

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД  
И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

В АПК

Часть 2

РЕГУЛИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА

Учебное пособие

Новосибирск 2017

УДК 621.3–83 + 621.3 (0.75)

ББК 40.76, Я76

Э 453

Составители: канд. техн. наук, доц. А. Ю. Кузнецов, П. В. Зонов

Рецензент канд. техн. наук, доц. И.С. Тырышкин

Электрический привод и электрооборудование в АПК. Ч. 2: Регулирование двигателя постоянного тока: учеб. пособие / Новосиб. гос. аграр. ун-т, Инженер. ин-т; 2-е издание сост.: А. Ю. Кузнецов, П. В. Зонов. – Новосибирск: ИЦ «Золотой колос», 2017. – 68 с.

В учебном пособии приведены основные теоретические сведения о конструкции и работе двигателя постоянного тока с независимым, параллельным, последовательным и смешанным возбуждением, а также электрических приводов на его основе. Рассмотрены вопросы регулирования координат электрического привода в разомкнутых и замкнутых структурах. Рекомендовано для самостоятельного изучения дисциплины «Электрический привод и электрооборудование в АПК», «Электрический привод сельскохозяйственной техники»

Предназначено для студентов очной и заочной формы обучения, всех направлений подготовки.

Утверждены и рекомендованы к изданию учебно-методическим советом Инженерного института (протокол №5 от 12 декабря 2017 г.).

© Новосибирский государственный аграрный университет, 2017

## Введение

Учебное пособие предназначено для самостоятельного изучения дисциплины «Электропривод и электрооборудование». Оно знакомит студентов с основными теоретическими положениями по асинхронному электроприводу и содержит примеры, а также вопросы для самопроверки.

Учебное пособие разработано с учетом требований ГОС ВО по следующим направлениям подготовки 35.03.06 – Агроинженерия, 20.03.01 Техносферная безопасность, в соответствии с программой учебной дисциплины «Электропривод и электрооборудование в АПК».

После освоения дисциплины студент обучающийся по направлению подготовки 35.03.06 – Агроинженерия должен иметь следующие обще профессиональные и профессиональные компетенции (ПК):

- способностью использовать приемы оказания первой помощи, методы защиты в условиях чрезвычайных ситуаций (ОПК-9);
- готовностью к профессиональной эксплуатации машин и технологического оборудования и электроустановок (ПК-8);
- способностью использовать современные методы монтажа, наладки машин и установок, поддержания режимов работы электрифицированных и автоматизированных технологических процессов, непосредственно связанных с биологическими объектами (ПК-10).

Для направления подготовки 35.03.06 – Агроинженерия должен иметь следующие обще профессиональные и профессиональные компетенции (ПК):

- способностью учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области обеспечения техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности (ОПК-1);
- способностью использовать методы расчетов элементов технологического оборудования по критериям работоспособности и надежности (ПК-4).

## 1. ТЕОРИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Двигатель постоянного тока (ДПТ) состоит из трех основных частей: статора с обмоткой возбуждения, ротора с якорной обмоткой и щеточно-коллекторного узла, необходимого для подведения напряжения к обмотке якоря (ОЯ). При этом щетки неподвижны, а коллектор жестко связан с якорем.

В ДПТ для улучшения условий коммутации могут быть также предусмотрены дополнительные полюсы, а для компенсации поперечной реакции якоря – компенсационные обмотки на полюсах статора.

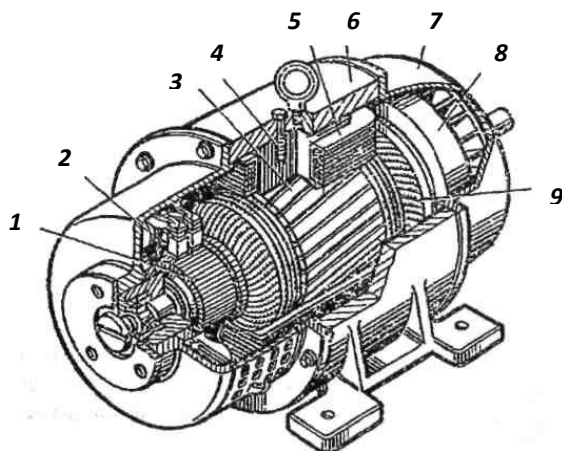


Рис. 1. Устройство двигателя постоянного тока

На рис. 1 показано устройство двигателя постоянного тока. К станине 6 болтами крепят главные полюсы, состоящие из сердечника 4 и катушки обмотки возбуждения 5. С торцовых сторон к станине крепят боковые щиты 7 с подшипниками, удерживающими вал машины. Якорь ДПТ состоит из сердечника 3, обмотки 9 и коллектора 1. На валу якоря укреплен вентилятор 8, на коллекторе помещены неподвижные щетки 2.

В зависимости от способа электромагнитного возбуждения ДПТ подразделяют на ДПТ с *независимым* (НВ), *последовательным* (ПВ) и *смешанным* (СВ) возбуждением. Иногда встречается название «ДПТ с параллельным возбуждением», однако такой ДПТ является частным случаем ДПТ с независимым возбуждением, и этот термин применяется как доопределяющий.

### 1.1. Уравнение электромеханической характеристики ДПТ с независимым возбуждением

Схема включения ДПТ с НВ представлена на рис. 2.

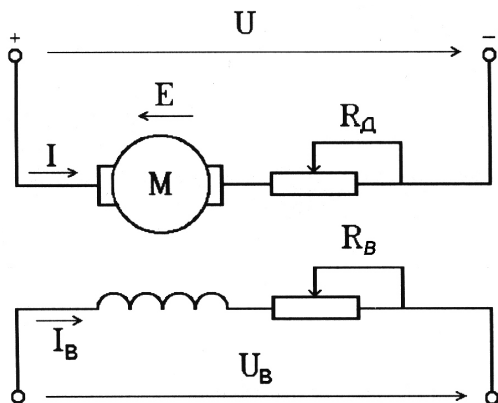


Рис. 2. Схема включения ДПТ с НВ

Для ДПТ с НВ справедлива система уравнений, описывающая его статическое состояние:

$$\begin{cases} U = I \cdot R + E, \\ E = c_E \cdot \omega, \\ M = c_M \cdot I, \end{cases} \quad (1.1)$$

где  $U$  – напряжение питания якорной цепи, В;  $R$  – суммарное сопротивление якорной цепи, Ом,  $R = R_{\text{я}} + R_{\text{о}}$ ,

$R_{\text{я}}$  – сопротивления обмотки якоря,  $R_{\text{д}}$  – добавочное сопротивление в цепи якоря;  $M$  – электромагнитный момент, Н·м;  $I$  – ток якоря, А;  $\omega$  – угловая скорость вращения двигателя, рад/с;  $E$  – ЭДС вращения якоря, В;  $c_E$  и  $c_M$  – коэффициенты пропорциональности;  $k = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a}$  – постоянная ДПТ ( $p$  – число пар полюсов;  $N$  – число активных проводников обмотки якоря;  $a$  – число пар параллельных ветвей обмотки якоря).

При использовании системы единиц СИ имеет место численное равенство, которые можно обозначить через коэффициент пропорциональности  $c$ :  $c_E = c_M = c = k \cdot \Phi$ , где  $k$  – конструктивный коэффициент двигателя;  $\Phi$  – магнитный поток, Вб.

Решая совместно первые два уравнения в системе (1.1), можно получить уравнение электромеханической характеристики ДПТ, которое определяет зависимость  $\omega = f(I)$ :

$$\omega = \frac{U - I \cdot R}{k \cdot \Phi}. \quad (1.2)$$

### ***1.1.1. Графическое изображение электромеханической характеристики***

Из пропорциональной связи между  $I$  и  $M$  следует, что графики механической и электромеханической характеристик ДПТ с НВ при соответствующем масштабировании по оси абсцисс величин  $I$  и  $M$  совпадают, поэтому часто обозначение оси абсцисс приводится как  $M(I)$ .

Из анализа уравнения электромеханической характеристики (1.2) следует, что она может быть представлена прямой линией (рис. 3) при неизменных величинах  $U$ ,  $\Phi$  и  $R$ .

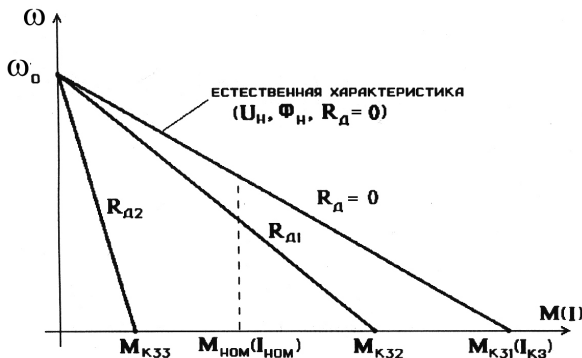


Рис. 3. Механические (электромеханические) характеристики ДПТ с НВ в двигательном режиме при различных значениях добавочного сопротивления  $R_{д1} < R_{д2}$

**Характеристика, полученная при номинальном значении напряжения на якоре  $U_{ном}$ , номинальном магнитном потоке  $\Phi_{ном}$  и отсутствии внешних резисторов в якорной цепи, называется естественной.** При изменении хотя бы одного из указанных параметров электромеханическая характеристика называется искусственной. Таким образом, ДПТ с НВ обладает лишь одной естественной характеристикой и множеством искусственных характеристик.

### 1.1.2. Анализ уравнений электромеханической характеристики

#### **Скорость холостого хода**

При  $I = 0$  имеет место режим идеального холостого хода и при этом

$$\omega_0 = \frac{U}{k \cdot \Phi}. \quad (1.3)$$

#### **Ток короткого замыкания**

С увеличением нагрузки на валу ДПТ возрастает и ток якоря  $I$ , т.к.  $M = k \cdot \Phi \cdot I$ , а это, в свою очередь, ведет к снижению  $\omega$ .

Если к якорю подведено напряжение, то при  $\omega = 0$  имеет место режим короткого замыкания, при котором, как следует из (1.2), ток короткого замыкания (называемый также пусковым током)

$$I_{кз} = \frac{U}{R}. \quad (1.4)$$

Максимальное значение тока короткого замыкания имеет место при  $R_o = 0$ , когда  $R = R_{я}$ , и оно может в десятки раз превышать величину номинального значения  $I_{ном}$  тока якоря двигателя, т.к.  $R_{я}$  величина сравнительно мала.

Реально режим короткого замыкания имеет место кратковременно, при пуске двигателя и при стопорении двигателя моментом сопротивления.

### ***Ограничение величины $I_{кз}$ .***

При прямом пуске двигателя значения тока  $I_{кз} \gg I_{ном}$ , поэтому якорная обмотка может быстро перегреться и выйти из строя. Кроме того, большие токи негативно влияют и на работоспособность щеточно-коллекторного узла.

Это обуславливает необходимость ограничения  $I_{кз}$  до допустимой величины либо введением дополнительного сопротивления в якорную цепь  $R_o$ , либо уменьшением значения питающего напряжения  $U$ .

Величина максимально допустимого тока  $I_{max.дон}$  определяется коэффициентом перегрузки по току:

$$k_m = \frac{I_{max.дон}}{I_{ном}}, \quad (1.5)$$

принимая значения от 2 до 5 (зависит от типа ДПТ).

Максимально допустимый ток короткого замыкания должен соответствовать неравенству

$$I_{max.дон} < k_m \cdot I_{ном}. \quad (1.6)$$

Для микродвигателей обычно осуществляется прямой пуск без добавочных сопротивлений, но с ростом габаритов



ДПТ необходимо производить реостатный пуск, особенно если привод с ДПТ используется в напряженных режимах с частыми пусками и торможениями.

Практически следует помнить, что если не ограничивать пусковые токи, то частыми пусками можно сжечь обмотку якоря ДПТ.

При введении  $R_{\phi}$  в цепь якоря жесткость электромеханической характеристики, как видно из рис. 3, уменьшается.

### ***1.1.3. Уравнение механической характеристики ДПТ с НВ***

С учетом третьего уравнения в системе (1.1) уравнение (1.2) можно переписать в виде зависимости  $\omega = f(M)$ , представляющей собой механическую характеристику ДПТ:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{M \cdot R}{k \cdot \Phi^2}. \quad (1.7)$$

Данное уравнение определяет зависимость угловой скорости вращения от момента на валу двигателя. Поскольку в статике вращающий момент  $M$  равен моменту сопротивления  $M_c$  на валу ДПТ, то это уравнение определяет зависимость  $\omega$  от  $M_c$ .

Следует отметить, что величина электромагнитного момента  $M$  превышает выходной момент на валу на величину, соответствующую потерям в стали и механическим потерям от трения, но в большинстве практических расчетов указанными потерями можно пренебречь.

Коэффициент пропорциональности  $k \cdot \Phi$  можно считать постоянным для тех ДПТ с НВ, у которых имеются компенсационные обмотки, или в случае, когда можно пренебречь влиянием реакции якоря на величину  $\Phi$ . В общем же случае влияние поперечной реакции якоря на величину магнитного потока  $\Phi$  ведет к нарушению линейности механической характеристики по мере увеличения тока.

### 1.1.4. Графическое изображение механической характеристики

Из выражения (1.7) следует, что графически механическая характеристика ДПТ с НВ может быть представлена прямой линией с двумя характерными точками – скоростью холостого хода  $w_0$  и моментом короткого замыкания  $M_{кз}$ , который также называется пусковым. Величина  $M_{кз}$  определяется по формуле

$$M_{кз} = k \cdot \Phi \cdot I_{кз} = c \cdot I_{кз}. \quad (1.8)$$

С введением добавочного сопротивления  $R_0$  в цепь якоря жесткость механических характеристик также падает, что с успехом используется при регулировании скорости вращения ДПТ.

Аналогично электромеханическим характеристикам различают *естественную* и *искусственные механические характеристики*.

Жесткость естественной характеристики определяется только сопротивлением якорной цепи двигателя:

$$\Delta\omega = \frac{I \cdot R}{c} \quad \text{или} \quad \Delta\omega = \frac{M \cdot R}{c^2}. \quad (1.9)$$

Снижение скорости  $\omega$  под нагрузкой объясняется следующим. При увеличении момента сопротивления механизма угловая скорость начинает снижаться. В результате уменьшается ЭДС  $E$  согласно системе уравнений (1.1). Ток якоря при этом увеличивается. Соответственно возрастает момент двигателя. Этот процесс продолжается до тех пор, пока момент двигателя не сравняется с моментом сопротивления. После достижения равенства  $M = M_c$  наступит новый установившийся режим с меньшей угловой скоростью  $\omega$ .

При инженерных расчетах коэффициенты, входящие в уравнения характеристик двигателя, могут быть определе-

ны через номинальные параметры двигателя, приводимые в каталогах. При номинальном магнитном потоке

$$\frac{1}{k \cdot \Phi_{ном}} = K_{\partial} = \frac{\omega_{ном}}{U_{ном} - I_{ном} \cdot R}. \quad (1.10)$$

Здесь коэффициент  $K_{\partial}$  – коэффициент передачи ДПТ, его размерность (рад/с) /В. С использованием этого понятия уравнения (1.2), (1.7) могут быть переписаны в виде:

$$\omega = K_{\partial} \cdot U - K_{\partial} \cdot I \cdot R; \quad (1.11)$$

$$\omega = K_{\partial} \cdot U - K_{\partial}^2 \cdot M \cdot R. \quad (1.12)$$

В этих уравнениях, как и в (1.2), (1.7), первый член представляет собой угловую скорость идеального холостого хода, а второй – падение скорости от нагрузки:

$$\omega_o = K_{\partial} \cdot U, \Delta\omega = K_{\partial} \cdot I \cdot R \quad (1.13)$$

или

$$\Delta\omega = K_{\partial}^2 \cdot M \cdot R. \quad (1.14)$$

## 1.2. Характеристики и режимы ДПТ при последовательном возбуждении

В электрических приводах постоянного тока иногда используются электродвигатели с последовательным возбуждением, когда специально выполненная обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря (рис. 4).

Для двигателя последовательного возбуждения, как и для других двигателей постоянного тока при питании якоря от источника напряжения ( $U = \text{const}$ ), справедливы уравнения (1.4) и (1.5), однако если для двигателя независимого возбуждения поток не зависит от тока нагрузки, то для двигателя последовательного возбуждения поток является функцией тока нагрузки.

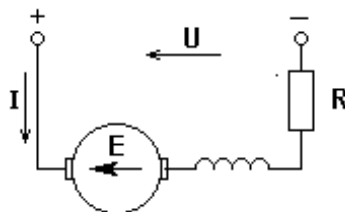


Рис. 4. Схема ДПТ  
последовательного возбуждения

Зависимость  $\Phi = j(I)$  – характеристика намагничивания – не имеет простого аналитического выражения, ее примерный вид изображен на рис. 5.

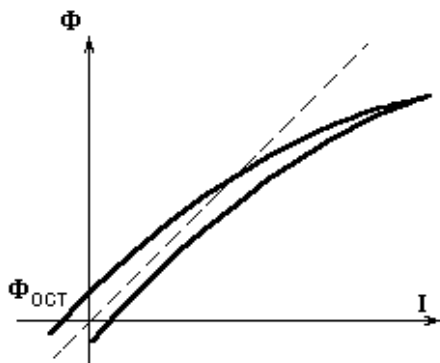


Рис. 5. Характеристика намагничивания  
машины постоянного тока

В первом приближении зависимость между скоростью двигателя и развиваемым им моментом в установившемся режиме можно найти в предположении, что поток возбуждения и ток в якоре двигателя связаны между собой линейной зависимостью (пунктир на рис. 5):

$$\Phi = \alpha \cdot I . \quad (1.15)$$

Тогда

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \alpha \cdot I} - \frac{R}{k \cdot \alpha} , \quad (1.16)$$

а поскольку

$$M = k \cdot \Phi \cdot I = k \cdot a \cdot I^2, \quad (1.17)$$

то

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{k \cdot \alpha \cdot M}} - \frac{R}{k \cdot \alpha}. \quad (1.18)$$

Таким образом, при сделанном допущении механическая характеристика ДПТ последовательного возбуждения изображается гиперболой (рис. 6); одной из ее асимптот является ось ординат, а другой – прямая, параллельная оси абсцисс,

$$\omega = -\frac{R}{k \cdot \alpha}. \quad (1.19)$$

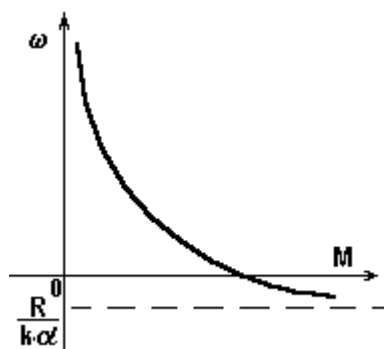


Рис. 6. Механическая характеристика ДПТ последовательного возбуждения

Жесткость механической характеристики  $\beta = \frac{dM}{d\omega}$  двигателя последовательного возбуждения переменна и возрастает с увеличением нагрузки.

Полученные уравнения дают общее представление о характеристиках электропривода с двигателем последовательного возбуждения, т.к. в действительности магнит-

ная система машины насыщена, и кривая намагничивания весьма далека от прямой. Поэтому в практических целях обычно пользуются универсальными характеристиками для серии машин (рис. 7), построенными в *относительных величинах*:

$$\omega^* = \frac{\omega}{\omega_H}, \quad I^* = \frac{I}{I_H}, \quad M^* = \frac{M}{M_H},$$

где  $\omega_H$ ,  $I_H$  и  $M_H$  – номинальные величины ДПТ,  $R_{\text{дон}} = 0$ .

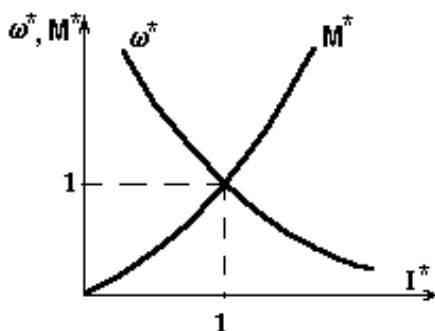


Рис. 7. Характеристики ДПТ последовательного возбуждения в относительных величинах

Электропривод с двигателями последовательного возбуждения в нормальной схеме ( $U = \text{const}$ ) может работать в тех же энергетических режимах, что и привод с двигателями независимого возбуждения, за исключением режима идеального холостого хода и генераторного режима параллельно с сетью (рекуперативное торможение), поскольку при нагрузке, стремящейся к нулю, к нулю стремится и магнитный поток, ось  $\omega$  – асимптота механической характеристики.

Некоторые особенности при последовательном возбуждении имеет режим динамического торможения.

Если якорь вращающейся машины отключить от источника напряжения и замкнуть на внешний резистор (рис. 8,

схема слева), то под действием потока остаточного магнетизма ( $\Phi_{ост}$  на рис. 5) в проводниках якоря возникает некоторая ЭДС  $E_{ост}$ , которая вызовет в замкнутой цепи ток. Этот ток, протекая по обмотке возбуждения в обратном против исходного направлении, размагнитит машину ( $\Phi = 0$ ), и тормозного момента создано не будет.

Для того, чтобы получить тормозной момент, ток, созданный  $E_{ост}$ , должен протекать в том же, что и раньше, направлении, усиливая магнитный поток, т.е. создавая самовозбуждение. Это условие выполнится, если при переходе на режим торможения переключить обмотку возбуждения как показано на рис. 8, схема справа.

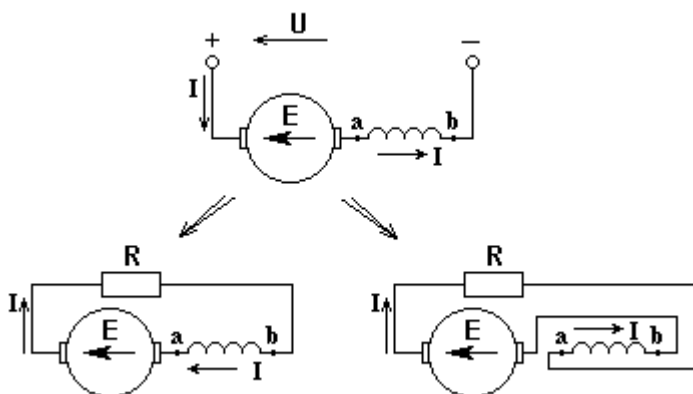


Рис. 8. К режиму динамического торможения с самовозбуждением

Ток, создаваемый увеличивающейся ЭДС, изменит знак, момент будет направлен против движения, т.е. станет тормозным. Работа машины постоянного тока с самовозбуждением возможна лишь при определенных условиях, а именно при таких значениях скорости и сопротивления  $R$  цепи якоря, чтобы имело место равенство

$$E = I \cdot R. \quad (1.23)$$

Существованию этого равенства отвечает наличие точки пересечения кривых  $E = \varphi(I)$  (при данной скорости) и прямой  $I \cdot R = f(I)$ , как показано на рис. 9, а. Очевидно, что чем больше  $R$ , тем при большей скорости произойдет самовозбуждение машины.

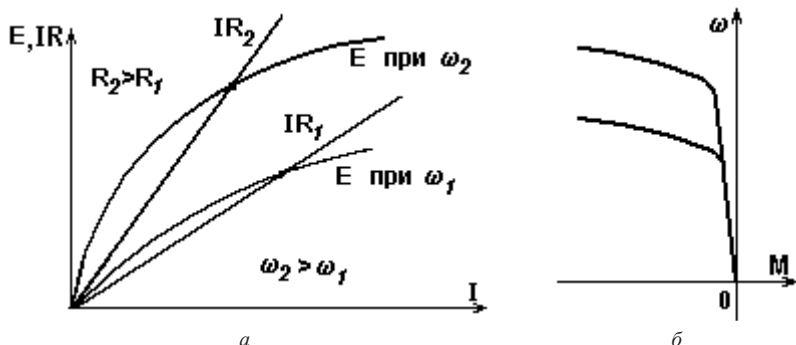


Рис. 9. Характеристики динамического торможения с самовозбуждением

Наименьшая скорость, при которой машина может самовозбуждаться, будет при  $R_{доо} = 0$ , т.е. при замкнутой накоротко якорной цепи машины.

Построение механической характеристики в режиме динамического торможения при самовозбуждении можно произвести исходя из уравнения баланса мощностей.

Мощность, развиваемая двигателем в режиме динамического торможения, целиком рассеивается в сопротивлениях якорного контура, т.е.

$$(-I)^2 \cdot R = -M \cdot \omega,$$

откуда

$$\omega = -\frac{I^2 \cdot R}{M}. \quad (1.24)$$

Зная  $R$  и задаваясь током  $I$ , по универсальной характеристике определяют соответствующий этому току момент



$M$ , вычисляют скорость  $\omega$  и т.д. Характер зависимой  $\omega$  ( $M$ ) в тормозном режиме при самовозбуждении изображен на рис. 9, б.

В электроприводах постоянного тока иногда используются двигатели смешанного возбуждения, имеющие две обмотки возбуждения, одна из которых включена последовательно в якорную цепь, а другая имеет независимое питание.

Двигатели последовательного возбуждения могут получать питание не только от источника напряжения, что было рассмотрено выше, но и от источника тока. Поскольку при этом магнитный поток будет неизменным, сохраняются и основные свойства электропривода, рассмотренные ранее.

### **1.3. Зоны допустимых нагрузок**

Главным требованием к любой технической системе является требование надежности, т.е. необходимо, чтобы в процессе работы ни одна из переменных не превысила допустимого значения. Режим работы и значения номинальных значений координат электрической машины всегда указывают в каталожных данных. Значение номинального напряжения обусловлено электрической прочностью изоляции машины; значения номинальных токов и мощности определены условиями нагрева ответственных элементов машины; значение номинальной частоты вращения связано с механической прочностью элементов конструкции, подшипниками и т.п.; номинальный КПД оценивает эффективность преобразования энергии в номинальном режиме.

На рис. 10 показаны зоны допустимых нагрузок двигателя. Как видно, в продолжительном режиме работы двигателя с независимым охлаждением ток на всех скоростях не должен превышать номинального значения (тонкий пунктир на рис. 10). В двигателях, охлаждаемых собственным

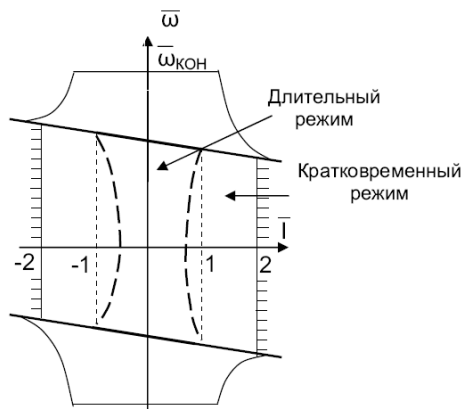


Рис. 10. Зоны допустимых нагрузок  
(угловая скорость и ток – в относительных единицах)

вентилятором, в продолжительном режиме необходимо снижать ток на 30–40 % при низких скоростях (жирный пунктир на рис. 10) во избежание недопустимого перегрева. Кратковременные (секунды) перегрузки по току ограничиваются условиями коммутации машины; допустимые перегрузки обычно не превышают  $(2-3) \cdot I_n$  (линии со штриховкой на рис. 10). Из изложенного следует недопустимость пуска электропривода постоянного тока (кроме микроприводов) прямым включением на номинальное напряжение.

#### 1.4. Энергетические режимы работы двигателя

Электрическая машина обладает так называемым свойством обратимости, в соответствии с которым она может работать как двигателем, преобразуя электрическую энергию в механическую, так и генератором, осуществляя обратное преобразование энергии. При этом переход из одного режима в другой может происходить без изменения схемы включения.

Рассмотрим режимы работы двигателя на различных участках его характеристик (рис. 11) при положительной полярности напряжения  $U$ .

**Режиму холостого хода** соответствует точка *a* характеристики. Двигатель не получает энергии ни из энергетической сети, ни с вала. В этом режиме  $I=0$ ,  $E=U=k\cdot\Phi\cdot\omega_0$ ,  $M=0$ ,  $\omega=\omega_0$ .

**Двигательному режиму** соответствует участок *ac* характеристики при скорости  $0 < \omega < \omega_0$ , т.е. в первом квадранте, где  $\omega$  и  $M$  совпадают по направлению. В этом режиме  $E < U$ , ток якоря  $I = (U - E) / R$  совпадает по направлению с напряжением сети  $U$  и не совпадает с ЭДС двигателя, электрическая энергия поступает из сети, а механическая энергия с вала двигателя передается исполнительному органу.

**Генераторный режим** работы машины параллельно с сетью, или торможение с рекуперацией энергии в сеть, имеет место на участке *ab* характеристики. На нем  $\omega > \omega_0$ , поэтому ЭДС больше напряжения сети, ток и момент изменяют свои направления на противоположные. Двигатель получает механическую энергию от рабочей машины и отдает ее в виде электроэнергии в сеть.

**Режим короткого замыкания** имеет место при  $\omega=0$  и  $E=0$ . В этом режиме  $I = I_{кз} = U/R$ , электрическая энергия поступает из сети, рассеивается в виде тепла в резисторах якорной цепи.

**Режим генератора при последовательном соединении с сетью**, иначе **режим торможения противовключением**, наступает при  $\omega < 0$  (участок *cd* характеристики). За счет изменения направления скорости ЭДС меняет свою полярность. Ток в якоре совпадает по направлению с напряжением и ЭДС и определяется суммарным действием, т.е.  $I = (U + E) / R$ . В результате этого электроэнергия поступает из сети и вырабатывается самим двигателем за счет механической энергии рабочей машины и рассеивается в виде тепла в резисторах цепи якоря.

**Режим автономного генератора, или режим динамического торможения.** Ток в якоре протекает под действием ЭДС и совпадает с ней по направлению. Электроэнергия вырабатывается за счет поступающей с вала механической энергии рабочей машины и рассеивается в виде тепла в резисторах якорной цепи.

Эффективность применения электромеханического преобразования энергии ДПТ оценивается КПД ( $h$ ), который определяется отношением полезной механической мощности на его валу  $P_{\text{мех}} = M \cdot \omega$  к потребляемой из сети электрической мощности  $P_{\text{эл}} = U \cdot I + U_{\text{в}} \cdot I_{\text{в}}$ :

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{эл}}} = \frac{P_{\text{мех}}}{(P_{\text{мех}} + \Delta P)},$$

где  $\Delta P$  – потери мощности в ДПТ.

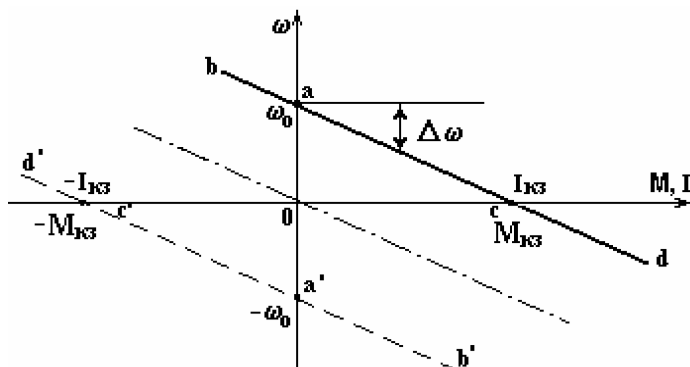


Рис. 11. Механические (электромеханические) характеристики ДПТ с НВ при  $U = \text{const}$

Схемы, иллюстрирующие энергетические режимы работы ДПТ, представлены на рис. 12, на котором обозначено:  $a$  – режим холостого хода;  $b$  – двигательный режим;  $b$  – генераторный режим параллельно с сетью;  $z$  – режим короткого замыкания;  $d$  – генераторный режим последовательно с сетью;  $e$  – генераторный режим независимо от сети.

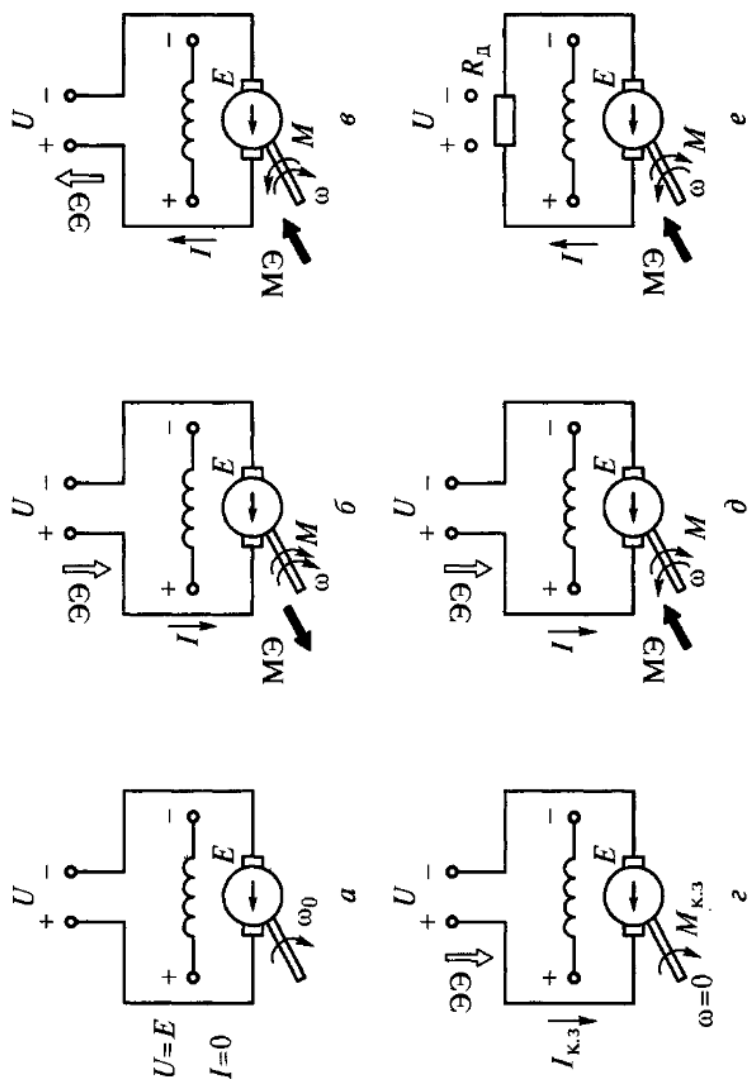


Рис. 12. Схемы энергетических режимов ДПТ

## 1.5. Регулирование угловой скорости ДПТ

### 1.5.1. Регулирование угловой скорости ДПТ независимого и последовательного возбуждения введением добавочных сопротивлений в цепь якоря

Схема подключения ДПТ НВ для этого способа регулирования приведена на рис. 13. На якорь и обмотку возбуждения двигателя подается номинальное напряжение:  $U = U_{ном}$ ;  $\Phi = \Phi_{ном}$ .

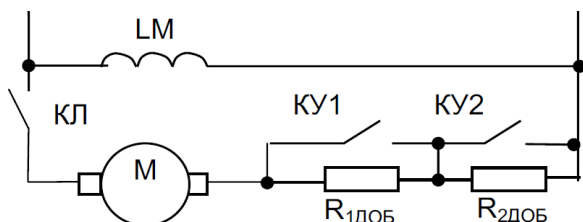


Рис. 13. Схема подключения ДПТ НВ при регулировании скорости добавочным сопротивлением

Электромеханическая и механическая характеристики двигателя описываются уравнениями (1.11), (1.12), в которых принято  $U_я = U_{ном}$ :

$$\omega = K_\phi \cdot U_{ном} - K_\phi \cdot I \cdot (R_я + R_d);$$

$$\omega = K_\phi \cdot U_{ном} - K_\phi^2 \cdot M \cdot (R_я + R_d).$$

Очевидно, что первое слагаемое в этих уравнениях  $\omega_0$  остается неизменным, а второй член – падение угловой скорости от нагрузки – тем больше, чем больше добавочное сопротивление.

Иными словами, с увеличением  $R_\phi$  жесткость характеристик снижается (рис. 14):

$$\beta_H = \frac{(k \cdot \Phi_n)^2}{r_я + R_{доб}} < \beta_E. \quad (1.25)$$

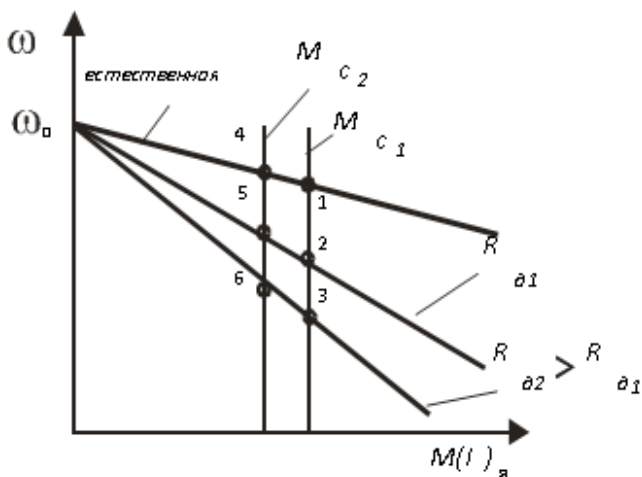


Рис. 14. Механическая характеристика ДПТ НВ при реостатном регулировании

Если, например, механизм имеет характеристику с моментом  $M_{c1}$ , не зависящим от скорости, то на естественной характеристике угловая скорость электропривода определяется точкой 1 (см. рис. 14), а при введении добавочных сопротивлений  $R_{01}$  и  $R_{02}$  снижается (точки 2 и 3).

**Получаемые при введении добавочных сопротивлений в цепь якоря характеристики называются искусственными – реостатными.**

Рассматриваемый способ регулирования имеет ряд существенных недостатков. Во-первых, он неэкономичен – часть энергии, подводимой от преобразователя, теряется в добавочном сопротивлении. Во-вторых,  $\omega$  регулируется ступенчато, что не всегда удобно. В-третьих, при изменении момента статического сопротивления угловая скорость изменяется. Так, например, если момент сопротивления механизма уменьшится до  $M_{c2}$  (см. рис. 14), то угловая скорость электропривода будет определяться точками 4, 5, 6.

**В электроприводе с двигателем последовательного возбуждения** при  $U = U_n$  (рис. 15, а) и известной естественной характеристике

$$\omega_e = \frac{U_n - I \cdot (R_a + R_e)}{k \cdot \Phi} \quad (1.26)$$

можно воспользоваться уравнением искусственных характеристик при реостатном регулировании

$$\omega_u = \frac{U_n - I \cdot (R_a + R_e + R_{\partial})}{k \cdot \Phi}$$

и получить соотношение для расчета  $\omega_u$  для любого тока:

$$\omega_u = \omega_e \frac{U_n - I \cdot (R_a + R_e + R_{\partial})}{U_n - I \cdot (R_a + R_e)}. \quad (1.26')$$

Механическая характеристика может быть построена по известной зависимости  $M(I)$ .

Примерный вид механических характеристик при реостатном регулировании показан на рис. 15, б.

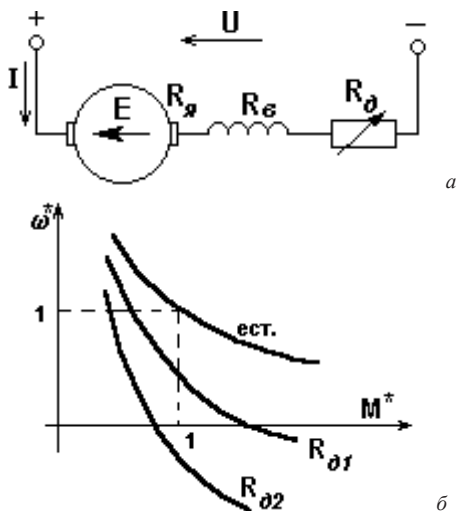


Рис. 15. Схема (а) и характеристики (б) при реостатном регулировании двигателя последовательного возбуждения



Проведем оценки реостатного способа регулирования.

1. Регулирование однозонное – вниз от основной скорости, так как, вводя  $R_o$ , мы увеличиваем  $\Delta\omega$ , и все искусственные характеристики в 1-м квадранте располагаются ниже естественной.

2. Диапазон реостатного регулирования невелик и соответствует 2–2,5:1 при изменении  $M_c$  на 40–50 %.

Стабильность скорости – низкая, жесткость характеристик падает с ростом  $R$ . Из (2.5) имеем:

$$M = \frac{U - \omega \cdot c^2}{R},$$

где  $c = k \cdot \Phi_n$  (в дальнейшем, желая подчеркнуть неизменность потока возбуждения двигателя, мы будем часто пользоваться символом  $c$ ).

$$\text{Тогда коэффициент } \beta = \frac{dM}{d\omega} = -\frac{c^2}{R} \equiv -\frac{1}{R}.$$

Это свойство реостатного регулирования часто существенно осложняет его использование: небольшое случайное изменение  $M_c$  на низких скоростях приводит к значительному изменению  $\omega$ .

3. Реостатное регулирование – ступенчатое, так как величина сопротивления резистора в якорной цепи допускает лишь дискретное изменение. Получение большого числа ступеней затруднено, так как требует большого количества коммутирующих аппаратов (контакторов).

4. При принятых ранее допущениях (внешний обдув) можно считать, что  $M_{доп} = M_n$  на любой реостатной характеристике, так как магнитный поток неизменен.

5. Потери энергии при регулировании значительны и связаны с глубиной регулирования. Это непосредственно вытекает из способа регулирования: скорость изменяется за счет включения резистора – элемента, превращающего по-

ступающую в него электрическую энергию в тепло. Найдем количественную оценку потерь мощности (энергии) при реостатном регулировании. Умножив обе части уравнения (1.3) на  $I$ , получим уравнение баланса мощностей:

$$U \cdot I = E \cdot I + I^2 \cdot R,$$

где  $U \cdot I = P_1$  – мощность, потребляемая из сети;

$E \cdot I = P_{\text{эм}}$  – электромагнитная мощность, преобразуемая в механическую;

$I^2 \cdot R = DP$  – потери мощности в якорной цепи.

Выразив  $U$  и  $E$  через магнитный поток и скорость в соответствии с (1.1) и подставив их в выражение для  $DP$ , будем иметь:

$$\begin{aligned} \Delta P &= k \cdot \Phi \cdot \omega_0 \cdot I - k \cdot \Phi \cdot \omega \cdot I = \\ &= M \cdot \omega_0 - M \cdot \omega = M(\omega_0 - \omega) = P_1 \cdot \Delta \omega^*. \end{aligned}$$

Этот результат, заключающийся в том, что потери мощности пропорциональны относительному перепаду скорости, очень важен и, как мы увидим далее, универсален и применим к ряду других случаев.

6. Капитальные затраты на реостатное регулирование сравнительно невелики: к двигателю добавляется лишь недорогой резистор и коммутационная аппаратура.

Таким образом, реостатное регулирование координат используется в основном для механизмов, не предъявляющих жестких требований к стабильности скорости. К ним относятся, в частности, грузоподъемные механизмы, устанавливаемые в цехах промышленных предприятий. Дополнительным обстоятельством, диктующим применение этого способа регулирования, является наличие сети постоянного тока, например, в легковых автомобилях.

Рассмотрим реостатный пуск на примере ДПТ НВ. На рис. 13 приведена схема силовых цепей реостатного пуска ДПТ. Реостатный пуск предусматривает при подаче напря-

жения на якорную цепь введение добавочного сопротивления, ограничивающего величину тока якоря допустимым значением по технологическим условиям пуска.

На рис. 16 приведены механические характеристики, обеспечивающие пуск двигателя. При замыкании контактора КЛ ток  $I_1$  протекает через обмотку якоря и добавочные сопротивления  $R_{доб}$  и  $R_{доб2}$ , создается момент  $M_1$ . Двигатель разгоняется по характеристике 1, ток снижается, и при скорости  $\omega_1$  и моменте переключения  $M_2$  включается контактор КУ1, шунтируя  $R_{доб}$ . Двигатель переводится на характеристику 2. Ток якоря вновь увеличивается до значения  $I_1$ , момент – до  $M_1$ . Происходит разгон по характеристике 2 до скорости  $\omega_2$ , где при моменте переключения  $M_2$  включается контактор КУ2, переводя двигатель на естественную характеристику. На этой характеристике продолжается разгон до скорости  $\omega_c$ , где при  $M = M_c$  двигатель переходит в установившийся режим работы.

Правильная пусковая диаграмма строится из условия поддержания постоянства среднего пускового момента двигателя, обеспечивающего равенство максимальных моментов  $M_1$  на каждой из пусковых характеристик, а также равенство моментов переключения  $M_2$  (см. рис. 16).

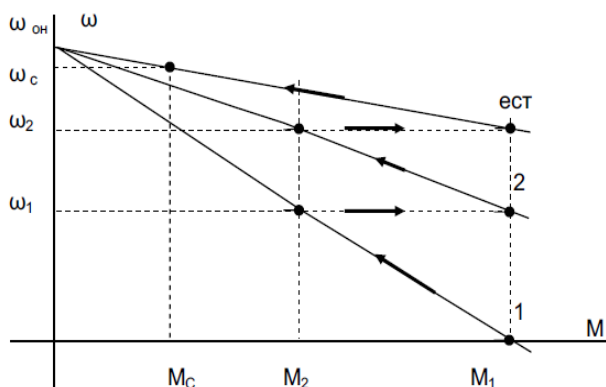


Рис. 16. Правильная пусковая диаграмма ДПТ

Рассмотрим порядок расчета правильной пусковой диаграммы аналитическим методом.

1. По заданному способу пуска (форсированный, с допустимым ускорением, нормальный) определяется момент  $M_1$  (или момент  $M_2$ ).

2. При  $\omega = 0$  рассчитывается  $R = U_n / I_1$ , где  $I_1 = M_1 / k \cdot \Phi_n$ .

3. Разбивается  $R_{доб}$  на ступени, обеспечивая правильную пусковую диаграмму.

Современные станции управления выпускают с двумя – тремя ступенями. При увеличении числа ступеней растут габариты и стоимость установки, но снизить время пуска не удастся, так как каждый аппарат обладает конечным быстродействием.

При  $\omega = \omega_1$  токи якоря

$$I_2 = \frac{(U_n - E_1)}{R_1}, \quad I_1 = \frac{(U_n - E_1)}{R_2}, \quad \text{тогда} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

При  $\omega = \omega_2$  токи якоря

$$I_2 = \frac{(U_n - E_2)}{R_2}, \quad I_1 = \frac{(U_n - E_1)}{r_я}, \quad \text{тогда} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1}{r_я}.$$

В общем случае и при большем числе ступеней отношение токов и сопротивлений остается величиной постоянной:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_2}{R_3} = \dots = \frac{R_m}{r_я} = \lambda.$$

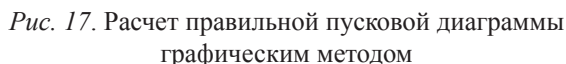
Откуда  $R_1 = \lambda \cdot R_2 = \lambda^2 \cdot R_3 = \dots = \lambda^m \cdot r_я$ . Необходимо убедиться, что  $M_2 \geq 1,2 \cdot M_c$ .

Таким образом, для разбиения  $R_{доб} = R_1$  на ступени задаемся током  $I_1$ , числом ступеней  $m$  и определяем  $\lambda = I_1 / I_2$ . По величине  $\lambda$  рассчитываем полные сопротивления на пусковых характеристиках.

Сопротивления ступеней:

$$R_{1доб} = R_1 - R_2; \quad R_{2доб} = R_2 - r_я.$$

1. Строят естественную механическую характеристику ДПТ (рис. 17).



3. Методом подбора строят правильную пусковую диаграмму таким образом, чтобы переход на естественную характеристику совпал с моментом  $M_1$ . Если моменты не совпали, вновь задаются моментом переключения  $M_2$  и повторяют построение.

$$ab \equiv r_g, bc \equiv R_{3\partial\partial\phi}, cd \equiv R_{2\partial\partial\phi}, de \equiv R_{1\partial\partial\phi},$$

и рассчитывают сопротивления ступеней

$$R_{1доб} = r_{я} \cdot \frac{de}{ab}, \quad R_{2доб} = r_{я} \cdot \frac{cd}{ab}, \quad R_{3доб} = r_{я} \cdot \frac{bc}{ab}.$$

### **1.5.2. Регулирование скорости вращения ДПТ независимого и последовательного возбуждения изменением магнитного потока**

Схема подключения двигателя для рассматриваемого способа регулирования приведена на рис. 18, а. Обмотка возбуждения  $LM$  двигателя подключена к управляемому преобразователю  $УП$ , с помощью которого изменяется напряжение возбуждения  $U_B$  и соответственно магнитный поток  $\Phi$ . На якорь двигателя подается напряжение  $U_{ном}$  от неуправляемого преобразователя  $П$ .

Возможна и иная схема (см. рис. 18, б) – обмотку возбуждения подключают к неуправляемому преобразователю или сети постоянного тока через реостат  $R$ , с помощью которого регулируют ток возбуждения и магнитный поток.

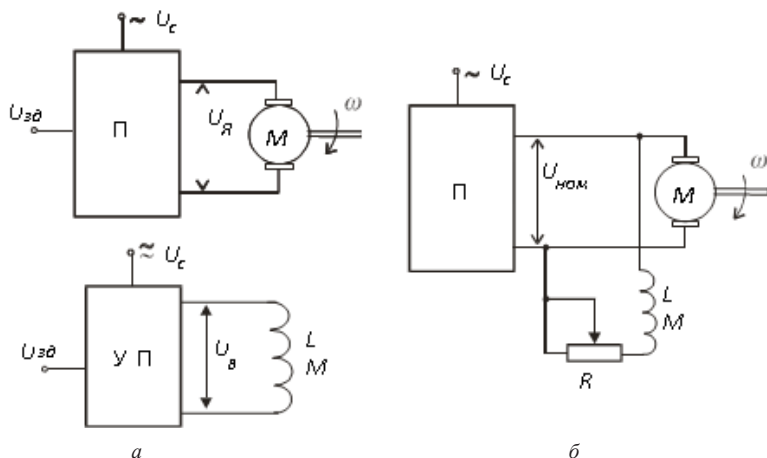


Рис. 18. Схема подключения ДПТ НВ при регулировании скорости изменением магнитного потока

Для анализа удобно воспользоваться уравнениями электрической и механической характеристик в форме (1.2), (1.7). Учитывая, что напряжение на якоре остается номинальным, а добавочное сопротивление в цепи якоря равно нулю, указанные уравнения можно переписать в виде

$$E' = \frac{U_{ном}}{k \cdot \Phi} - \frac{I \cdot R}{k \cdot \Phi}; \quad (1.27)$$

$$\omega = \frac{U_{ном}}{k \cdot \Phi} - \frac{M \cdot R}{k^2 \cdot \Phi^2}. \quad (1.28)$$

Несложно заметить, что угловая скорость на холостом ходу (первый член уравнений) при уменьшении (ослаблении) магнитного потока  $\Phi$  увеличивается, что позволяет получить (рис. 19) характеристики, расположенные выше естественной.

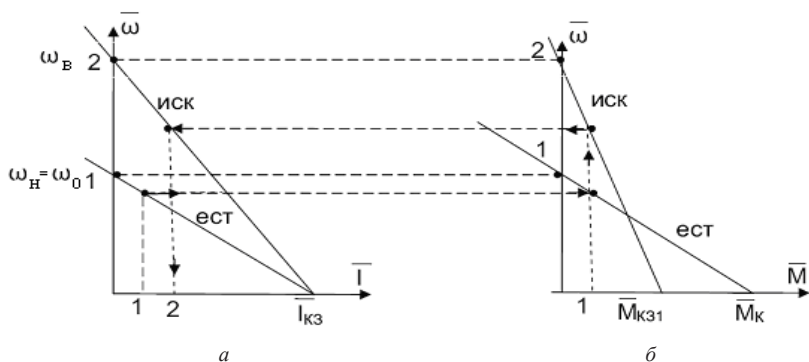


Рис. 19. Электромеханические (а) и механические (б) характеристики (в относительных единицах) при изменении потока  $\Phi$

Второй член в приведенных уравнениях – падение угловой скорости под нагрузкой – тем больше, чем больше ослаблен магнитный поток. Следовательно, жесткость характеристик тем ниже, чем больше ослаблен магнитный поток. При этом падение скорости на механической характе-

ристике зависит от  $\Phi^2$ , т.е. при ослаблении магнитного потока, например, в 2 раза падение угловой скорости при том же моменте увеличивается в 4 раза.

Как видно из рис. 19, момент двигателя  $M = k \cdot \Phi \cdot I$  прямо пропорционален потоку, и значение  $M_{кз}$  снижается при уменьшении потока до  $M_{кз1}$ . Обычно изменение потока выполняют для скоростей выше естественной характеристики,  $U = U_n$  и  $R = r_a$ . В этом случае  $I_{кз} = (10 \dots 20) \cdot I_n$  и зона допустимой работы двигателя по условиям коммутации  $I_{дон} = (2 \dots 2,5) \cdot I_n$  располагается выше естественной электрохимической и механической характеристики.

С учетом этого говорят, что **регулирование угловой скорости ослаблением магнитного потока ведется при постоянной допустимой мощности  $P = const$** .

Расчет искусственных характеристик при известной величине потока  $\Phi$  несложен. По формулам рассчитывается скорость идеального холостого хода  $w_0$ , при номинальном моменте – падение скорости  $Dw$ . Сложность представляет расчет тока возбуждения  $i_g$  по известному потоку  $\Phi$ , когда не приводится кривая намагничивания. При отсутствии собственной кривой приходится применять для расчетов универсальную кривую намагничивания, приводимую в справочниках.

Рассматриваемый способ регулирования достаточно удобен и экономичен, т.к. мощность в цепи возбуждения двигателя значительно меньше, чем в цепи якоря.

Диапазон регулирования  $D_\phi$  изменением магнитного потока определяется отношением наибольшей угловой скорости  $w_B$  к скорости  $w_n = w_0$  (см. рис. 19), соответствующей естественной характеристике. Предельное значение  $D_\phi$  составляет 4...5 и ограничено в основном коммутационной устойчивостью машины.

**Регулирование угловой скорости ДПТ ПВ ослаблением потока возбуждения** позволяет, как и для ДПТ НВ, полу-



чить скорости выше основной. Действительно, как следует из уравнения (1.26), уменьшение потока  $\Phi$  приводит при том же токе якоря к возрастанию первого слагаемого. Ослабление потока возбуждения обычно осуществляют за счет шунтирования обмотки возбуждения добавочным сопротивлением.

Из анализа механических характеристик ДПТ ПВ следует, что они являются весьма удобными для электрической тяги (трамвай, метро, троллейбус, электровозы, тепловозы) и подъемных механизмов по следующим соображениям.

1. Двигатель имеет низкую скорость при больших нагрузках и высокую – при малых, тем самым обеспечивается естественное регулирование скорости движения при изменении сопротивления перемещению.

2. Транспортные и грузоподъемные механизмы требуют больших начальных моментов при пуске, именно такие моменты обеспечивает ДПТ ПВ; у ДПТ НВ момент пропорционален току:  $M \sim I$ , а у ДПТ последовательного возбуждения  $M \sim I^2$ . А так как при пуске двигателя  $I = (1,5 \dots 2,0) \cdot I_n$ , то ДПТ последовательного возбуждения развивают значительно больший пусковой момент по сравнению с ДПТ НВ.

3. Момент ДПТ ПВ не зависит от напряжения питающей сети, что особенно важно для электрической тяги, где в контактной сети могут возникать большие отклонения напряжения.

Основным недостатком ДПТ ПВ является неограниченное возрастание скорости при малых токах якоря и, как следствие, невозможность обеспечить режим генераторного торможения.

### ***1.5.3. Регулирование угловой скорости двигателя изменением напряжения на якоре***

Схема включения машины для этого способа регулирования приведена на рис. 20. Здесь необходим управляемый преобразователь (УП), с помощью которого изменяется напряжение  $U$  на якоре в функции задающего сигнала  $U_{зд}$ .

На рис. 20 показана машина с возбуждением от постоянных магнитов. В случае, когда машина имеет электромагнитное возбуждение, обмотка возбуждения подключается к независимому нерегулируемому преобразователю.

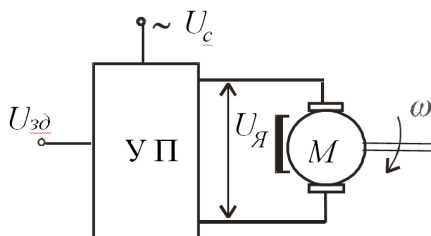


Рис. 20. Схема включения ДПТ НВ при регулировании скорости изменением напряжения на якоре

Регулирование  $\omega$  ведется при номинальном потоке возбуждения  $\Phi = \Phi_{ном}$ , и для анализа удобно использовать уравнения (1.11), (1.12):

$$\omega = K_{\theta} \cdot U - K_{\theta} \cdot I \cdot R; \quad (1.29)$$

$$\omega = K_{\theta} \cdot U - K_{\theta}^2 \cdot M \cdot R. \quad (1.30)$$

Первый член в этих уравнениях определяет угловую скорость двигателя на холостом ходу. Изменяя напряжение на якоре в сторону снижения, можно на холостом ходу получать скорости  $\omega_0 = \omega_B, \omega_1, \omega_2$  и т. д., т. е. регулировать скорость вниз от номинальной. Второй член в уравнениях электро-механической (1.29) и механической (1.30) характеристик определяет падение скорости  $\Delta\omega$  под нагрузкой. Характеристики при различных значениях напряжения на якоре располагаются взаимно параллельно (рис. 21).

Жесткость механической характеристики остается постоянной:

$$\beta_{II} = \frac{(k \cdot \Phi_n)^2}{r_{я}} = \beta_E.$$

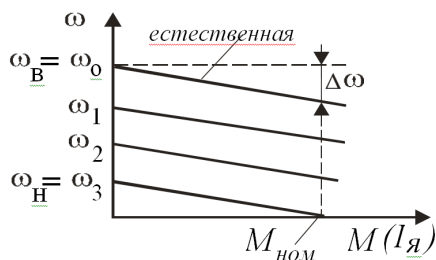


Рис. 21. Регулирование характеристик ДПТ НВ изменением напряжения якоря

Расчет искусственных характеристик в относительных единицах при изменении напряжения  $U$  следующий: необходимо рассчитать скорость холостого хода в относительных единицах и полученную величину отложить в масштабе при  $M=0$ . Искомое напряжение  $U$  определяется из формулы

$$\omega_0^* = \frac{\omega_0}{\omega_{0ном}} = \frac{U}{U_{ном}}.$$

При регулировании  $\omega$  изменением напряжения на якоре в разомкнутой системе (см. рис. 20) нижняя скорость  $\omega_H$  ограничена падением скорости от нагрузки. Так, если задать на холостом ходу угловую скорость  $\omega_H = \omega_3$ , то при номинальном моменте двигатель будет останавливаться. В замкнутых системах падение скорости может быть сведено до достаточно малых значений. В результате удастся получить диапазон регулирования скорости изменением напряжения на якоре  $D_u = 1000 \dots 10000$ .

Таким образом, **регулирование скорости изменением напряжения на якоре является основным способом регулирования  $\omega$  в широко регулируемых приводах.**

Для рассматриваемого способа регулирования длительно допустимый ток якоря и, соответственно, момент ограничены номинальными значениями  $I_{ном}$ ,  $M_{ном}$ , т.е. **регулирование  $\omega$  изменением напряжения на якоре осуществляется при**

**постоянном допустимом моменте.** Длительно допустимая мощность

$$P = M_{ном} \cdot \omega \quad (1.31)$$

при номинальной угловой скорости равна номинальной мощности  $P_{ном}$  и снижается по мере уменьшения  $\omega$ .

С учетом отмеченных особенностей этот способ регулирования угловой скорости целесообразно использовать для механизмов, момент сопротивления которых остается постоянным при изменении скорости.

**Регулирование угловой скорости ДПТ ПВ изменением подводимого напряжения** может быть осуществлено так же, как для ДПТ НВ, с помощью отдельного генератора или тиристорного преобразователя. Регулирование ведется уменьшением подводимого напряжения и приводит, как следует из уравнений (1.18), к снижению скорости. В транспортных механизмах часто два тяговых двигателя одинаковой мощности работают как многодвигательный электропривод (например, двухосный тяговый электропривод). При этом появляется дополнительная возможность ступенчатого изменения подводимого к двигателю напряжения за счет переключения двигателей с последовательного на параллельное включение. При последовательном включении на каждый двигатель приходится половина напряжения сети. Когда двигатели подключаются параллельно, каждый из них оказывается включенным на полное напряжение сети. Такое регулирование позволяет исключить нерациональную трату энергии.

Особенности регулирования скорости изменением напряжения на якоре и ослаблением магнитного потока дополнительно поясняет рис. 22. Регулирование угловой скорости изменением напряжения на якоре принято называть первой зоной регулирования, изменением магнитного потока – второй зоной.

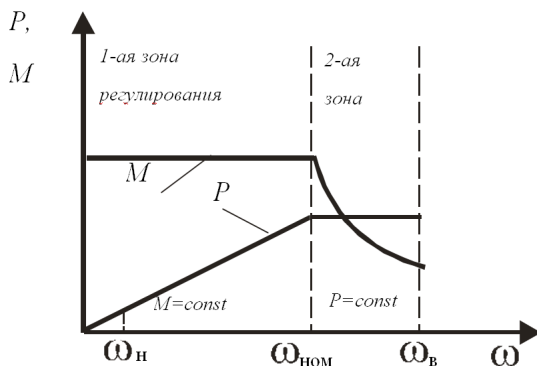


Рис. 22. Изменение характеристик ДПТ ПВ при регулировании скорости изменением напряжения на якоре

В первой зоне  $\omega$  регулируется вниз от номинальной, допустимый момент двигателя остается постоянным, а допустимая мощность снижается пропорционально уменьшению  $\omega$ .

Во второй зоне  $\omega$  регулируется вверх от номинальной, допустимая мощность остается постоянной, а допустимый момент снижается.

### 1.6. Тормозные режимы ДПТ НВ

Выше была рассмотрена работа ДПТ в двигательном режиме, когда электрическая энергия, потребляемая от сети, преобразуется в механическую. Характеристики, соответствующие двигательному режиму, располагаются в первом квадранте.

Для быстрой и точной остановки механизмов, при изменении направления вращения и т.д. в современных приводах широко используются тормозные режимы работы электрической машины.

Рассмотрим способы электрического торможения машины постоянного тока независимого возбуждения.

### *Генераторное торможение с отдачей энергии в сеть.*

Если скорость двигателя оказывается выше скорости идеального холостого хода  $\omega_0$  (рис. 23), то ЭДС машины становится больше напряжения сети. Ток якоря, как следует из уравнения

$$I = \frac{U - E}{R},$$

становится отрицательным. Следовательно, меняется и знак момента – момент становится тормозным. Машина работает в генераторном режиме: механическая энергия, поступающая со стороны вала машины, преобразуется в электрическую и отдается в сеть.

Характеристики генераторного режима с отдачей (рекуперацией) энергии являются продолжением характеристик двигательного режима и располагаются во втором квадранте.

Генераторный режим торможения используется, например, в приводах транспортных и подъемных механизмов при спуске грузов. Способ весьма экономичен, т.к. энергия отдается в сеть.

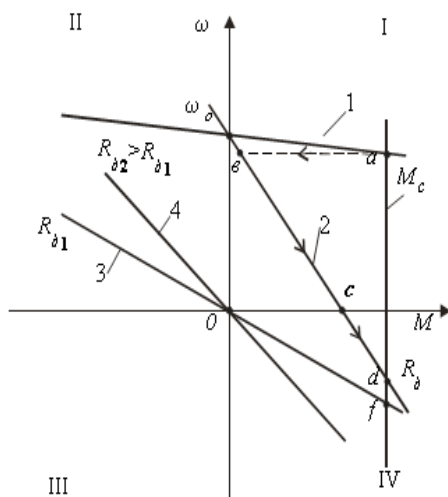


Рис. 23. Тормозные режимы ДПТ НВ

**Торможение противовключением.** Предположим, что электропривод грузоподъемного механизма работает на естественной характеристике 1 (см. рис. 23) с моментом статического сопротивления  $M_c$ . Установившийся режим соответствует точке  $a$  – происходит подъем груза. Допустим, что далее в цепь якоря вводят добавочное сопротивление  $R_d$ . В первый момент угловая скорость электропривода вследствие механической инерционности остается неизменной, и двигатель переходит на характеристику 2, точка  $b$ . Момент двигателя уменьшается, и скорость  $\omega$  начинает снижаться. В точке  $c$  скорость  $\omega$  становится равной нулю, а затем направление вращения двигателя изменяется. Новый установившийся режим наступает в точке  $d$ . При этом происходит спуск груза в режиме торможения противовключением (процесс перехода показан на рис. 23 стрелками). При изменении направления вращения меняется знак ЭДС двигателя, она складывается с питающим напряжением, и ток якоря определяется выражением

$$I = \frac{U + E}{R_a + R_d}.$$

Для ограничения тока якоря до приемлемого значения в этом режиме в цепь якоря необходимо вводить добавочное сопротивление  $R_d$ .

Таким образом, в режиме противовключения направление вращения машины противоположно заданному, машина работает в режиме генератора и создает тормозной момент. Энергия выделяется на  $R_d$ , следовательно, этот режим торможения малоэкономичен.

Режим торможения противовключением часто используется в реверсивных приводах для быстрого реверса двигателя или остановки. Если на якоре двигателя, работающего в условном направлении «Вперед», поменять полярность напряжения, то он перейдет в режим торможения проти-

вовключением. Начнется интенсивное затормаживание электропривода. Для ограничения тока в якорную цепь при этом приходится вводить добавочное сопротивление. Если необходимо снизить скорость двигателя до нуля, то при  $\omega$ , близкой к нулю, с помощью схемы управления якорь двигателя отключают от сети. В противном случае двигатель будет разгоняться до нового установившегося режима в направлении «Назад».

В принципе возможен реверс электродвигателя и за счет изменения полярности напряжения на обмотке возбуждения. Однако инерционность процессов в цепи обмотки возбуждения намного больше, чем в цепи якоря. Это замедляет процесс реверса. Кроме того, в переходном процессе магнитный поток снижается и переходит через нуль, что приводит к уменьшению тормозного момента.

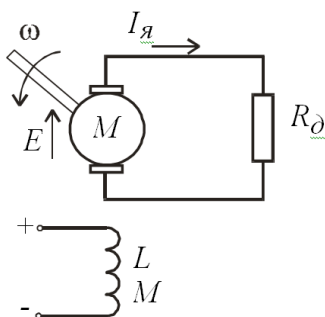


Рис. 24. Схема включения якорной цепи ДПТ в режиме динамического торможения

**Динамическое торможение.** Чтобы перевести машину в режим динамического торможения, якорь отключают от сети и замыкают на добавочное сопротивление  $R_d$ . Обмотка возбуждения  $LM$  должна оставаться подключенной к сети (рис. 24).

Машина в этом случае работает в режиме генератора. Механическая энергия, поступающая со стороны вала, преобразуется в электрическую и выделяется в виде тепла в сопротивлениях цепи якоря. Следовательно, режим неэкономичен. Уравнение механической характеристики несложно получить из (1.7), приняв  $U = 0$ :

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



Откуда для тормозного момента двигателя получим:

$$M = - \frac{k^2 \cdot \Phi^2 \cdot \omega}{R_a + R_d}.$$

Из этого соотношения следует: во-первых, момент становится тормозящим (отрицательным); во-вторых, момент возрастает с увеличением скорости  $\omega$ ; в-третьих, тормозной момент при отрицательном значении  $\omega$  тем больше, чем меньше  $R_d$  (см. характеристики 3 и 4 на рис. 23).

Динамическое торможение используется, в частности, в подъемных механизмах при спуске грузов. Например, при работе двигателя на характеристике 3 (см. рис. 23) и моменте  $M_c$ , создаваемом грузом, будет происходить спуск груза со скоростью, определяемой точкой  $f$ .

Кроме того, динамическое торможение широко используется для быстрой остановки двигателя. Для этого с помощью схемы управления якорь двигателя отключают от сети и замыкают на добавочное сопротивление. Эффективность торможения здесь ниже, чем в режиме противовключения, т.к. по мере снижения  $\omega$  уменьшается и тормозной момент.

### **Вопросы для самоподготовки**

1. Статические характеристики двигателя постоянного тока НВ.
2. Режимы работы двигателя постоянного тока НВ.
3. Номинальный режим работы ДПТ с НВ при допустимых значениях координат.
4. Реостатное регулирование переменных ДПТ НВ.
5. Регулирование скорости ДПТ НВ изменением магнитного потока.
6. Механические характеристики ДПТ НВ при изменении напряжения на якоре.
7. Особенности пуска ДПТ НВ.

## 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ДПТ СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Схема подключения ДПТ смешанного возбуждения (СВ) приведена на рис. 25. Машина имеет две обмотки возбуждения: последовательную ОВМ1 и независимую ОВМ2.

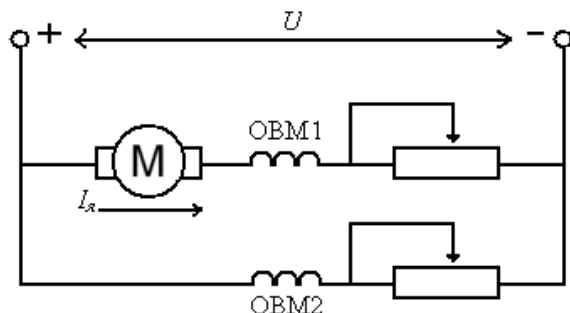


Рис. 25. Схема подключения ДПТ СВ

Уравнения для электромеханической и механической характеристик для ДПТ СВ аналогичны соответствующим уравнениям для ДПТ ПВ:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{I \cdot (R_{я} + R_{\partial})}{k \cdot \Phi}; \quad \omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{M \cdot (R_{я} + R_{\partial})}{k^2 \cdot \Phi^2}. \quad (1.32)$$

Причем здесь магнитный поток определяется как сумма магнитных потоков  $\Phi_1$  – обмотки ОВМ1 и  $\Phi_2$  – обмотки ОВМ2:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2.$$

Для ДПТ СВ, в отличие от ДПТ ПВ, скорость идеального холостого хода имеет конечное значение и определяется потоком  $\Phi_2$ :

$$\omega_0 = \frac{U}{k \cdot \Phi_2}.$$

Механическая характеристика двигателя смешанного возбуждения (кривая 3 на рис. 26) занимает промежуточное положение между характеристикой ДПТ НВ – кривая 1 и характеристикой ДПТ ПВ – кривая 2. Скорость ДПТ СВ при малых нагрузках изменяется значительно. А при больших нагрузках характеристика достаточно жесткая и близка к линейной, как у ДПТ НВ.

Для ДПТ СВ возможны те же тормозные режимы, что и для ДПТ НВ:

- 1) генераторное;
- 2) динамическое;
- 3) противовключением.

**Генераторное торможение** соответствует участку характеристики при скорости, большей  $\omega_0$ . При переходе в режим генераторного торможения ток в якоре и в обмотке последовательного возбуждения меняет свой знак, что может размагнитить машину. Поэтому при возрастании скорости до  $\omega_0$  ОВМ1 обычно шунтируют, и машина работает как ДПТ НВ (кривая 1).

**Для динамического торможения** якорь двигателя замыкают на добавочное сопротивление, а ОВМ1 отключают, чтобы избежать размагничивания. В результате машина работает как ДПТ НВ и имеет такие же тормозные характеристики (кривая 1).

**При торможении противовключением** в цепь якоря вводят добавочное сопротивление, ограничивающее ток якоря. Характеристика при этом становится более мягкой (кривая 4 на рис. 26). Машина переходит в режим противовключения при отрицательных значениях скорости.

Регулирование скорости ДПТ СВ, так же как ДПТ ПВ, может осуществляться:

- 1) изменением подводимого напряжения;
- 2) введением добавочного сопротивления в цепь якоря;

3) изменением магнитного потока последовательной обмотки возбуждения.

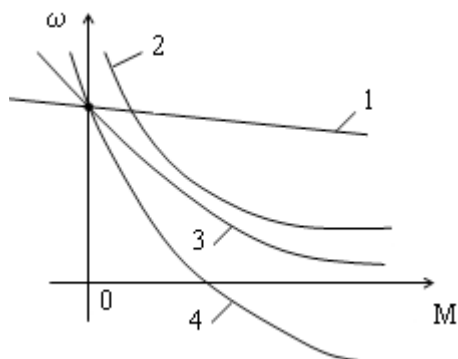


Рис. 26. Механические характеристики ДПТ СВ

Кроме того, для ДПТ СВ появляется дополнительная возможность регулирования скорости путем изменения магнитного потока независимой обмотки возбуждения.

Из рассмотренного следует, что ДПТ СВ имеют характеристики, весьма удобные для тягового электропривода. По сравнению с ДПТ ПВ машины со смешанным возбуждением позволяют обеспечить генераторное торможение и регулирование скорости магнитным потоком обмотки независимого возбуждения.

### Вопросы для самоподготовки

1. Естественная механическая и электромеханическая характеристика ДПТ СВ.

2. Механические характеристики ДПТ СВ при изменении напряжения на якоре.

3. Механические характеристики ДПТ СВ при генераторном и динамическом торможении, при торможении противовключением.

### 3. РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА В ЗАМКНУТЫХ СТРУКТУРАХ

Наличие в электрическом приводе управляемого преобразователя, питающего якорную цепь или цепь возбуждения, имеющего один или несколько входов и достаточно высокий коэффициент передачи, открывает широкие возможности формирования требуемых искусственных характеристик за счет *замыкания системы*, т.е. подачи на вход как *задающего сигнала*, так и *сигнала обратной связи* по координате, которая должна регулироваться.

Принцип действия замкнутых систем автоматического регулирования координаты рассмотрим на нескольких простейших примерах.

#### 3.1. Система УП–Д, замкнутая по скорости

Если жесткость характеристик в разомкнутой системе УП–Д оказывается недостаточной для какого-либо технологического процесса, она может быть повышена посредством замыкания системы по скорости, т.е. использования *отрицательной обратной связи* по скорости – рис. 27, а.

К разомкнутой системе добавлен измерительный орган – тахогенератор ТГ, сигнал которого  $E_{ТГ} = \gamma \cdot \omega$  сравнивается с задающим сигналом  $U'_z$ , а разность  $U'_z - \gamma \cdot \omega$  подается на вход преобразователя (отрицательная обратная связь по скорости). Благодаря этому ЭДС преобразователя теперь определяется не только заданием, но и фактической скоростью вращения.

Пусть привод работал в точке 1 (рис. 27, б), а затем момент сопротивления увеличился до значения  $M_{c2}$ . В разомкнутой схеме этому изменению соответствовала бы точка 2'.

В замкнутой системе уменьшение скорости повлечет за собой рост входного сигнала:

$$U_{BX} = U_3^* - \gamma \cdot \omega, \quad (1.33)$$

т.е.  $E_n$ , следовательно, при  $M_{c2}$  привод перейдет на характеристику, соответствующую  $E_{n2} > E_{n1}$  и будет работать в точке 2.

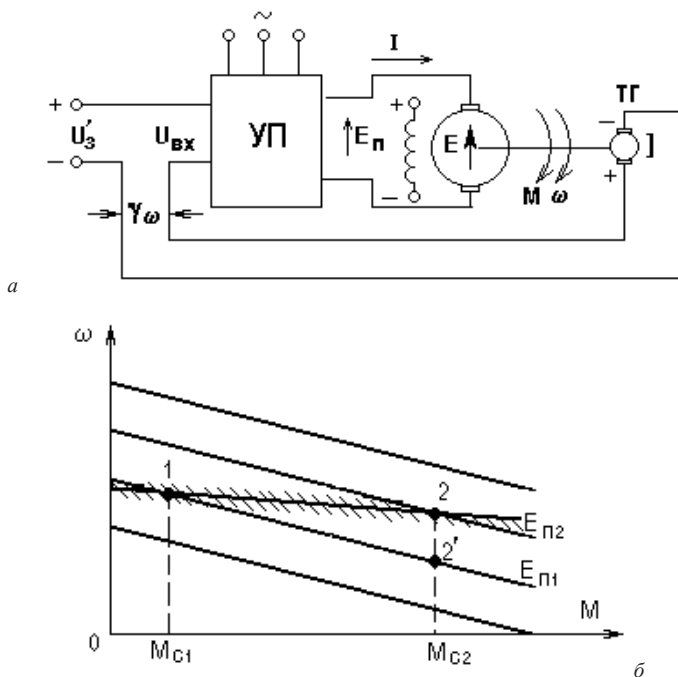


Рис. 27. Схема (а) и характеристики (б) электропривода постоянного тока, замкнутого по скорости

В рассматриваемой схеме  $\omega_2 < \omega_1$ , так как увеличение  $U_{BX}$ , а значит и  $E_n$  возможно лишь за счет некоторого уменьшения  $\omega$ . Такие системы называют статическими, в отличие от астатических систем, в которых  $\Delta\omega = 0$ .

Получим уравнение механической характеристики в замкнутой системе. Для этого в уравнения (1.29), (1.30) для ра-

замкнутой системы подставим уравнение замыкания системы (1.33) и получим после простых преобразований:

$$\omega = \frac{K_{\partial} \cdot U'_3}{(1 + K_{\partial} \cdot \gamma)} - \frac{K_{\partial}^2 \cdot M \cdot R}{(1 + K_{\partial} \cdot \gamma)}. \quad (1.34)$$

Приравнивая выражение для  $\omega_0$  в замкнутой и разомкнутой системах, будем иметь:

$$U'_3 = U_3 \cdot (1 + K_{\partial} \cdot \gamma),$$

т.е. для получения одной и той же  $\omega_0$  задающее напряжение в замкнутой схеме должно быть взято большим.

Сравнив выражение для  $\Delta\omega$ , получим:

$$\Delta\omega_3 = \frac{\Delta\omega_p}{(1 + K_{\partial} \cdot \gamma)},$$

т.е. перепад скорости при одинаковых нагрузках в замкнутой системе уменьшился в  $(1 + K_{\partial} \cdot \gamma)$  раз.

### **3.2. Система УП–Д с нелинейной обратной связью по моменту**

Пусть требуется ограничить момент, развиваемый двигателем, некоторой предельной величиной  $M_{пред}$ . В системе УП–Д эту задачу можно решить, снижая ЭДС преобразователя при достижении моментом величины  $M_{пред}$ . Как уже было показано, эта операция выполняется автоматически, если использовать соответствующую обратную связь. В данном случае целесообразно использовать обратную связь по моменту или по току, который ему пропорционален ( $\Phi = \text{const}$ ), причем эта связь должна вступать в действие лишь при достижении током некоторого заданного значения. Такие обратные связи называют нелинейными или связями с отсечкой. Простейшая схема системы УП–Д с отрицательной обратной связью по току с отсечкой показана на рис. 28, а.

На вход управляемого преобразователя при  $I < I_{пред}$  поступает лишь сигнал задания, поскольку сигнал обратной связи по току заперт вентилем В ( $I \cdot R_{oc} < U_{он}$ ). При достижении моментом величины  $M_{пред}$  отрицательная обратная связь по току начинает действовать, т. е.

$$U_{ex} = U_3 - a \cdot I,$$

благодаря чему снижается  $E_n$  и рост момента ограничивается.

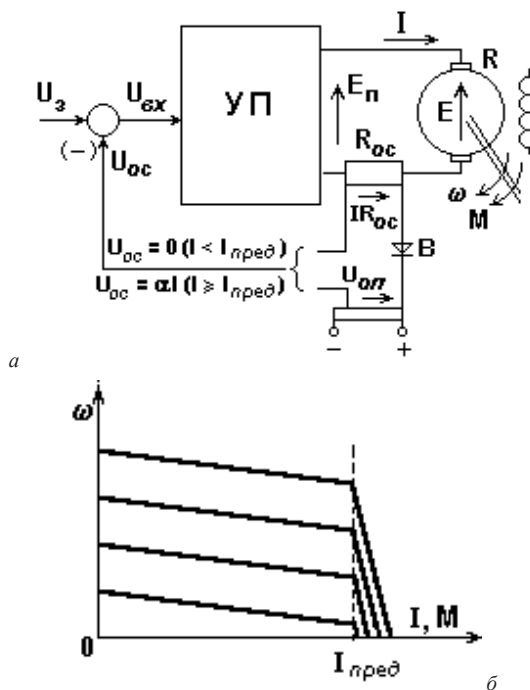


Рис. 28. Схема (а) и характеристики (б) электропривода постоянного тока с отрицательной обратной связью по току с отсечкой

Изменением  $U_3$  можно установить требуемую характеристику (см. рис. 28, б), изменением  $U_{он}$  — задать нужный предельный момент.



### 3.3. Замкнутая система «источник тока – двигатель»

При питании якорной цепи от неуправляемого источника тока ( $I = \text{const}$ ) электропривод, как отмечалось выше, обладает свойством управляемого по цепи возбуждения «источника момента», т.е. имеет в разомкнутой структуре вертикальные механические характеристики. Это обстоятельство очень удобно для построения замкнутых структур: исключение действия ЭДС вращения позволяет просто формировать любые характеристики посредством использования соответствующих обратных связей. Покажем это на простых примерах. В схеме на рис. 29, а отрицательная обратная связь по скорости включена на возбудитель, имеющий характеристику с ограничением.

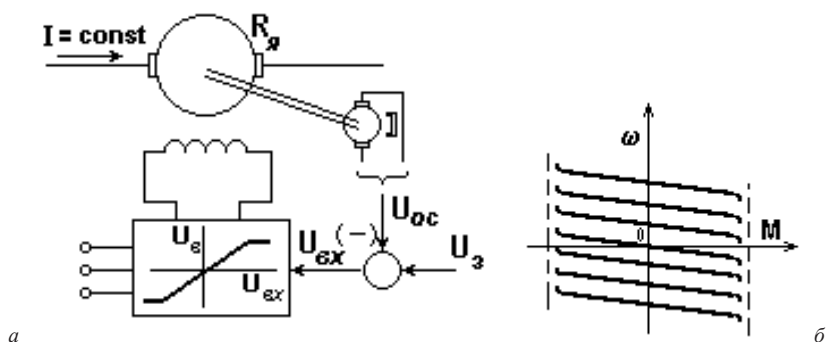


Рис. 29. Схема (а) и характеристики (б) системы «источник тока – двигатель», замкнутой по скорости

Напомним, что установленная мощность возбудителя много меньше мощности двигателя. В предположении, что характеристики  $\Phi(U_\epsilon)$  и  $U_\epsilon(U_{\epsilon x})$  на рабочих участках линейны, имеем:

$$M = U_{\epsilon x},$$

но, в свою очередь,

$$U_{\epsilon x} = U_z - U_{oc} = U_z - \gamma \cdot \omega.$$

Решив уравнение относительно  $\omega$ , получим:

$$\omega = \frac{U_3}{\gamma} - \frac{M}{\gamma}, \quad (3.23)$$

т.е. будем иметь семейство параллельных характеристик (см. рис. 29, б), ограниченных посредством характеристики возбудителя заданной величиной момента.

Использував *отрицательную обратную связь по напряжению* на якоре или в пренебрежении  $R_{\gamma}$  – по ЭДС вращения (рис. 30, а), получим:

$$U_{ax.} = U_3 - \alpha \cdot E = U_3 - \frac{\alpha \cdot M \cdot \omega}{I} = U_3 - \alpha' \cdot M \cdot \omega,$$

откуда, подставив в уравнение для момента, будем иметь:

$$\omega = \frac{U_3}{\alpha' \cdot M} - \frac{1}{\alpha'}.$$

Таким образом, в этой структуре механические характеристики имеют вид гипербол (см. рис. 30, б), т.е. стабилизируется мощность, развиваемая двигателем.

Приведенные примеры иллюстрируют богатые возможности получения искусственных механических характеристик любой требуемой формы посредством использования соответствующих обратных связей.

Следует отметить, что в системе «источник тока – двигатель» замыкание системы позволяет распространить экономный способ регулирования изменением магнитного потока на всю область  $\omega - M$ , т.е. сделать регулирование двухзонным, с расширенными функциональными возможностями. Однако следует также иметь в виду, что рассмотренные приемы относятся лишь к получению статических характеристик и не учитывают динамических особенностей системы, которые в ряде случаев могут по-

требовать дополнительных усилий для получения удовлетворительных результатов.

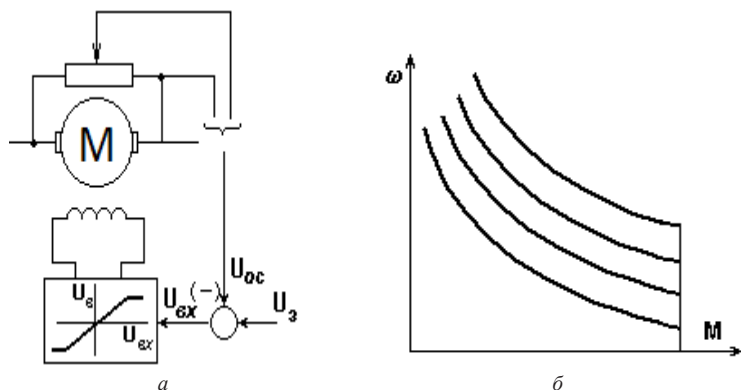


Рис. 30. Схема (а) и характеристики (б) системы «источник тока – двигатель», замкнутой по напряжению на якоре

### Вопросы для самоподготовки

Регулирование координат в замкнутой по скорости системе «управляемый преобразователь – двигатель» (УП–Д).

Регулирование координат в замкнутой системе УП–Д с нелинейной обратной связью по моменту.

Регулирование координат в замкнутой системе «источник тока – двигатель».

#### **4. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ В СИСТЕМЕ «УПРАВЛЯЕМЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ»**

В настоящее время в различных областях техники наиболее широко применяются регулируемые электроприводы с ДПТ с вентильными (тиристорными) управляемыми выпрямителями (УВ).

Такие приводы выпускаются промышленностью в виде блочных изделий – комплектных тиристорных электроприводов. В однозонных приводах выход УВ подключается к якору двигателя, и регулирование скорости осуществляется за счет изменения напряжения на якоре ДПТ. В двухзонных ЭП используются два УВ, один работает на якорь, а второй – на обмотку возбуждения, и регулирование угловой скорости осуществляется как изменением напряжения на якоре, так и за счет изменения потока возбуждения (напряжения на обмотке возбуждения).

Остановимся на особенностях регулирования напряжения на якоре и обмотке возбуждения ДПТ НВ с помощью УВ.

Основными приборами, применяемыми в управляемых выпрямителях, являются полупроводниковые вентили – диоды и тиристоры. Общим свойством этих приборов является то, что они могут находиться в двух состояниях – открытом и закрытом. В открытом состоянии прямое падение напряжения на вентильях в  $10^2$ – $10^3$  раз меньше, чем напряжения, выделяемые на других элементах схемы (например, среднее значение прямого падения напряжения на тиристоре меньше 1 В). Ток, протекающий через вентили в закрытом состоянии, в  $10^3$ – $10^4$  раз меньше тока в открытом состоянии. Все это позволяет при анализе электромагнитных процессов считать полупроводниковые вентили идеальными ключами

и пренебрегать их прямыми падениями напряжения и обратными токами.

Полупроводниковый диод находится в открытом состоянии при прямом напряжении на его аноде (положительном относительно катода) и в закрытом – при отрицательном.

Для переключения тиристора в открытое состояние необходимо подать на его управляющий электрод (относительно катода) положительный управляющий импульс при прямом (положительном относительно катода) напряжении на аноде. Длительность управляющего импульса должна быть такой, чтобы за время его действия ток анода тиристора стал больше тока выключения. Для запираания тиристора необходимо уменьшить ток анода до величины тока выключения или приложить к его аноду обратное (отрицательное относительно катода) напряжение. Ток запираания тиристорov в  $10^3$ – $10^4$  раз меньше его прямого тока, поэтому при анализе работы схем можно считать, что тиристор закрывается при нулевом значении тока анода.

#### **4.1. Фазовый способ регулирования выпрямленного напряжения.**

##### **Однофазный однополупериодный УВ**

Принцип работы УВ поясним на примере простейшей однофазной однополупериодной схемы УВ (рис. 31), работающей на активную нагрузку  $R$ . В этой схеме  $V_S$  – тиристор, СИФУ – система импульсно-фазового управления. Тиристор служит для выпрямления и регулирования выпрямленного напряжения на нагрузке. СИФУ предназначена для управления моментом отпираания тиристора.

Фазовый способ регулирования основан на управлении моментом отпираания тиристорov, включенных последовательно между источником переменного напряжения и нагрузкой.

На вход силовой части схемы подается переменное сетевое напряжение  $u_c$ . На управляющий электрод тиристора подаются управляющие импульсы  $u_y$ , фаза которых относительно сетевого напряжения определяется величиной входного сигнала  $u_{ex}$  СИФУ, а частота равна частоте питающей сети  $f_c$ .

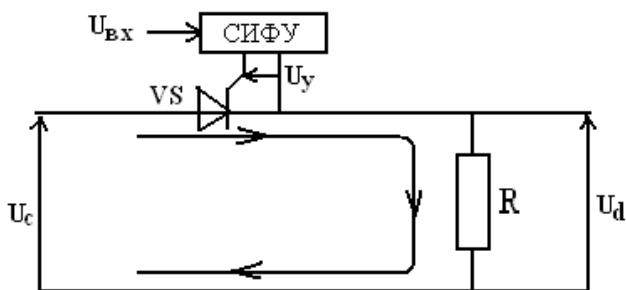


Рис. 31. Однофазная однополупериодная схема УВ, работающего на нагрузку  $R$

Диаграммы, поясняющие работу схемы, приведены на рис. 32. На первой диаграмме приведена зависимость сетевого напряжения  $u_c$  от угла  $\nu$  (здесь и далее  $\nu = \omega \cdot t$ , рад;  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_c$  – угловая частота, рад/с;  $f_c$  – частота сетевого напряжения, Гц;  $t$  – время, с).

Напряжение  $u_c$  изменяется по синусоидальному закону с периодом  $2\pi$ :

$$u_c = U_m \cdot \sin \nu,$$

где  $U_m$  – амплитудное значение сетевого напряжения ( $U_m = \sqrt{2} \cdot U_c$ ;  $U_c$  – действующее значение сетевого напряжения).

На третьей диаграмме приведены управляющие импульсы  $u_y$  прямоугольной формы. Амплитуда и длительность импульсов выбираются исходя из условия надежного отпирания тиристора. Импульсы формируются СИФУ при положительном напряжении на аноде тиристора (относительно

катода) и сдвинуты относительно сетевого напряжения на *угол регулирования  $\alpha$  (угол запаздывания)*. Величина угла регулирования зависит от входного сигнала  $u_{\text{вх}}$  СИФУ.

На пятой и седьмой диаграммах приведены зависимости мгновенных значений напряжения на нагрузке –  $u_d(v)$  и тока нагрузки –  $i(v)$ .

Рассмотрим работу схемы на отдельных интервалах.

*Интервал  $0 \leq v < \alpha$ .* На этом интервале тиристор закрыт, ток тиристора  $i(v)$  и напряжение на нагрузке  $u_d(v)$  практически равны нулю.

При  $v = \alpha$  на управляющий электрод тиристора подается управляющий импульс  $u_y$  и тиристор открывается. При этом ток анода тиристора  $i$  практически мгновенно возрастает и оказывается больше тока выключения, поэтому после окончания управляющего импульса тиристор удерживается в открытом состоянии.

*Интервал  $\alpha \leq v < \pi$ .* На этом интервале тиристор открыт, напряжение на нагрузке практически равно сетевому напряжению –  $u_d(v) \approx u_c(v)$ , а ток нагрузки –  $i(v) = u_d/R_n$ .

*Интервал  $\pi \leq v \leq 2\pi + \alpha$ .* На этом интервале тиристор закрыт, а состояние схемы будет таким же, как и на интервале  $0 \leq v < \alpha$ .

На интервалах  $2\pi \leq v \leq 4\pi$ ,  $4\pi \leq v \leq 6\pi$ , ...,  $2i\pi \leq v \leq 2(i+1)\pi$ , где  $i = 0, 1, 2, \dots$ , работа схемы идентична работе на интервале  $0 \leq v \leq 2\pi$ .

На рис. 33 приведены диаграммы для случая, когда угол регулирования  $\alpha$  имеет большую величину по сравнению с рис. 32. Как видно из приведенных на рис. 32–33 диаграмм, напряжение на нагрузке имеет вид положительных импульсов, частота которых равна частоте сетевого напряжения.

Мгновенное значение напряжения на нагрузке  $u_d(\alpha)$  равно сетевому напряжению  $u_c(\alpha)$  на интервалах, когда тиристор открыт, и равно нулю на интервалах, когда тиристор закрыт.

При работе преобразователя на обмотку возбуждения или якорь ДПТ в качестве выходной переменной УВ рассматривают среднее (за период) значение выпрямленного напряжения  $U_{cp}$  (постоянную составляющую выпрямленного напряжения).

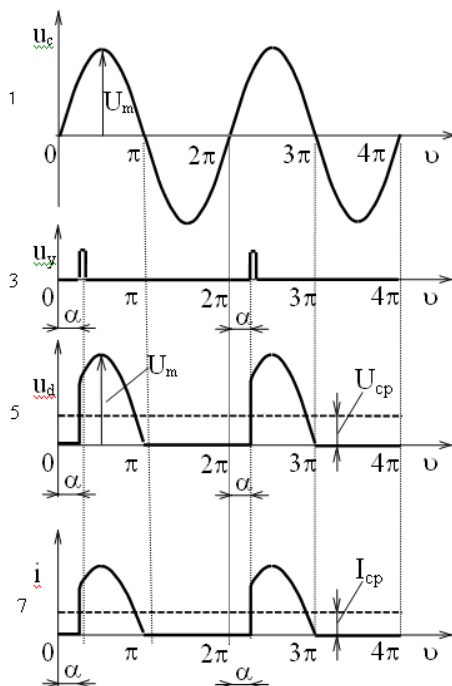


Рис. 32. Диаграммы, поясняющие работу УВ для  $\alpha_1$

Очевидно, что значение  $U_{cp}$  зависит от угла регулирования  $\alpha$ .

Величина среднего значения напряжения на нагрузке находится из выражения

$$\begin{aligned}
 U_{cp} &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \nu \, d\nu = \frac{U_m}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha) = \\
 &= \frac{\sqrt{2} \cdot U_c}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha) = U_{cp0} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2},
 \end{aligned}$$



где  $U_{cp0} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_c}{\pi} = 0,45 \cdot U_c$  – среднее значение выпрямленного напряжения при угле  $\alpha = 0$ .

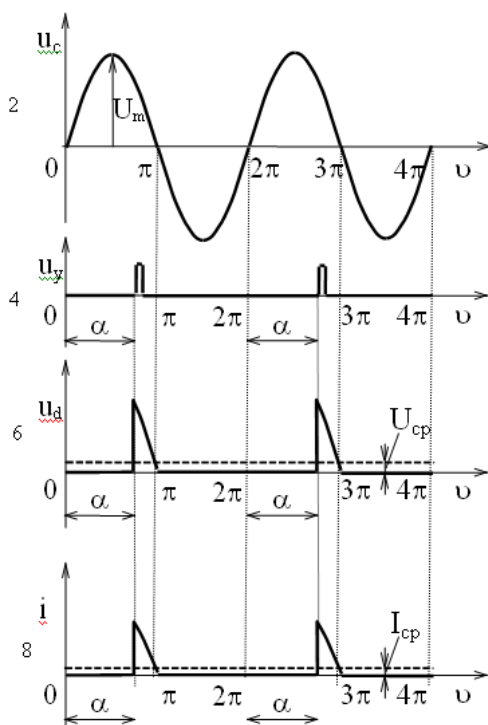


Рис. 33. Диаграммы, поясняющие работу УВ для  $\alpha_2 > \alpha_1$

Полученное выражение описывает зависимость среднего значения напряжения на нагрузке от угла регулирования  $\alpha - U_{cp}(\alpha)$  и представляет собой регулировочную характеристику. Из выражения видно, что при изменении угла  $\alpha$  в пределах  $0 \leq \alpha \leq \pi$  среднее значение напряжения на нагрузке  $U_{cp}(\alpha)$  изменяется в пределах  $0,45 \cdot U_c \geq U_{cp} \geq 0$  и уменьшается с увеличением угла регулирования. Данное наблюдение иллюстрируется значениями  $U_{cp}$  на рис. 32–33.

При активной нагрузке выходное напряжение УВ равно падению напряжения на сопротивлении нагрузки:  $u(v) = Ri(v)$ . Поэтому среднее значение тока и среднее значение напряжения связаны соотношением

$$I_{cp} = \frac{U_{cp}}{R}.$$

## 4.2. Трехфазные схемы УВ

Силовая часть трехфазной нулевой схемы УВ приведена на рис. 34, а.

Трехфазный трансформатор *TV1* служит для согласования напряжения на якоре двигателя с сетевым напряжением, а также для гальванической развязки цепи якоря электродвигателя с сетью. Схема содержит тиристоры *VS1*, *VS2*, *VS3*.

Вторичные ЭДС различных фаз трансформатора, поступающие на тиристоры, сдвинуты на  $120^\circ$ , соответственно и управляющие импульсы, подаваемые на управляющие электроды тириستоров с выхода СИФУ, сдвинуты на  $120^\circ$ . При работе схемы в режиме непрерывного тока ток в каждом из тиристоров протекает в течение  $1/3$  периода, т.е. в течение  $1/3$  периода якорь двигателя через один из тиристоров подключается к синусоидальной переменной ЭДС соответствующей фазы.

За период изменения напряжения в сети переменного тока якоря двигатель поочередно подключается к трем различным фазам. Регулируя с помощью СИФУ угол  $\alpha$ , можно, так же как в однофазной схеме, изменять среднее значение напряжения на якоре двигателя.

Силовая часть трехфазной мостовой схемы УВ приведена на рис. 34, б. Она содержит 6 тиристоров *VS1* – *VS6*. Особенностью этой схемы является то, что управляющие импульсы, подаваемые на тиристоры *VS4* – *VS6*,

сдвинуты на  $180^\circ$  по отношению к импульсам на тиристорах  $VS1 - VS3$ .

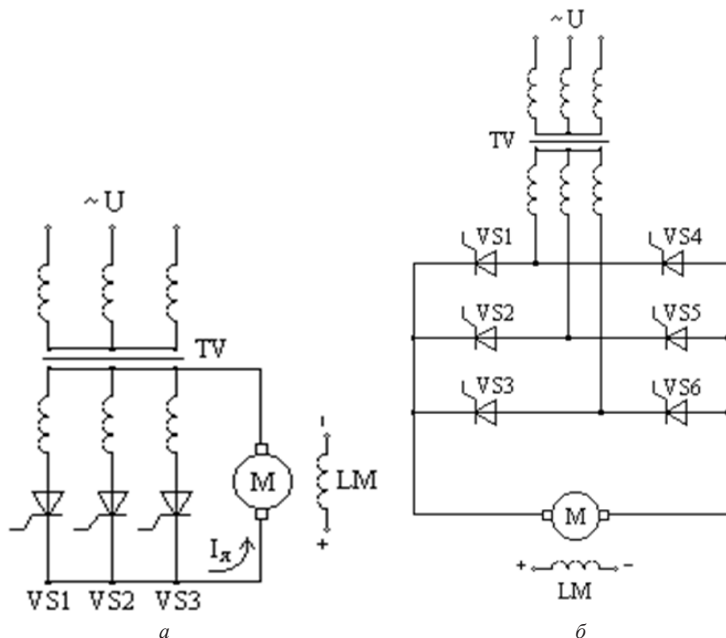


Рис. 34. Силовая часть схемы УВ:

а – трехфазной нулевой, б – трехфазной мостовой

Для того, чтобы обеспечить протекание тока в нагрузке, нужно открыть два тиристора одновременно – один в анодной и один в катодной группе вентилей. Одновременность открытия тиристоров анодной и катодной групп обеспечивается тем, что через  $60^\circ$  после основного управляющего импульса на каждый из тиристоров подается дополнительный управляющий импульс.

При работе схемы в режиме непрерывного тока каждый из тиристоров проводит ток в течение  $1/3$  периода, а напряжение на нагрузке удобно рассматривать как результат взаимодействия двух последовательно включенных нулевых схем выпрямления. Регулирование среднего значения на-

пряжения на якоре двигателя, как и в предыдущих схемах, осуществляется изменением угла управления  $\alpha$ .

Как показано выше, напряжение на выходе УВ имеет форму импульсов. Причем пульсации напряжения и, как следует, пульсации тока якоря наиболее значительны в однофазных схемах и существенно снижаются в трехфазных схемах, особенно мостовых. Обычно однофазные схемы УВ применяются при мощности нагрузки до единиц киловатт. Трехфазная нулевая схема в основном используется в диапазоне мощности от единицы до нескольких десятков киловатт. При большой мощности в основном применяется трехфазная мостовая схема.

На рис. 35 показаны механические характеристики электропривода в системе «управляемый выпрямитель — двигатель».

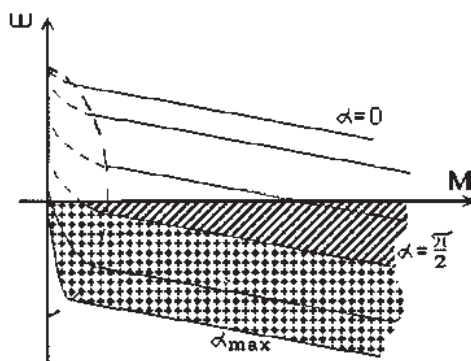


Рис. 35. Механические характеристики электропривода в системе «управляемый выпрямитель — двигатель»

Необходимо учитывать, что УВ, как потребитель энергии, забирает из сети несинусоидальный ток и, следовательно, является источником тока высших гармоник.

Высшие гармонические составляющие кривой тока искажают форму напряжения в сети и неблагоприятно влияют

на работу конденсаторных установок, синхронных машин и самих УВ.

Важнейшим энергетическим показателем приемников электроэнергии является коэффициент мощности, характеризующий сдвиг по фазе тока в цепи.

В тиристорных преобразователях кривая тока отстает от кривой напряжения, причем с увеличением угла  $\alpha$  фазовый сдвиг увеличивается.

Иными словами, УВ потребляет из сети не только активную, но и реактивную мощность. Причем реактивная мощность увеличивается при возрастании угла  $\alpha$ . Эти обстоятельства требуют принятия специальных мер по повышению коэффициента мощности.

### **4.3. Реверсивные электроприводы с УВ**

Изменить направления вращения ДПТ НВ (осуществить реверс двигателя) можно за счет изменения полярности напряжения или на обмотке возбуждения, или на якоре двигателя. Первый способ, несмотря на его кажущуюся привлекательность – малую мощность в цепи возбуждения, используется редко. Это связано с тем, что при изменении полярности напряжения на обмотке возбуждения ток в ней снижается до нуля, а затем меняет свой знак. При этом момент двигателя, пропорциональный магнитному потоку обмотки возбуждения, также снижается, достигает нулевого значения, а затем меняет свой знак. Снижение момента затягивает процесс реверса.

В современных быстродействующих приводах реверс осуществляют изменением полярности напряжения на якоре. Такие приводы содержат два комплекта управляемых преобразователей (рис. 35): комплект, условно обозначенный «Вперед» – «В», комплект «Назад» – «Н». При разделенном управлении в каждый момент времени работают вентили только одного комплекта.

Предположим, что в исходном состоянии работает комплект «В». Полярность напряжения преобразователя и направления ЭДС двигателя  $E$  и тока  $I_{я}$  якоря показаны на рис. 36. Если же включен комплект «Н», то полярность напряжения на якоре будет противоположной, и двигатель будет вращаться в противоположную сторону.

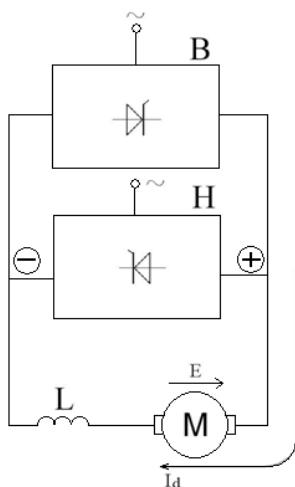


Рис. 36. Схема реверсивного электрического привода с ДПТ

В реверсивных приводах при снижении скорости и реверсе двигателя реализуется инверторный режим работы выпрямителя. Поясним это более подробно.

Предположим, что в исходном состоянии работает комплект «В» и частоту вращения двигателя необходимо уменьшить. Для этого уменьшают величину задающего сигнала в системе ЭП. В результате напряжение на выходе комплекта «В» начинает резко снижаться и, соответственно, уменьшается ток  $I_{я}$ . В некоторый момент он становится равным нулю. После этого система управления УВ выдает команду на включение вентилей комплекта «Н».

Причем комплект «Н» переводится в инверторный режим (полярность на его выходе для инверторного режима показана в окружностях).

При этом ток якоря меняет знак и протекает из цепи постоянного тока в цепь переменного тока. Величина ЭДС комплекта «Н» устанавливается такой, чтобы ток якоря

$$I_{я} = \frac{E - U_{cp}}{R_{я}}$$

не превышал допустимого тока двигателя (тока отсечки). Так организуется режим генераторного торможения двигателя с отдачей энергии в сеть переменного тока.

Следует подчеркнуть, что включение комплекта «Н» в выпрямительном режиме в рассматриваемой ситуации недопустимо. Действительно, при таком включении ЭДС двигателя будет действовать согласно с напряжением УВ, и ток якоря будет недопустимо большим:

$$I_{я} = \frac{E + U_{cp}}{R_{я}}.$$

При работе же комплекта «Н» в инверторном режиме напряжение на выходе УВ ограничивает ток якоря.

При подходе двигателя к заданной пониженной скорости ток якоря уменьшается, комплект «Н» отключается и вновь вступает в работу комплект «В».

Аналогично протекает процесс реверса двигателя. Только в этом случае комплект «Н» остается постоянно включенным, угол  $\alpha$  постепенно изменяется в сторону уменьшения. При  $\alpha < 90^\circ$  комплект Н переходит в выпрямительный режим, полярность напряжения на якоре двигателя меняется, и двигатель начинает вращаться в противоположную сторону.

Управление комплектами «В» и «Н» осуществляется автоматически соответствующими блоками тиристорного электрического привода.

### **Вопросы для самоподготовки**

1. Импульсное регулирование переменных ДПТ с НВ.
2. Однофазный однополупериодный УВ.
3. Фазовый способ регулирования выпрямленного напряжения.
4. Трехфазные схемы УВ.
5. Реверсивные электроприводы с УВ.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ильинский Н. Ф.* Основы электропривода: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 224 с.
2. *Москаленко В. В.* Электрический привод: учеб. для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Изд. центр «Академия», 2007. – 368 с.
3. *Алексеев В. В.* Электрический привод: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / В. В. Алексеев, А. Е. Козярук. – М.: Изд. центр «Академия», 2008. – 200 с.
4. *Епифанов А. П.* Электропривод в сельском хозяйстве: учеб. для вузов. – СПб.: Лань, 2010. – 224 с.
5. *Драчев Г. И.* Теория электропривода. Ч. 1: учеб. пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 209 с.
6. *Ключев В. И.* Теория электропривода: учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 697 с.
7. *Дюбей Гонал К.* Основные принципы устройства электроприводов. – М.: Техносфера, 2009. – 480 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ТЕОРИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	4
1.1. Уравнение электромеханической характеристики ДПТ с независимым возбуждением .....	5
1.1.1. Графическое изображение электромеханической характеристики .....	6
1.1.2. Анализ уравнений электромеханической харак- теристики .....	7
1.1.3. Уравнение механической характеристики ДПТ с НВ .....	9
1.1.4. Графическое изображение механической харак- теристики .....	10
1.2. Характеристики и режимы ДПТ при последова- тельном возбуждении .....	11
1.3. Зоны допустимых нагрузок .....	17
1.4. Энергетические режимы работы двигателя .....	18
1.5. Регулирование угловой скорости ДПТ .....	22
1.5.1. Регулирование угловой скорости ДПТ незави- симого и последовательного возбуждения введе- нием добавочных сопротивлений в цепь якоря ...	22
1.5.2. Регулирование скорости вращения ДПТ неза- висимого и последовательного возбуждения изменением магнитного потока .....	30
1.5.3. Регулирование угловой скорости двигателя изменением напряжения на якоре .....	33
1.6. Тормозные режимы ДПТ НВ .....	37
2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕГУ- ЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ДПТ СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ .....	42

3. РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА В ЗАМКНУТЫХ СТРУКТУРАХ .....	45
3.1. Система УП–Д, замкнутая по скорости .....	45
3.2. Система УП–Д с нелинейной обратной связью по моменту.....	47
3.3. Замкнутая система «источник тока – двигатель»....	49
4. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ В СИСТЕМЕ «УПРАВЛЯЕМЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ» .....	52
4.1. Фазовый способ регулирования выпрямленного напряжения. Однофазный однополупериодный УВ.....	53
4.2. Трехфазные схемы УВ .....	58
4.3. Реверсивные электроприводы с УВ.....	61
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	65

Составители:  
Кузнецов Андрей Юрьевич  
Зонов Павел Владимирович

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД  
И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ АПК

Часть 2

РЕГУЛИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА

Учебное пособие

Редактор Т. К. Коробкова  
Компьютерная верстка В. Н. Зенина  
Подписано в печать \_\_\_\_\_ 2017 г. Формат 60 × 84/16  
Объем 3,2 уч.-изд. л., 3,25 усл. печ. л. Тираж 10 экз.  
Изд. № \_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_.

---

Отпечатано в Издательском центре «Золотой колос»  
Новосибирского государственного аграрного университета  
630039, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160, каб. 106.  
Тел./факс (383) 267-09-10. E-mail: 2134539@mail.ru