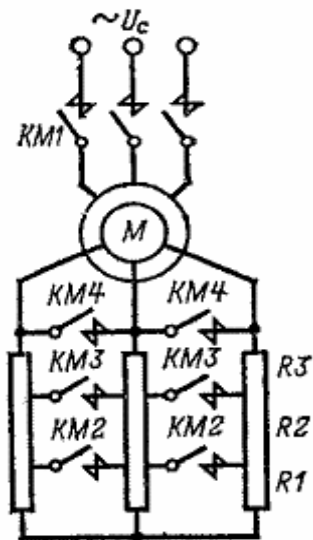


Рис.38. Схема реостатного пуска АДФР

Рис.39. Механические пусковые характеристики

- 1). Номинальное сопротивление двигателя

$$R_n = R_{2n} = E_{2n} / (I_{2n} \sqrt{3}).$$

- 2). Активное сопротивление ротора

$$r_p = E_{2n} s_n / (I_{2n} \sqrt{3}).$$

- 3). Относительный пиковый момент  $M_1^*$

$$M_1^* = 1 / (s_n \lambda^m).$$

Проверка  $M_1^* / \lambda \geq 1$ , ( $M_2^* \geq 1$ );  $M_1^* = M_2^* \lambda < 0,8 M_{кр}^*$

- 4). Полное сопротивление пускового реостата

$$r_{np} = E_{2n} (1 - 2s_n) / (I_{2n} M_1^* \sqrt{3}).$$

- 5). Ступени пускового реостата

$$R_3 = r_p (\lambda - 1); R_2 = r_3 \lambda; R_1 = r_2 \lambda.$$

- 6). Относительные значения сопротивлений пускового реостата

$$r_3^* = R_3 / R_n; r_2^* = R_2 / R_n; r_1^* = R_1 / R_n.$$

## Регулирование скорости ротора АД

*Для реверса АД необходимо переключить две любые фазы напряжения статора, чтобы изменить порядок чередования фаз.*

*Известные способы регулирования асинхронных двигателей изменением*

**числа пар полюсов, скольжения (фазного напряжения), сопротивления в цепи ротора и статора являются параметрическими.**

1. **Регулирование изменением числа пар полюсов отличается дискретностью.** (Низкая плавность). При регулировании числом пар полюсов получают только синхронные частоты вращения  $n_1 = 60f_1/p$ .

2. Согласно формуле для момента при уменьшении напряжения изменяется механическая характеристика асинхронного двигателя. При этом увеличивается наклон рабочей части, уменьшается  $M_{\text{п}}$  и  $M_{\text{кр}}$ .

**При постоянстве статического момента, если фазное напряжение уменьшится, скорость вращения ротора асинхронного двигателя уменьшится.**

**Номинальный электромагнитный момент при переключении обмотки статора со «звезды» на «треугольник» согласно формуле для момента меняется в 3 раза.**

3. При изменении активного сопротивления в цепи ротора критический момент не меняет своей величины, но меняется критическое скольжение. При увеличении сопротивления критическое скольжение увеличивается, а скорость при которой момент достигает максимума соответственно снижается. Таким образом можно добиться, чтобы  $s_{\text{кр}}=1$ , т.е., чтобы максимальный момент развивался при трогании машины с места. Это дает возможность пускать механизмы под нагрузкой или механизмы, обладающие большими маховыми массами.

Реостаты обычно применяются металлические, разбитые на небольшое число секций (4 – 8). Выключение отдельных секций реостата производится путем их шунтирования (закорачивания) контактами коммутирующих аппаратов (рис.38). Для целей регулирования скорости реостатные характеристики почти не применяются из-за очень больших потерь в реостатах. **Такое регулирование является неэкономичным.**

Построение естественных и искусственных характеристик асинхронных машин с фазовым ротором можно выполнить по паспортным данным  $P_n, n_n, U_{1n}, I_{1n}, \eta_n, \cos \varphi_n, U_{2n}, I_{2n}, M_{\text{кр}}, s_{\text{кр.н}} = s_{\text{кр.ест}}$ .

Для построения искусственных реостатных характеристик воспользуемся следующим соотношением для естественной характеристики

Для реостатной характеристики  $s_n = (n_0 - n_n) / n_0, \omega = n / 9,55; M = P \omega$

Величина сопротивления фазы ротора  $r_2$  определяется по формуле  $r_2 = \frac{U_{2n}}{\sqrt{3}I_{2n}} s_n$ , где  $U_{2n}, I_{2n}$  номинальные напряжения и ток ротора.

Теперь, если известна величина сопротивления, введенного в цепь каждой фазы ротора, то легко пересчитать новое значение критического скольжения  $s_{\text{кр.иск}} = s_{\text{кр.ест}} \frac{r_2 + R_p}{r_2}$  и построить характеристику по формуле Клосса (величина  $M_{\text{кр}}$  не меняется).

3,б) введение активно-индуктивных сопротивлений в цепь ротора (дрессельное управление).

При включении активно-индуктивных сопротивлений (рис.40) можно изменять и  $s_{\text{кр}}$  и  $M_{\text{кр}}$ . При этом можно получить искусственные механические характеристики с вертикально-падающим участком. Это дает возможность поддерживать постоянный момент при изменении скорости.

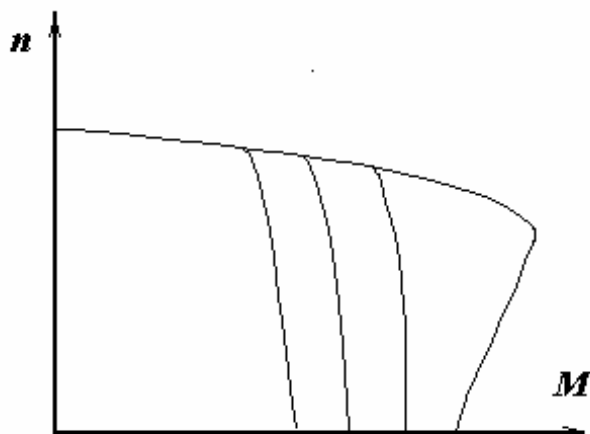


Рис.40. Механические характеристики АДФР при включении в ротор активно-индуктивных сопротивлений

Недостатком способа является понижение КПД, вследствие потерь в реостате и понижение  $\cos \phi$ . Поэтому дроссельное управление распространения не получило.

Стремление снизить потери энергии при параметрических способах регулирования скорости асинхронного двигателя привело к созданию схем с активными (полупроводниковыми) элементами в цепях ротора и статора. Следующим этапом развития регулируемого электропривода стало применение полупроводниковых преобразователей частоты и частотного регулирования. Этот этап связан с прогрессом силовой электроники, систем автоматического регулирования и будет рассмотрен во второй части курса.

### Асинхронные каскады

Регулирование с использованием мощности скольжения (каскадное регулирование) позволяет снизить потери в роторной цепи АД.

Ранее было показано, что электромагнитная мощность, передаваемая в ротор  $P_{эм} = M\omega_c$ . Механическая мощность на валу  $P_{мех} = M\omega$ . Разница представляет собой мощность скольжения

$$P_s = P_{эм} - P_{мех} = M\omega_c - M\omega = M\omega_c \left( \frac{\omega_c - \omega}{\omega_c} \right) = P_{эм}s.$$

При реостатном управлении эта мощность превращается в потери в реостате  $P_s = \Delta P$ , т.е. потери в реостате пропорциональны скольжению. КПД. в этом случае

$$\eta = \frac{P_{мех}}{P_{эм}} = \frac{\omega}{\omega_c} = \frac{\omega_c(1-s)}{\omega_c} = 1-s.$$

Каскадные схемы регулирования скорости дают возможность использовать мощность скольжения, либо отдавая ее на вал двигателя в виде механической мощности, либо возвращая в сеть.

В первом случае (рис.41) напряжение переменной частоты, снимаемое с колец ротора, ( $f_2 = f_1 s$ ) преобразуется в напряжение постоянного тока и подводится к машине постоянного тока, сидящей на одном валу с регулируемым асинхронным двигателем.

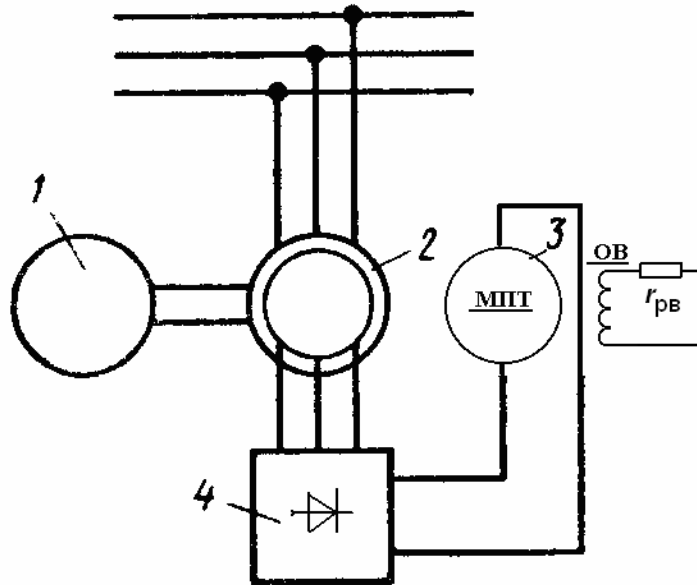


Рис.41. Асинхронный каскад с отдачей энергии на вал МПТ

Для такого каскада можно написать уравнение равновесия цепи ротора и якоря машины постоянного тока в виде

$$I_{\text{я}} = \frac{E_{\text{выпр}} - E_{\text{МПТ}}}{R_{\text{экв}}}, \text{ где}$$

$E_{\text{выпр}}$  – выпрямленная ЭДС, снимаемая с колец неподвижного ротора;

$E_{\text{м.п.т.}}$  – ЭДС якоря машины постоянного тока;

$R_{\text{экв}}$  – эквивалентное сопротивление.

Меняя с помощью реостата  $r_p$  ток возбуждения и магнитный поток МПТ, можно изменить ее ЭДС и, следовательно, ток в цепи ротора асинхронного двигателя и его момент. Последнее дает возможность регулировать скорость электропривода.

Мощность скольжения может быть возвращена и обратно в сеть. Для этого может быть использован электромеханический преобразователь (рис.42), когда МПТ вращает генератор, возвращающий энергию ( $P_s$ ) в сеть.

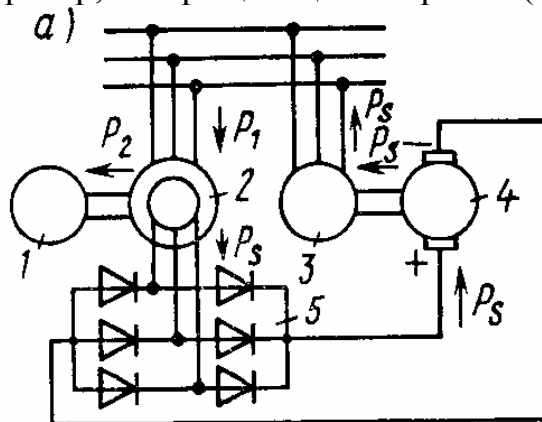


Рис.42. Асинхронный каскад с отдачей энергии в сеть

В последнее время для рекуперации энергии в сеть стали использовать

полупроводниковые преобразователи (инверторы), через которые производится возврат энергии в сеть (рис.43).

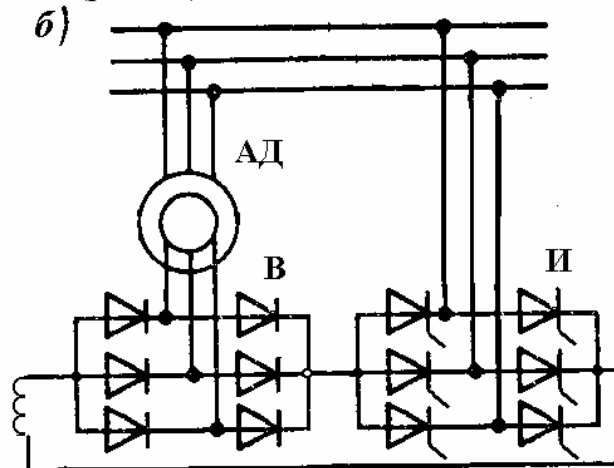


Рис.43. Асинхронно-вентильный каскад

Каскадные схемы регулирования находят наибольшее применение в электроприводе турбомашин (вентиляторов, центробежных насосов, турбокомпрессоров). Ранее говорилось, что турбомашин обладают вентиляторной механической характеристикой, т.е. момент их квадратично зависит от скорости

$$M = k \omega^2 \text{ (начальный момент } M_0 \text{ невелик).}$$

Мощность скольжения  $P_S$  пропорциональна скольжению, поэтому вентиляторная характеристика наилучшим образом подходит для АВК, так как при больших значениях скольжения момент и мощность уменьшаются. Построив зависимость  $P_S = f(\omega)$  (рис.44), получим, что  $P_S$  имеет максимум при  $\omega = \frac{2}{3} \omega_c$ .

Максимальная величина  $P_S$

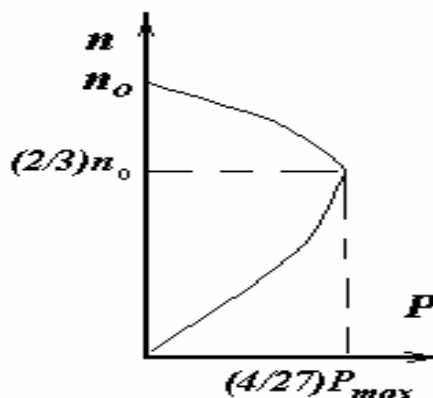


Рис.44. Зависимость  $P_S = f(\omega)$

Таким образом, мощность скольжения не превосходит 16% от мощности, потребляемой асинхронным двигателем при работе с полной скоростью. Поэтому мощность вспомогательных машин и преобразователей, входящих в каскады, оказывается небольшой (около 16%  $P_{ад}$ ), а стоимость – не слишком высокой по сравнению со стоимостью АД.

### Принцип частотного регулирования

3. Из способов регулирования асинхронных двигателей частотный обеспечивает наиболее широкий диапазон изменения скорости, но сложен из-за применения транзисторных или тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ).

Система частотного регулирования с применением ТПЧ и АД носит название - система ТПЧ-АД. В общем случае ТПЧ содержит (рис.45) электрический фильтр (1Ф,2Ф), выпрямитель 1, инвертор 3 (АИН), систему управления (СУ). Недостаток ТПЧ – наличие широкого спектра высших гармоник выходного напряжения. **Частота меняется по заданию, а момент нагрузки, зависит от вида технологического процесса (независимая переменная).** Существуют скалярная и векторная системы управления (ССУ и СВУ) двигателем переменного тока в ЭП.

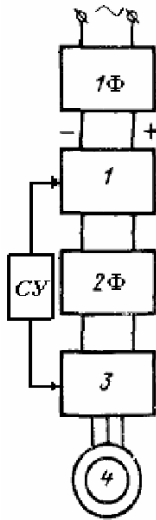


Рис.45. Структура ЭП.

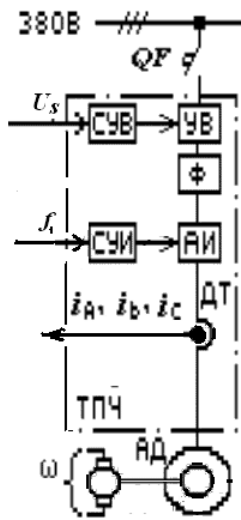


Рис.45А. Схема ССУ.

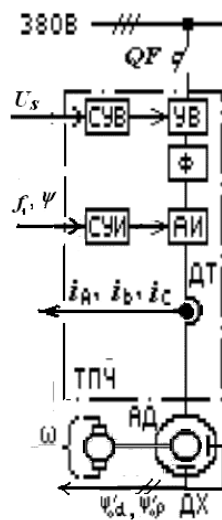


Рис.45Б. Схема СВУ.

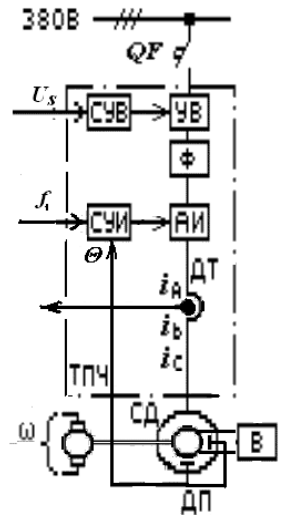


Рис.45В. Вентильный двигатель

Частотный способ регулирования частоты вращения асинхронного двигателя в ССУ требует изменения напряжения  $U_1$  и частоты  $f=f_1$  ТПЧ (для СВУ еще и фазы  $U_1$ ).

Основным законом изменения величины фазного напряжения и частоты фазного напряжения при частотном регулировании является закон Костенко М.П.

$$U_{12}/U_{11} = (f_{12}/f_{11}) (M_{H2}/M_{H1})^{0.5}. \quad (1)$$

Закон сформулирован исходя из необходимости поддержания достаточной перегрузочной способности при разных частотах (1,2):  $M_{max1}/M_{H1} = (M_{max2}/M_{H2}) = \text{const}$ .

Если пренебречь активным сопротивлением статора, при  $M_{max} = M_{кр}$   $U_1 = U$   
 $M_{кр} = m_1 U^2 / \{2 \omega_1 [(x_1 + x_2')]\} = m_1 p U^2 / \{4 \pi f [(x_1 + x_2')]\} = m_1 p U^2 / \{8 \pi^2 f^2 [(L_1 + L_2')]\} = C U^2 / f^2$ , т.е.  
 $M_{max1}/M_{max2} = (U_1^2/U_2^2) (f_2^2/f_1^2)$ , откуда и получается основной закон частотного регулирования(1).

При  $M_{H2} = M_{H1} = \text{const}$ : закон  $U/f = \text{const}$ .

Теоретически механические характеристики выглядят так, как на рис.46. При частотном регулировании  $U/f = \text{const}$  критический момент при снижении частоты напряжения  $f$  падает из-за увеличения влияния  $r_1$ , не учтенного в (1).

При  $P = \text{const}$ : закон  $U_{12}/U_{11} = (f_{12}/f_{11})^{0.5}$ .

При постоянстве магнитного потока  $\Phi = \text{const}$  можно получить благоприятные характеристики, так как момент пропорционален квадрату потока

$$M = c_m \Phi_m I_2 \cos \psi_2 = c_m \Phi_m E_{2s} r_1 / (r_2^2 + x_{2s}^2)^2 = c \Phi_m^2,$$

$$\text{где } E_{2s} = 4,44 w_2 f_1 \Phi_m k_2 s = 4,44 w_2 f_2 \Phi_m k_2.$$

При регулировании с постоянным потоком надо выполнять условие

$$E_1/f = (\dot{U}_1 - j \dot{I}_1 x_1 - \dot{I}_1 r_1)/f = \text{const}.$$

Так как  $x_1$  зависит от частоты, а  $r_1$  не зависит, то закон, по которому должно изменяться напряжение  $U = b + af$

Основные свойства частотного способа регулирования асинхронных двигателей определяются не в последнюю очередь степенью совместимости ПЧ и двигателя. Проблема совместимости является трудной при проектировании [6].

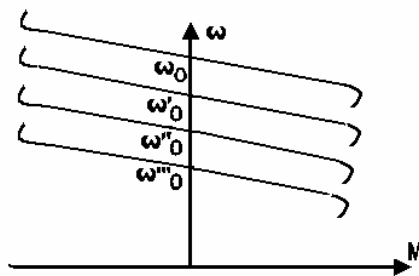


Рис.46.

### Импульсное регулирование скорости АДФР

В ряде механизмов, в частности грузоподъемных, применяется привод с асинхронным фазным двигателем, снабженным автоматической системой импульсного регулирования периодическим изменением добавочного сопротивления в цепи ротора [2]. Импульсное регулирование с помощью **релейного элемента и управляемого ключа**, включенного через трехфазный выпрямительный мост в цепь ротора, позволяет получить широкий диапазон регулирования скорости при приемлемых динамических показателях и сравнительной простоте.

В системе рис.47, момент зависит от сопротивления ротора, которое изменяется от  $R_r$  при полностью открытом ключе, до  $R_r + R$  при разомкнутом ключе. Релейный элемент обеспечивает изменение относительного времени включения ключа при наличии сигнала ошибки скорости.

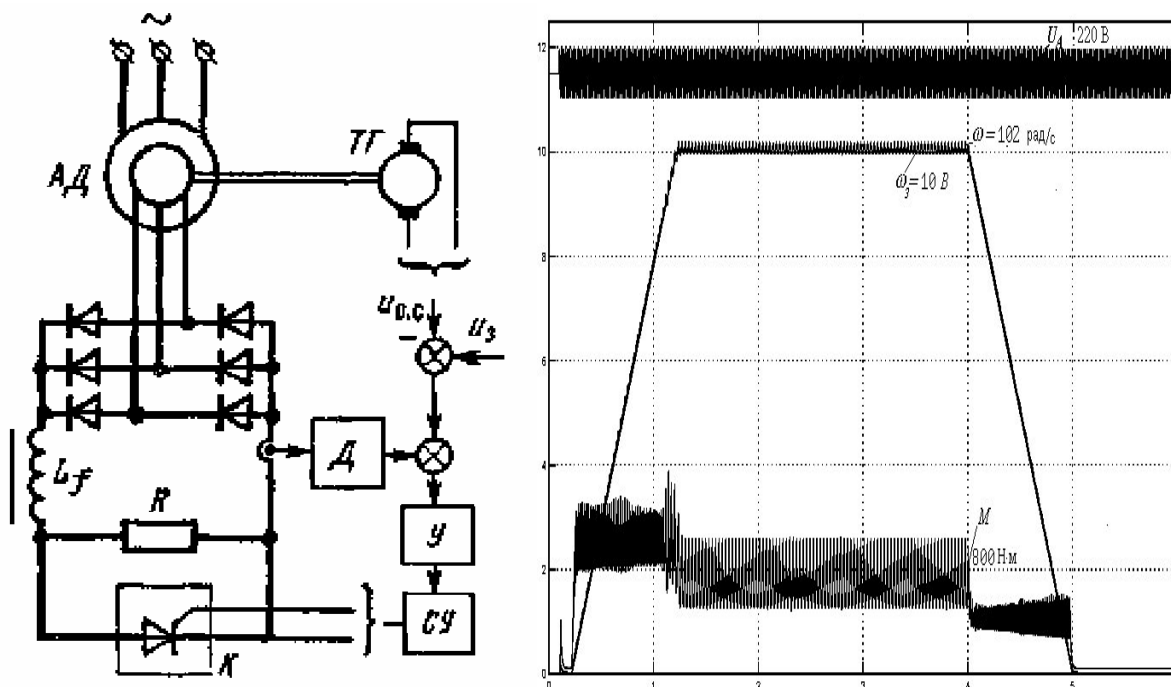


Рис.47. Схема привода и процесс пуска, работы и торможения

Регулирование скорости АД при постоянных значениях напряжения и частоты статора осуществляется за счет изменения скольжения, поэтому на низких скоростях возрастают электрические потери в роторе.

## Асинхронный короткозамкнутый двигатель с управляемыми тиристорными ключами и токовым регулятором

Для формирования гладких искусственных характеристик асинхронных короткозамкнутых электродвигателей применяют тиристорные ключи со специальным фазосмещающим устройством (ФСУ), позволяющим плавно изменять угол  $\alpha$  фазового управления тиристорами ключей. Промышленностью выпускаются специальные тиристорные станции управления регулируемые типа ТСУР.

Тиристорные ключи с плавным изменением угла управления тиристорами применяются в замкнутых системах управления с функциональными регуляторами. Наибольшее распространение получили регуляторы постоянства тока двигателя, регуляторы постоянства скорости двигателя и регуляторы уровня скорости. Асинхронные короткозамкнутые двигатели с регуляторами тока позволяют ограничивать на заданном уровне ток двигателя в переходных процессах пуска, реверса, остановки и др.

Принципиальная схема асинхронного короткозамкнутого двигателя с управляемыми тиристорными ключами и регулятором тока двигателя приведена на рис.48. На этой схеме с трансформаторов тока ТТ-А, ТТ-В, ТТ-С через выпрямительный мост датчика тока ДТ получается сигнал постоянного тока - напряжение  $U_i$ , пропорциональное току асинхронного двигателя. Этот сигнал сравнивается с задающим  $U_{is}$  на входе регулятора тока РТ. Сигнал на входе регулятора тока РТ определяет избыток напряжения на асинхронном двигателе и через ФСУ изменяет угол управления тиристорами,  $\alpha$  так, чтобы ток двигателя соответствовал заданному значению. Естественно, что при таком регулировании тока асинхронного двигателя его электромагнитный момент снижается, и каждый раз требуется проверка времени пуска или реверса привода. Это время не должно превышать определенных величин, так как в противном случае двигатель перегревается и может выйти из строя. По среднестатистическим данным можно допустить следующие величины токов двигателя в переходных процессах: при  $t \rightarrow \infty$   $i = I/I_H = 1,15$ ; при  $t = 60$  с,  $i = 2,5$ ; при  $t = 30$  с,  $i = 3,0$ ; при  $t = 5$  с,  $i = 4,5$ .

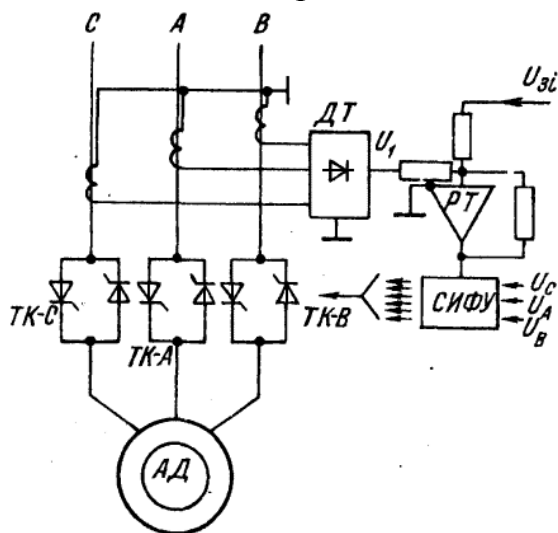


Рис.48

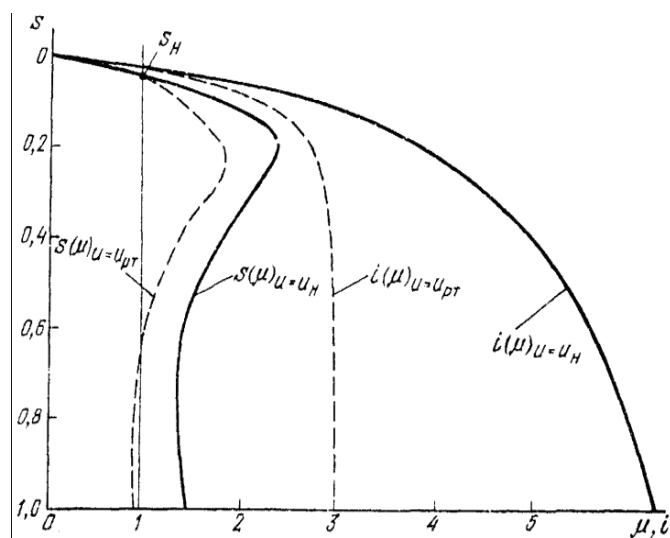


Рис.49

Для оценки вида реальных характеристик асинхронного короткозамкнутого двигателя с ТК и РТ на рис.49 приведены механические характеристики асинхронного двигателя при снижении регулятором тока величины пускового тока примерно в два раза. Как видно на рис.49, кривая тока двигателя деформируется и до тока установки РТ идет почти вертикально, т.е. при скольжении  $s > s_{кр}$ , ток двигателя поддерживается неизменным. В результате уменьшается величина пускового момента и критический момент.

На рабочей части характеристики практически совпадают. Следует обратить внимание, что против расчета критическое скольжение в схеме АД-ТК-РТ несколько больше естественного значения  $s_{кр}$ . Это объясняется тем, что при фазовом управлении ТК ток получает дополнительный сдвиг, что и приводит к изменению критического скольжения.

## 8. Управление синхронным двигателем

Для синхронного двигателя переключение пар полюсов на статоре и роторе практически трудно реализуемо, поэтому используют лишь изменение частоты питающего напряжения.

Однако в чистом виде частотное регулирование скорости СД применяется только при очень малых мощностях, так как необходимость ограничения угла нагрузки  $\theta$  областью устойчивой работы при больших моментах инерции приводного механизма, требует очень плавно изменять частоту питающего напряжения, чтобы двигатель не выпал из синхронизма. **Наиболее пригоден для СД метод частотного регулирования с самосинхронизацией, при котором двигатель в принципе не может выпасть из синхронизма.** При этом способе управление преобразователем частоты осуществляется от системы датчиков положения ротора (ДП на рис.45В), вследствие чего напряжение подается на каждую фазу двигателя при углах нагрузки  $\theta < 90^\circ$ , автоматически обеспечивая условия устойчивой работы двигателя, а перегрузочная способность определяется только перегрузочной способностью преобразователя частоты.

**Синхронные двигатели, регулируемые путем изменения частоты с самосинхронизацией, называют вентильными двигателями (ВД).**

При питании ВД от вентильного преобразователя частоты угол регулирования которого  $\beta_0$  практически полностью определяет угол  $\theta$  при постоянных значениях частоты питающего напряжения и тока возбуждения ( $\omega_1$  и  $E_o$ ) формула для момента принимает вид

$$M = [m_1 U_1 E_o / (\omega_1 x_c)] \sin \theta = c U_1 \sin \theta / \omega_1 = \text{const.}$$

Следовательно, при изменении угла регулирования  $\theta$  для поддержания неизменным момента  $M$  нужно регулировать напряжения  $U_1$  подводимое к двигателю от преобразователя, также как это делается при изменении  $\omega_1$ .

## 9. Типовые схемы управления движением асинхронных электроприводов

Довольно широкое применение при невысоких требованиях к показателям

точности и степени автоматизации имеют электроприводы с релейно-контакторным (бесконтактным) управлением. В таких ЭП питание двигателя осуществляется от сети с неизменным напряжением, и используются контактные и бесконтактные электрические аппараты релейного действия. Эти ЭП обеспечивают динамические режимы (пуск, остановка с торможением и без торможения, реверсирование). Такие ЭП как правило работают с постоянной установившейся скоростью. В динамических режимах могут быть обеспечены ограничения пускового тока или момента [7].

Простейшая схема управления асинхронным короткозамкнутым двигателем посредством магнитного пускателя показана на рис.50,а.

Схема, изображенная на рис. 50,а, предусматривает питание силовых цепей и цепей управления от источника одного и того же напряжения.

Однако для повышения надежности работы релейных и контактных аппаратов, большей частью рассчитанных на низкое напряжение, а также в целях повышения безопасности эксплуатации часто применяются схемы, предусматривающие питание цепей управления от источника пониженного напряжения.

Если на схему подано силовое напряжение  $\sim$ , то для пуска двигателя (рис. 50,а) достаточно нажать кнопку  $SB2$  (*Пуск*). При этом получает питание катушка контактора  $KM$ , замыкаются главные контакты в силовой цепи, и статор двигателя присоединяется к сети. Одновременно в цепи управления закрывается замыкающий блок-контакт  $KM$ , блокирующий кнопку  $SB2$ (*Пуск*), после чего эту кнопку не нужно больше удерживать в нажатом состоянии, так как цепь катушки контактора  $KM$  остается замкнутой. Кнопка за счет действия пружины возвращается в исходное положение.

Нажатием кнопки  $SB1$ (*Стоп*) двигатель отключается от сети. При этом катушка контактора  $KM$  теряет питание и замыкающие контакты его размыкают цепь статора.

В схеме рис.50,а могут быть плавкие предохранители от коротких замыканий или вместо рубильников с предохранителями применяют автоматические выключатели,

В схеме предусмотрена защита двигателя с помощью тепловых реле  $K$  — от перегрузки. Кроме того, в этой схеме осуществляется так называемая нулевая защита, которая при исчезновении или значительном снижении напряжения в сети отключает двигатель от сети. После восстановления нормального напряжения самопроизвольного пуска двигателя не произойдет.

Более четкая защита от снижения или исчезновения напряжения может быть выполнена при помощи реле минимального напряжения, катушка которого присоединяется к двум фазам силовой цепи, а его замыкающий контакт включен последовательно с катушкой контактора.

Для управления торможением асинхронных короткозамкнутых двигателей применяются различные схемы. Как указывалось, в приводах с асинхронными двигателями применяются динамическое торможение и торможение противовключением.

На рис.50,б показана принципиальная схема управления асинхронным короткозамкнутым двигателем с торможением противовключением.

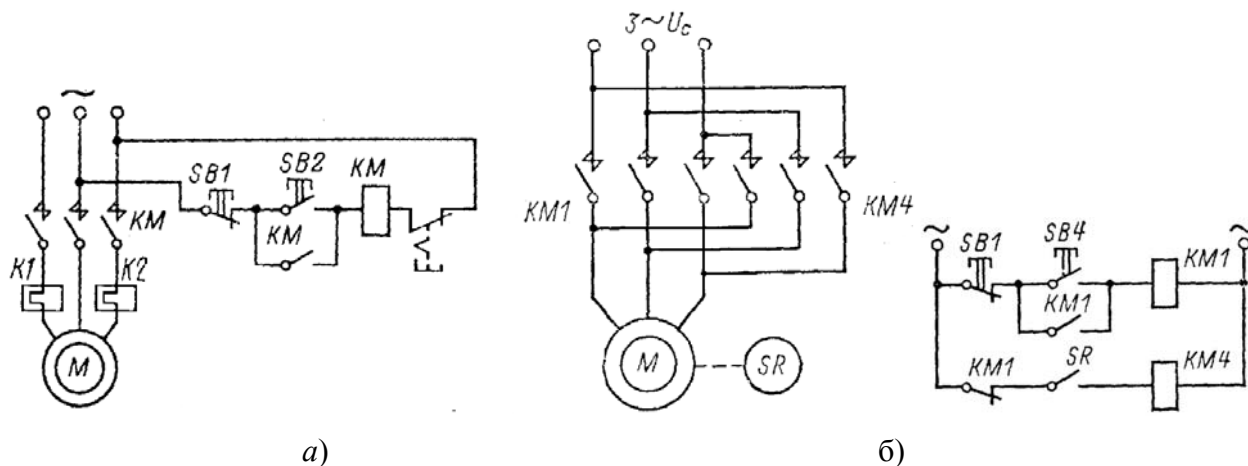


Рис.50.

В схеме, показанной на рис.50,б, для торможения противовключением используется реле контроля скорости  $SR$ , механически связанное с валом двигателя; его замыкающие контакты при определенной скорости вращения двигателя закрываются. При неподвижном двигателе и небольшой скорости (около 10—15% номинальной) контакты реле разомкнуты.

Нажатием кнопки  $SB4$  (*ПУСК*) включается контактор  $KM1$  и двигатель пускается в ход. Размыкающий блок-контакт  $KM1$  разрывает цепь питания катушки контактора  $KM4$  и поэтому, несмотря на то, что контакторы реле  $SR$  при вращении двигателя замкнуты, контактор не включается.

Отключение двигателя производится нажатием кнопки  $SB1$  (*Смон*). При этом замыкается размыкающий блок-контакт  $KM1$ . Так как контакты реле  $SR$  замкнуты, то контактор получит питание, и статор двигателя будет присоединен к сети. Из схемы видно, что при включении контактора две фазы переключаются и порядок чередования фаз изменяется в сравнении с тем, когда был включен контактор  $KM1$ . Поэтому будет происходить торможение противовключением.

При скорости, близкой к нулю, реле  $SR$  размыкает свои контакты, катушка контактора  $KM4$  теряет питание и двигатель автоматически отключается от сети.

## 10. Основы динамики электрического привода

Принцип работы электрической машины, основан на законах электромагнитной силы и электромагнитной индукции. Магнитное поле машины постоянного тока возбуждается постоянным током главных полюсов, установленных на статоре. Это обуславливает достаточную простоту математической модели этой машины [5]. Уравнение равновесия напряжения в цепи якоря и возбуждения МПТ в установившемся режиме определяется выражениями

$$E = U - I_a R_a;$$

$$E_f = U_f - I_f R_f$$

Математическая модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) с компенсированной реакцией якоря, описывающая

динамические процессы, может быть представлена системой уравнений, электрических цепей и основного уравнения электропривода (1-6)

$$\frac{U_a}{R_a} = \frac{L_a}{R_a} \cdot \frac{dI_a}{dt} + I_a + \frac{1}{R_a} E; \quad (2)$$

$$U_f = \frac{dI_f}{dt} L_f + I_f \cdot R_f; \quad (3)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c; \quad (4)$$

$$M = c \cdot \Phi \cdot I_a; \quad (5)$$

$$E = c \cdot \Phi \cdot \omega; \quad (6)$$

$$\Phi = \kappa_f \cdot I_f. \quad (7)$$

Здесь:  $U_a, I_a, R_a; U_f, I_f, R_f$  – напряжение ток и сопротивление обмоток якоря и возбуждения;  $L_a, L_f$  – полная индуктивность якорной цепи и цепи возбуждения;  $E$  – ЭДС якоря;  $J$  – момент инерции,  $M, M_c$  – электромагнитный момент, момент сопротивления нагрузки;  $\omega$  – угловая скорость ротора;  $c = p_0 N / 2\pi a$  – конструктивная постоянная;  $p_0, N, a$  – число пар полюсов, активных проводников и параллельных ветвей обмотки якоря ДПТ;  $\Phi$  – магнитный поток.

На основе метода структурных схем [5], для решения системы (2-7) получим модель двигателя в Matlab (Simulink), представленную на рис.51.

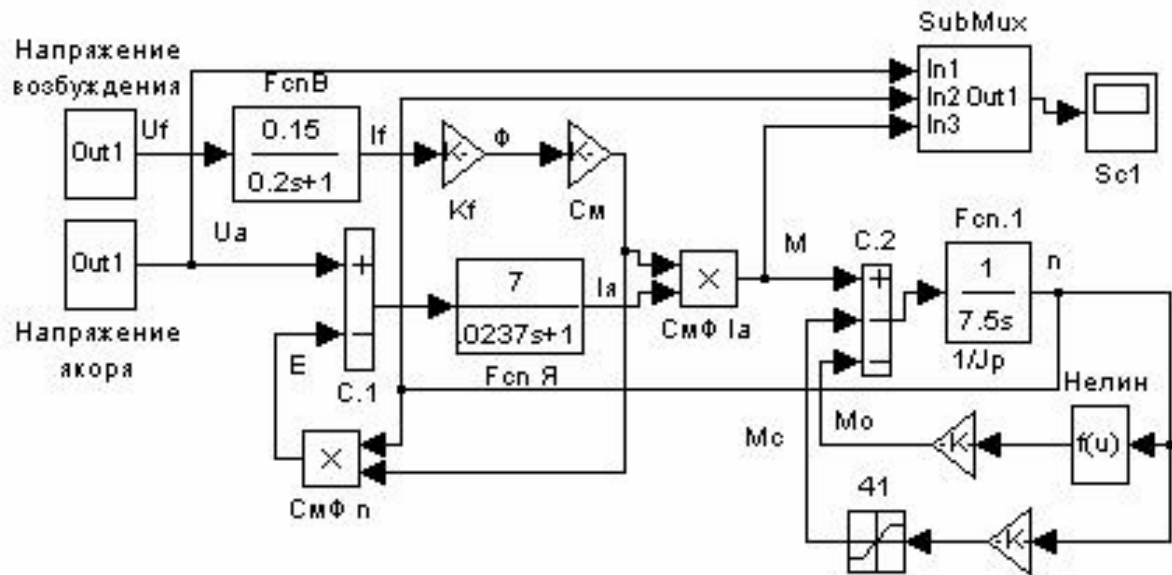


Рис.51. Модель двигателя с независимым возбуждением

На рис.51 постоянные времени обмоток якоря и возбуждения двигателя  $T_a = L_a / R_a$  с;  $T_f = L_f / R_f$  с; напряжение якоря  $U_a$  В; момент инерции двигателя  $J$ ,  $s$ -оператор дифференцирования. Двигатель представлен моделью с компенсированной реакцией якоря при постоянном магнитном потоке  $\Phi$ .

## 11. Выбор мощности ЭМ электропривода

### Общие сведения

Правильный выбор электрической машины (ЭМ) по мощности при проектировании электропривода ЭП в полном соответствии с предполагаемой нагрузкой и режимом его работы имеет большое экономическое значение. Установка ЭМ недостаточной мощности приводит к преждевременному выходу их из строя и снижению производительности производственной машины. Применение ЭМ завышенной мощности приводит к увеличению капитальных затрат, соответственному завышению мощности трансформаторов, преобразовательных устройств, повышенному расходу электроэнергии за счет снижения КПД.

**Выбор и проверка ЭП по мощности производится, исходя из условия выполнения заданной работы при допустимой механической перегрузке и его нормальном нагреве. Расчет состоит в сопоставлении параметров режимов работы, для которых проектировался ЭМ, с параметрами конкретных режимов, в которых он работает в реальном электроприводе.**

Расчет ведется исходя из нагрузочных диаграмм  $M=f(t)$ ;  $I=f(t)$ ;  $P=f(t)$ .

Расчет по нагреву заключается проверкой по перегрузочной способности. Нагрев происходит за счет потерь в меди, стали, потерь механических, вентиляционных и т.п. Тепло частично отдается в окружающую среду.

При расчете учитываются все виды теплообмена (теплопроводность, конвекция, теплоизлучение).

В соответствии с ГОСТ для ЭМ предусматривается восемь режимов работы, которые в соответствии с международной классификацией имеют условные обозначения S1-S8. Наиболее часто встречаются три режима S1-S3.

**Продолжительным номинальным режимом работы S1 называется режим работы ЭМ с номинальной нагрузкой такой длительности, при которой превышение температуры всех частей двигателя над температурой окружающей среды достигает установившегося значения.** Зависимость температуры перегрева от времени для этого режима приведены на рис.52. (В паспортных данных ЭМ указывается мощность, частота вращения, напряжение и ток именно для режима S1).  $T > (3...4)T_H$ , где  $T_H$  – постоянная времени нагрева, которая

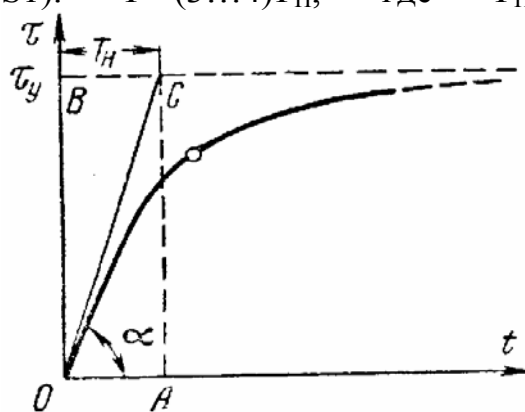


Рис.52.

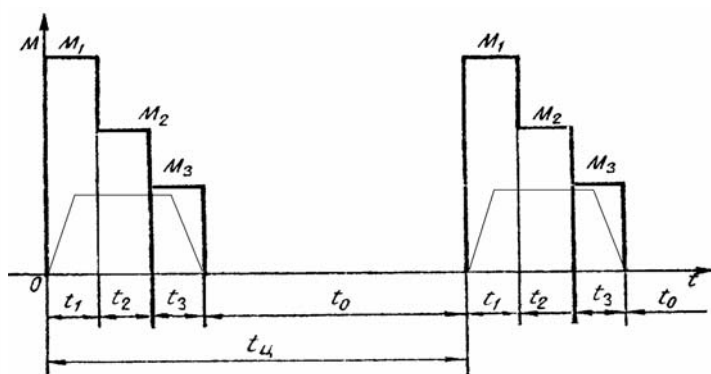


Рис.53

соответствует времени, за которое ЭМ нагрелась бы до установившегося значения при условии отсутствия отдачи тепла в окружающую среду (мера тепловой инерции).

**Кратковременным номинальным режимом S2 называется режим, при котором период работы  $t_p$  с номинальной нагрузкой чередуется с периодом**

$t_0$  отключения ЭМ. При этом периоды работы не настолько длительны, чтобы превышение температуры достигло установившегося значения, а периоды отключения настолько длительны, что все части ЭМ успевают охладиться до температуры окружающей среды  $t < (3 \dots 4) T_H$ .

**Повторно-кратковременный режим работы S3** – это такой режим, при котором периоды неизменной номинальной нагрузки  $t_p$  чередуются с паузами  $t_0$ . Причем рабочие периоды не настолько длительны, чтобы превышение температуры достигли установившихся значений, а паузы не настолько длинны, чтобы превышение температуры снизилось до нуля (рис.53).

### Выбор ЭМ по мощности методом средних потерь

В реальных электроприводах, работающих в продолжительных режимах, нагрузка на валу ЭМ может оставаться постоянной либо изменяться. В первом случае выбор ЭМ по мощности является наиболее простым. В этом случае по каталогу выбирается ЭМ для режима S1 с номинальной мощностью, равной мощности  $P$ , требуемой для работы машины. Если в каталоге нет ЭМ, мощность которого соответствует необходимой величине, то выбирают ближайший по мощности двигатель.  $P_{ном} = M_{ном} \omega_{ном} \geq P$

Большая часть рабочих машин и механизмов работает с переменной нагрузкой. При этом режим работы может не соответствовать нормативам ГОСТ. В этих случаях выбор ЭМ более сложен.

*Предположим, что электропривод рабочей машины имеет нагрузочную диаграмму, представленную на рис.54.*

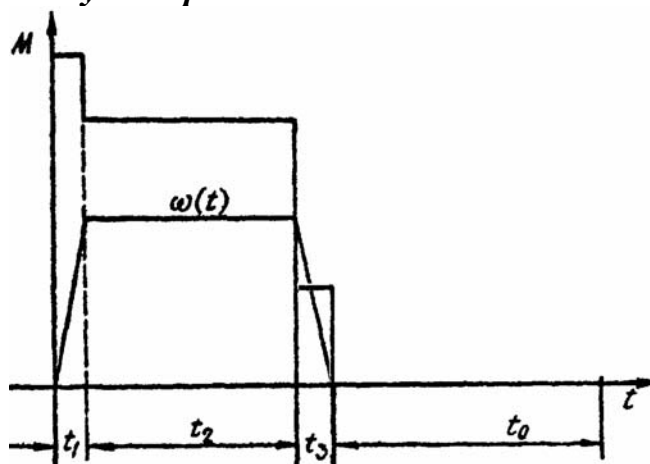


Рис.54.

В таких случаях ЭМ выбирают либо методом средних потерь, либо методом эквивалентных величин. Сущность первого метода заключается в следующем. Для каждого участка нагрузочной диаграммы находят потери ЭМ, а затем находят средние потери мощности для всех участков. Далее эти средние потери сравниваются с номинальными потерями, на которые рассчитан ЭМ. В этом случае из условия, что при равенстве потерь мощности, ЭМ будет работать при допустимой для него температуре. Алгоритм расчета и выбора ЭМ по мощности при этом выглядит следующим образом.

1. На основании нагрузочной диаграммы рассчитывается средняя мощность.

$$P_{CP} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_N t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}$$

2. Предварительно по каталогу выбирают ЭМ мощностью

$$P_H = (1,1 - 1,3) P_{CP}$$

3. С помощью зависимости  $\eta = f(P)$  для каждого интервала нагрузочной диаграммы определяют потери мощности по формуле

$$\Delta P_I = \frac{P_I}{\eta_I} - P_I$$

4. Рассчитывают средние потери по формуле

$$\Delta P_{CP} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_N t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}$$

5. Определяют номинальные потери мощности

$$\Delta P_H = \frac{P_H}{\eta_H} - P_H$$

6. Сравнивают средние потери и номинальные, если  $\Delta P_{CP} \leq P_H$ , то ЭМ по нагреву выбран правильно. Если  $\Delta P_{CP} \geq P_H$ , то необходимо выбрать по каталогу более мощный ЭМ и повторить расчет.

**Метод средних потерь можно применять для любого типа ЭМ, он точен, однако наиболее трудоемок, для его использования необходимо знать зависимость КПД от мощности на валу двигателя. Поэтому этот способ применяется в тех случаях, когда необходимо точно определить требуемую мощность ЭМ.**

#### **Выбор мощности ЭМ методом эквивалентных величин**

**Метод эквивалентных величин менее точен, чем метод средних потерь, но зато проще и удобнее. Он позволяет определить номинальную мощность ЭМ, необходимую для выполнения заданного графика нагрузки.** (рис.54). Этот метод может быть реализован в трех вариантах:

- метод эквивалентного тока;
- метод эквивалентного момента;
- метод эквивалентной мощности.

Рассмотрим более подробно метод эквивалентного тока. Суть его заключается в том, что реальный ток, потребляемый ЭМ и изменяющийся во времени в соответствии с нагрузочной диаграммой, заменяют в расчетах эквивалентным током, который вызывает в ЭМ те же потери. Потери в ЭМ условно можно разделить на:

- постоянные (не зависящие от нагрузки) – это потери на трение, потери в стали, вентиляционные потери;
- переменные (зависящие от нагрузки) – это потери от протекания электрического тока, приводящие к нагреву обмотки ЭМ.

Следовательно, на каждом участке нагрузочной диаграммы полные потери мощности будут равны

$$\Delta P_I = \Delta P_0 + I_I^2 R,$$

а средние потери с учетом понятия эквивалентного тока определяются следующим образом

$$\Delta P_{CP} = P_0 + I_{\text{э}}^2 R$$

Подставляя  $\Delta P_{CP}$  в уравнение средних потерь, и, проводя преобразования, имеем

$$\Delta P_0 + I_{\text{э}}^2 R = \frac{(\Delta P_0 + I_1^2 R)t_1 + (\Delta P_0 + I_2^2 R)t_2 + \dots + (\Delta P_0 + I_N^2 R)t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}$$

Откуда можно найти выражение для определения величины эквивалентного тока

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}}$$

Для того, чтобы выбрать по каталогу ЭМ необходимой мощности, необходимо выдержать следующее условие

$$I_{\text{э}} \leq I_H,$$

где  $I_H$  - номинальное значение тока ЭМ, выбираемого по каталогу.

В тех случаях, когда нагрузочная диаграмма электропривода задается в виде зависимости электромагнитного момента от времени, то при выборе ЭМ по мощности удобнее пользоваться методом эквивалентного момента. Учитывая, что при неизменном магнитном потоке ЭМ имеет место прямая зависимость между током и электромагнитным моментом, можно получить выражение для определения эквивалентного момента

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}}$$

Для правильного выбора ЭМ по нагреву необходимо выполнить условие

$$M_{\text{э}} \leq M_H,$$

где  $M_H$  – номинальный момент ЭМ, выбираемого по каталогу.

Если нагрузочная диаграмма представлена в виде зависимости мощности от времени, то рекомендуется пользоваться третьим методом – методом эквивалентной мощности. В тех случаях, когда механические *характеристики* ЭМ обладают достаточной жесткостью, мощность, развиваемая ЭМ, пропорциональна моменту, то в этом случае выражение для определения эквивалентной мощности будет иметь вид

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}}$$

Пользуясь этим методом, необходимо при выборе ЭМ выполнить условие

$$P_{\text{э}} \leq P_H,$$

где  $P_H$  - номинальная мощность ЭМ, выбираемой по каталогу.

Методом эквивалентных величин нельзя пользоваться в тех случаях, когда постоянные потери или параметры ЭМ значительно изменяются в процессе работы. Методами эквивалентного момента и эквивалентной мощности также нельзя пользоваться, когда у ЭМ отсутствует прямая зависимость между током и моментом (ЭМ постоянного тока последовательного возбуждения). Методом эквивалентной мощности нельзя пользоваться, если в процессе работы ЭМ частота вращения изменяется заметным образом. С учетом изложенных ограничений для каждого случая выбирают соответствующий метод.

После выбора ЭМ по нагреву он должен быть проверен по допустимой нагрузке, так для выбранного ЭМ постоянного тока должно быть соблюдено следующее условие

$$\frac{I_{\text{МАКС}}}{I_H} \leq \lambda,$$

где  $I_{\text{МАКС}}$  -максимальное значение тока, взятое из нагрузочной диаграммы, А.

Для двигателей постоянного тока нормального исполнения значение коэффициента равно  $\lambda = 2 - 2,5$ .

Для ЭМ переменного тока, выбираемого по методу эквивалентного момента, должно быть соблюдено условие, что максимальный момент, взятый из нагрузочной диаграммы, должен быть меньше критического момента выбранного ЭМ, т.е.  $M_{\text{МАКС}} \leq M_K$ . В тех случаях, если эти условия не выполняются, необходимо выбрать ЭМ несколько большей мощности, руководствуясь уже не условиями нагрева, а его перегрузочными возможностями.

Следует также отметить, что методы средних потерь и эквивалентных величин справедливы в тех случаях, когда продолжительность работы ЭМ на отдельных участках нагрузочной диаграммы значительно меньше постоянной нагрева двигателя.

## РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

### Основная литература:

1. *Онищенко Г.Б.* Электрический привод. М.: АКАДЕМИЯ, 2006.
2. *Чиликин М.Г., Сандлер А.С.* Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1981.

### Дополнительная литература:

3. *Ковчин С.А., Сабинин Ю.А.* Теория электропривода. СПб.: Изд. Энергоатомиздат, 2000.
4. Электрический привод: Программа, методические указания, контрольные работы/СПГГИ (ТУ). Сост. *Алексеев В.В., Алексеев П.В., Татаренков Е.В.*, СПб, 2006.
5. *Алексеев В.В., Козярук А.Е., Загрянный Э.А.* Электрические машины. Моделирование электрических машин приводов горного оборудования: Учебное пособие. СПГГИ (ТУ), 2006.
6. *Вершинин В. И., Козярук А.Е., Соловьев А.С.* Выбор электроприводов типовых производственных машин и механизмов. СПб.: Изд. СПГГИ, 2000.
7. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под. Ред. В.А.Елисеева и А.В.Шинянского. М.: Энергоатомиздат, 1983.
8. *Вешневский С.Н.* Характеристики двигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1977.
9. *Алексеев В.В., Козярук А.Е., Алексеев П.В.* Электрический привод. Методические указания к практическим занятиям. СПГГИ (ТУ), 2009.

### Обозначения параметров, используемые в литературе:

ЭДС, напряжение, ток, сопротивление якоря:  $E$  или  $E_a$ ;  $U$  или  $U_a$ ;  $I$  или  $I_a$ ;  $r_a$  или  $r_a$

Момент (вращающий, электромагнитный, двигателя):  $M$ ;  $M_{\text{ЭМ}}$ ;  $M_{\text{ДВ}}$

Момент статического сопротивления:  $M_{\text{СТ}}$ ;  $M_c$

Скорость угловая вала электродвигателя:  $\omega$ ;  $\omega_2$ ;  $\omega_{\text{ДВ}}$

Скорость идеального холостого хода  $\omega_0$  (синхронная для АД и СД)

## Содержание

|                                                                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Основные законы, назначение, классификация, составные части ЭП .....</b>                                | <b>0</b>  |
| <i>Основные законы электромеханических преобразований .....</i>                                               | <i>1</i>  |
| <i>Классификация электроприводов.....</i>                                                                     | <i>2</i>  |
| <b>2. Характеристики электрических приводов .....</b>                                                         | <b>3</b>  |
| <i>Статические и динамические характеристики .....</i>                                                        | <i>3</i>  |
| <i>Условные обозначения и способы выполнения электрических схем.....</i>                                      | <i>6</i>  |
| <b>3. Механика электрического привода. Основные уравнения движения .....</b>                                  | <b>6</b>  |
| <i>Приведение моментов, сил и моментов инерции .....</i>                                                      | <i>7</i>  |
| <i>Продолжительность переходного процесса .....</i>                                                           | <i>9</i>  |
| <i>Механические характеристики рабочих машин .....</i>                                                        | <i>9</i>  |
| <i>Скоростные режимы электропривода. Статическая устойчивость .....</i>                                       | <i>10</i> |
| <i>Пример регулирования скорости электропривода .....</i>                                                     | <i>11</i> |
| <i>Статические характеристики ЭП постоянного тока .....</i>                                                   | <i>12</i> |
| <b>4. Режимы работы ДПТ в электроприводе.....</b>                                                             | <b>13</b> |
| <i>Двигательный и тормозные режимы работы двигателя .....</i>                                                 | <i>13</i> |
| <i>Регулирование скорости ДПТ. Естественные, искусственные характеристики .....</i>                           | <i>14</i> |
| <b>5. Электропривод по системе Г-Д .....</b>                                                                  | <b>16</b> |
| <b>6. Характеристики ДПТ с последовательным возбуждением .....</b>                                            | <b>16</b> |
| <b>7. Основные свойства асинхронных двигателей .....</b>                                                      | <b>18</b> |
| <i>Основные зависимости и характеристики АД в электроприводе .....</i>                                        | <i>19</i> |
| <i>Механические характеристики АД и их свойства .....</i>                                                     | <i>19</i> |
| <i>Пуск асинхронного двигателя .....</i>                                                                      | <i>21</i> |
| <i>Регулирование скорости ротора АД .....</i>                                                                 | <i>21</i> |
| <i>Асинхронные каскады .....</i>                                                                              | <i>23</i> |
| <i>Принцип частотного регулирования .....</i>                                                                 | <i>26</i> |
| <i>Импульсное регулирование скорости АДФР .....</i>                                                           | <i>27</i> |
| <i>Асинхронный короткозамкнутый двигатель с управляемыми тиристорными ключами и токовым регулятором .....</i> | <i>28</i> |
| <b>8. Управление синхронным двигателем .....</b>                                                              | <b>29</b> |
| <b>9. Типовые схемы управления движением асинхронных электроприводов .....</b>                                | <b>29</b> |
| <b>10. Основы динамики электрического привода .....</b>                                                       | <b>31</b> |
| <b>11. Выбор мощности ЭМ электропривода .....</b>                                                             | <b>33</b> |
| <i>Общие сведения .....</i>                                                                                   | <i>33</i> |
| <i>Выбор ЭМ по мощности методом средних потерь .....</i>                                                      | <i>34</i> |
| <i>Выбор мощности ЭМ методом эквивалентных величин .....</i>                                                  | <i>35</i> |
| <b>РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>                                                        | <b>37</b> |