

А.М. АБАКУМОВ, П.В. ТУЛУПОВ, Ю.А. ЧАБАНОВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Часть 1

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Учебное пособие

Самара
Самарский государственный технический университет
2010



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

А.М. АБАКУМОВ, П.В. ТУЛУПОВ, Ю.А. ЧАБАНОВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Часть 1

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Учебное пособие

Самара
Самарский государственный технический университет
2010

Печатается по решению редакционно-издательского совета СамГТУ

УДК 621.313.13.133.3: 62.83

А 13

Абакумов А.М.

А 13 Электрический привод. Ч.1. Электроприводы постоянного тока: учеб. пособ. / *А.М. Абакумов., П.В. Тулупов, Ю.А. Чабанов.* – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 123 с.: ил.

Приведены общие сведения об автоматизированном электроприводе. Проанализированы механические характеристики двигателей постоянного тока независимого и последовательного возбуждения. Рассмотрены системы автоматического управления током якоря и угловой скоростью машин постоянного тока.

Рассчитано на бакалавров, проходящих обучение по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Дисциплина «Электрический привод».

Рецензенты: Л.С. Зимин,
В.П. Курган

УДК 621.313.13.133.3: 62.83

А 13

© А.М. Абакумов, П.В. Тулупов,
Ю.А. Чабанов, 2010

© Самарский государственный
технический университет, 2010

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое пособие предназначено для изучения теоретической части дисциплины «Электрический привод» студентами очного и заочного факультетов, обучающихся по специальностям 140601, 140604, 140607, 140211.

Целесообразность такого издания определяется тем, что существующие учебники и учебные пособия адресованы, как правило, студентам профильных специальностей и рассчитаны на большой объем часов учебных занятий.

Авторы попытались в сжатой форме изложить основные идеи и методы теории и практики электропривода. Основное внимание уделено анализу механических, электромеханических характеристик электрических машин постоянного тока, пояснению принципов построения и работы современных автоматизированных электроприводов с машинами постоянного тока.

Пособие содержит контрольные вопросы, что должно облегчить студентам задачу самоконтроля по усвоению материала.

В связи с ограниченным объемом издания оно не претендует на полный охват всех вопросов рассматриваемой дисциплины и не исключает необходимости работы с дополнительной литературой.

ВВЕДЕНИЕ

С объектами, приводимыми в движение электрическими машинами, мы постоянно сталкиваемся не только в сфере промышленности и транспорта, но и в бытовой сфере. В нашу жизнь прочно вошли такие устройства с электроприводом, как стиральная машина, вентилятор, лифт, кондиционер, кофемолка, пылесос и т.д.

В области промышленности и на электрифицированном транспорте электродвигатели приводят в движение станки, грузоподъемные механизмы, компрессоры, конвейеры, экскаваторы, вагоны метрополитена, трамвая, троллейбуса и т.д. Этот перечень вы без труда можете продолжить сами, и он займет не один десяток страниц.

Можно констатировать, что в настоящее время основным средством приведения в движение рабочих машин является электрический двигатель и основным типом привода служит электрический привод, или сокращенно электропривод (ЭП), потребляющий около половины всей вырабатываемой электроэнергии.

Электрические машины, электромеханические преобразователи и электропривод прошли достаточно долгий путь развития и совершенствования.

Первый в истории техники электропривод был создан академиком Б.С. Якоби в Петербурге в 1834-1838 гг. Этот электропривод с машиной постоянного тока, питаемой от гальванических батарей, использовался для приведения в движение катера на реке Неве.

Примерно в 1890 г. выдающийся русский инженер М.О. Доливо-Добровольский разработал первые образцы трехфазных машин переменного тока.

Тяговый электропривод на железных дорогах впервые был использован в 1876 г. в Петербурге инженером А. Пироцким, а в 1881 г. в Германии была электрифицирована трамвайная линия.

В 1895 г. в США была осуществлена электрификация пригородной железной дороги. Во всех системах электрификации железных дорог вначале использовались двигатели постоянного тока.

Первый опыт использования электрических машин переменного тока для железнодорожного транспорта относится к 1890 г. (Италия).

В промышленности на первых этапах развития техники электропривода использовался преимущественно групповой электропривод, когда исполнительные органы нескольких рабочих машин приводились в движение одним двигателем. При этом применялись сложные трансмиссии и терялось одно из важнейших достоинств электропривода - простота управления потоками энергии и движением исполнительных органов.

Развитие техники электропривода характеризуется постепенным приближением места, где электрическая энергия преобразуется в механическую, к исполнительным органам машин. В настоящее время, как правило, каждый исполнительный орган рабочей машины приво-

дится в движение отдельным, индивидуальным приводом. Использование индивидуального привода создает условия для автоматизации, позволяет расширить технологические возможности установок, повысить их производительность и качество управления технологическими процессами.

В основе действия электрических машин лежит явление электромагнитной индукции и свойства магнитного поля создавать механическое взаимодействие с электрическим током. Эти силы называют электромагнитными.

Явление электромагнитной индукции послужило основой для многочисленных инженерных разработок по созданию электрических двигателей, генераторов, трансформаторов, электромеханических преобразователей.

Электромеханическое преобразование энергии не может осуществляться с КПД, равным 100%. Тем не менее, созданы электрические машины с КПД, равным 99%, а в трансформаторах достигнут КПД, равный 99,8%. Такие высокие показатели являются прерогативой электромеханики.

На современном уровне развития техники электропривод выполняется в виде *автоматизированного электропривода* (АЭП).

Особенность АЭП состоит в том, что переработка информации, необходимая для управления потоками энергии, осуществляется автоматически. Благодаря применению АЭП человек освобождается не только от тяжелого физического труда, но с него снимаются также функции переработки соответствующей информации. В результате этого достигается улучшение условий труда людей, занятых в производственном процессе, а также значительный рост эффективности процесса производства.

Развитие и совершенствование современного АЭП определяется, прежде всего, прогрессивными решениями в области новых типов электромеханических преобразователей и совершенствованием традиционных электрических машин, развитием силовой преобразовательной техники и электроники, новыми достижениями в теории автоматического управления.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

1.1. ПОНЯТИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Основные элементы АЭП, приводящего в движение исполнительный орган рабочей машины (РМ), показаны на рис. 1.1: МПУ - механическое передаточное устройство; ЭДУ - электродвигательное устройство; СПУ - силовое преобразовательное устройство; УУ - управляющее устройство; ЗУ - задающее устройство.

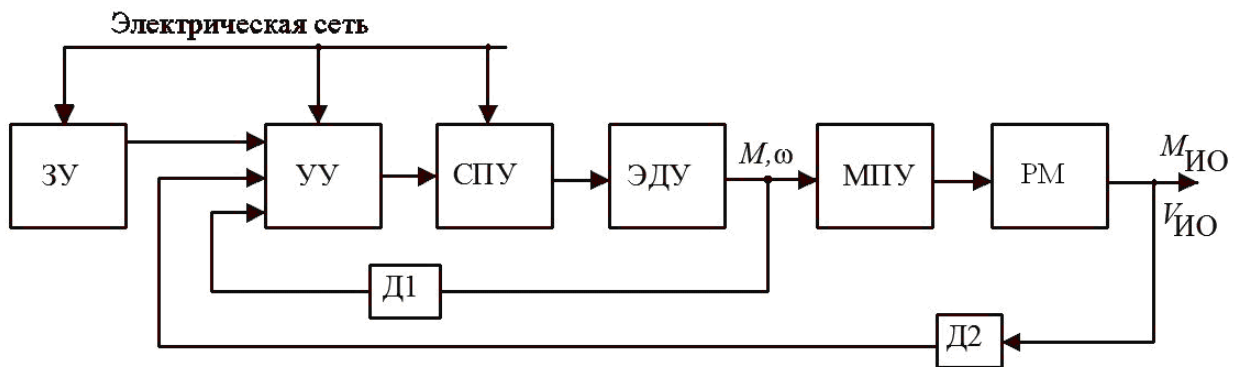


Рис. 1.1

Дадим более подробную характеристику перечисленных элементов АЭП.

Под **рабочими машинами** понимают механические устройства, осуществляющие изменение формы, свойств, состояния и положения предметов труда или сбор, переработку и использование информации. Примерами рабочих машин для изменения формы предметов труда могут служить металлообрабатывающие станки, прессы, прокатные станы металлургического производства и др. Изменение свойств и состояния предметов труда осуществляется, например, с помощью установок для закалки, нанесения покрытий, химических установок, компрессоров и др. Для изменения местоположения объектов используются подъемные краны, лифты, эскалаторы, конвейеры, электрифицированные транспортные средства и др. Учитывая столь широкую область применения АЭП, можно сказать, что он охватывает практически все области современной техники.

Электродвигательное устройство является в электроприводе основным элементом, преобразующим механическую энергию в электрическую. В качестве ЭДУ используются асинхронные двигатели, синхронные двигатели, двигатели постоянного тока независимого, последовательного и смешанного возбуждения, шаговые, вентильные двигатели и др.

Механическая энергия от ЭДУ передается к исполнительным органам РМ через *механическое передаточное устройство* (механический редуктор, цепная передача, ходовая пара «винт-гайка» и т.д.). МПУ позволяет при необходимости преобразовать выходные переменные ЭДУ в требуемые для приведения в движения РМ. Например, преобразовать вращательное движение вала двигателя в линейное перемещение суппорта токарного станка, понизить с помощью редуктора частоту вращения вала двигателя, обеспечить необходимую величину момента или усилия на исполнительном органе РМ.

Для создания регулирующего воздействия на ЭДУ используется *силовое преобразовательное устройство*. На вход СПУ поступают сигналы от *управляющего устройства*.

Желаемые значения регулируемых переменных задаются с помощью *задающего устройства*.

Современные АЭП при жестких требованиях к качеству регулирования выходных переменных выполняются в виде замкнутых систем автоматического управления. При этом на входы УУ кроме сигналов задания поступают сигналы обратной связи, формируемые датчиками обратных связей Д1, Д2 и т.д., например сигналы, пропорциональные частоте вращения двигателя ω , моменту M на валу двигателя, моменту $M_{ио}$ и скорости $V_{ио}$ исполнительного органа и др. В замкнутой системе УУ формирует командные сигналы на СПУ в функции сигналов рассогласования, получаемых в результате сравнения задающих сигналов с сигналами соответствующих датчиков обратных связей.

Учитывая изложенное, можно сказать: *автоматизированным электроприводом называется электромеханическая система, предназначенная для приведения в движение исполнительных ор-*

ганов рабочих машин и управления их технологическими процессами, состоящая из задающего, управляющего, силового преобразовательного, электродвигательного и механического передаточного устройств.

В тех случаях, когда нет жестких требований к качеству управления движением исполнительных органов рабочей машины, используются более простые приводы, состоящие из силового выключателя и электродвигателя.

С точки зрения способов распределения механической энергии разнообразные ЭП можно разделить на 3 вида: групповой, индивидуальный, взаимосвязанный.

Групповой ЭП применялся на первых этапах развития техники привода и обеспечивал движение исполнительных органов нескольких рабочих машин или нескольких исполнительных органов одной и той же машины. Передача механической энергии и ее распределение в этом случае осуществлялись от одного двигателя с помощью трансмиссий. Очевидные недостатки такого привода - громоздкость механических связей, сложность управления движением каждого исполнительного органа. Вследствие этого групповой ЭП в настоящее время почти не применяется.

В **индивидуальном ЭП** управление движением каждого исполнительного органа обеспечивается отдельным двигателем, что упрощает механические передачи, облегчает управление движением, позволяет достичь более высоких энергетических показателей.

Взаимосвязанный ЭП имеет два или несколько электрически или механически связанных между собой двигателей. Примером взаимосвязанного ЭП может служить привод цепного конвейера большой протяженности. Исполнительным органом такого конвейера служит цепь, приводимая в движение несколькими двигателями, установленными по длине конвейера. Взаимосвязанный ЭП широко применяется в транспортных установках, бумагоделательных машинах, текстильных агрегатах, прокатных станах металлургического производства и т.д. Одной из разновидностей взаимосвязанного ЭП является много-

двигательный привод - электропривод, в котором несколько двигателей работают на общий вал.

1.2. ПРИВЕДЕНИЕ МОМЕНТОВ И СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ, ИНЕРЦИОННЫХ МАСС И МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ

В большинстве случаев, как отмечалось выше, двигатель приводит в движение исполнительный орган механизма через механическое передаточное устройство, отдельные элементы которого движутся с различными скоростями.

При инженерных расчетах в большинстве практических случаев можно принять механические связи абсолютно жесткими (не учитывать упругость звеньев и наличие зазоров в передачах). Тогда движение одного элемента дает полную информацию о движении всех остальных элементов, и достаточно рассматривать один элемент. В качестве такого элемента обычно принимают вал двигателя. В результате расчетную схему механической части привода можно свести к одному обобщенному механическому звену. В качестве него обычно принимают вал двигателя. При этом возникает задача определения эквивалентного (приведенного) момента инерции $J_{пр}$ и момента сопротивления M_c (статического момента) производственного механизма.

Для приведения к валу двигателя момента или усилия нагрузки исполнительного органа производственного механизма используется уравнение энергетического баланса системы. Мощность на валу двигателя P_c определяется мощностью статического сопротивления $P_{ио}$ на исполнительном органе и потерями ΔP в механических звеньях:

$$P_c = P_{ио} + \Delta P.$$

Потери мощности можно учесть введением в расчеты соответствующего КПД кинематической схемы:

$$P_c = \frac{P_{ио}}{\eta} \quad (1.1)$$

Для механизма с вращательным движением исполнительного органа (рис. 1.2) мощность, измеряемая в Вт, определяется общим соотношением

$$P = M \cdot \omega, \quad (1.2)$$

где M - момент на соответствующем звене, Нм; ω - угловая скорость этого звена, рад/с.

Отметим, что **угловая скорость** ω , рад/с, связана с **частотой вращения** n , об/мин, соотношением

$$\omega = \frac{2\pi}{60} n \approx 0,105n.$$

Обозначим через ω_d угловую скорость вала двигателя, $\omega_{ио}$ - угловую скорость вала исполнительного органа, а соответствующие моменты - M_c и $M_{ио}$. С учетом (1.1), (1.2) можно записать

$$M_c \omega_d = \frac{M_{ио} \omega_{ио}}{\eta},$$

откуда момент сопротивления механизма, приведенный к валу двигателя,

$$M_c = M_{ио} \frac{\omega_{ио}}{\omega_d} \frac{1}{\eta}.$$

Учитывая, что $\frac{\omega_d}{\omega_{ио}} = i_p$ есть передаточное отношение редуктора,

получим

$$M_c = \frac{M_{ио}}{i_p \eta}. \quad (1.3)$$

В установившихся режимах момент M_c уравнивается моментом двигателя M (см. рис. 1.2, 1.3).

При поступательном движении исполнительного органа (см. рис. 1.3)

$$P_{ио} = F_{ио} V_{ио},$$

где $F_{ио}$ - усилие нагрузки на исполнительном органе, Н; $V_{ио}$ - линейная скорость его движения, м/с.

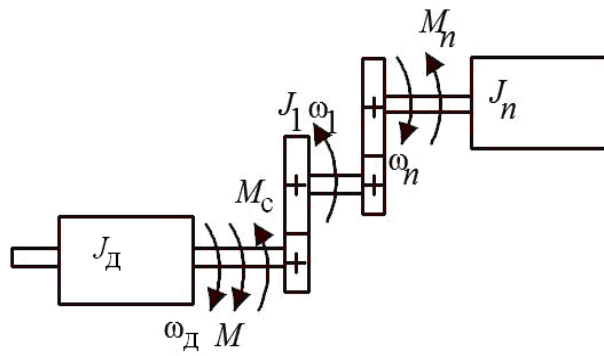


Рис. 1.2

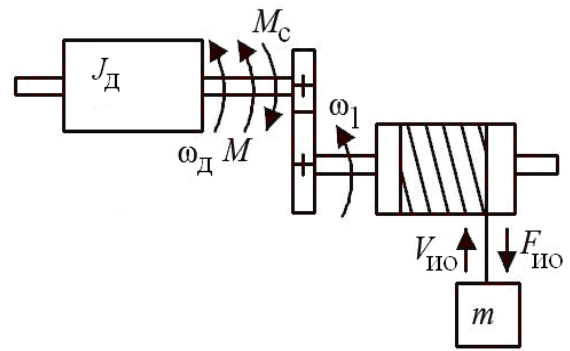


Рис. 1.3

Тогда с учетом (1.1) получим

$$M_c \omega_d = \frac{F_{ио} V_{ио}}{\eta},$$

откуда

$$M_c = F_{ио} \frac{V_{ио}}{\omega_d} \frac{1}{\eta}.$$

Отношение линейной скорости исполнительного механизма к угловой скорости двигателя

$$\frac{V_{ио}}{\omega_d} = \rho$$

имеет размерность метры и называется радиусом приведения нагрузки к валу двигателя. Используя это понятие, последнее выражение можно переписать в виде

$$M_c = F_{ио} \rho \frac{1}{\eta}.$$

Приведение моментов инерции к одной оси вращения основывается на равенстве кинетических энергий исходной и эквивалентной (приведенной) систем. В эквивалентной системе инерционность всех видов звеньев реальной механической системы заменяется одним моментом инерции $J_{пр}$, приведенным к валу двигателя. При наличии вращающихся частей с моментами инерции $J_1, J_2 \dots J_n$ и угловыми ско-

ростями $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ (см. рис. 1.2) с учетом баланса кинетических энергий можно записать

$$J_{\text{пр}} \frac{\omega_{\text{д}}^2}{2} = J_{\text{д}} \frac{\omega_{\text{д}}^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + \dots J_n \frac{\omega_n^2}{2},$$

откуда

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{д}} + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_2}{i_2^2} + \dots \frac{J_n}{i_n^2}, \quad (1.4)$$

где $i_i = \frac{\omega_{\text{д}}}{\omega_i}$ - передаточное отношение редуктора от вала двигателя до i -того элемента; $J_{\text{д}}$ - момент инерции двигателя и других элементов (муфты, шестерни и т.п.), установленных на валу двигателя.

Часто в каталогах для двигателей указывается величина махового момента GD^2 , кгс·м. В этом случае момент инерции в системе СИ, кг·м², вычисляется по формуле

$$J = \frac{GD^2}{4}.$$

Если в кинематической схеме имеются поступательно движущиеся элементы (см. рис. 1.3), то их масса приводится к валу двигателя также на основе равенства запаса кинетической энергии:

$$J'_{\text{пр}} \frac{\omega_{\text{д}}^2}{2} = \frac{mV_{\text{ио}}^2}{2}.$$

Дополнительная составляющая момента инерции, приведенная к валу двигателя,

$$J'_{\text{пр}} = m \frac{V_{\text{ио}}^2}{\omega_{\text{д}}^2} = mr^2. \quad (1.5)$$

Если механизм имеет вращающиеся и поступательно движущиеся элементы, то выражение (1.4) содержит дополнительно слагаемые вида (1.5).

1.3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

При проектировании электропривода электродвигатель должен выбираться так, чтобы его механические характеристики соответствовали механическим характеристикам производственного механизма. Механические характеристики дают взаимосвязь переменных в установившихся режимах.

Механической характеристикой механизма называют зависимость между угловой скоростью и моментом сопротивления механизма, приведенными к валу двигателя: $\omega = f(M_c)$

Среди всего многообразия выделяют несколько характерных типов механических характеристик механизмов.

1. Характеристика с моментом сопротивления, не зависящим от скорости (прямая 1 на рис. 1.4). Такой характеристикой обладают, например, подъемные краны, лебедки, поршневые насосы при неизменной высоте подачи и др.

2. Характеристика с моментом сопротивления, линейно зависящим от скорости (прямая 2 на рис. 1.4). Такая зависимость присуща, например, приводу генератора постоянного тока с независимым возбуждением, работающему на постоянную нагрузку.

3. Характеристика с нелинейным возрастанием момента (кривая 3 на рис. 1.4). Типичными примерами здесь могут служить характеристики вентиляторов, центробежных насосов, гребных винтов. Для этих механизмов момент M_c зависит от квадрата угловой скорости ω .

4. Характеристика с нелинейно спадающим моментом сопротивления (кривая 4 на рис. 1.4). Например, у механизмов главного движения некоторых металлорежущих станков момент M_c изменяется обратно пропорционально ω , а мощность, потребляемая механизмом, остается постоянной.

Механической характеристикой электродвигателя называется зависимость его угловой скорости от вращающего момента: $\omega_d = f(M)$.

В качестве примеров на рис. 1.5 приведены следующие механические характеристики: 1 - синхронного двигателя; 2 - двигателя постоянного тока независимого возбуждения; 3 - двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

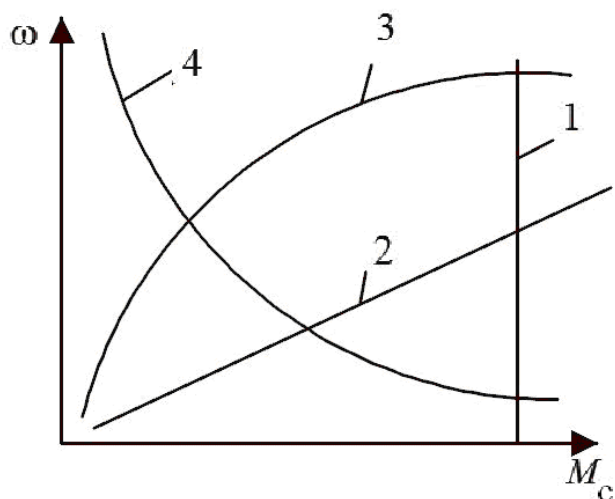


Рис. 1.4

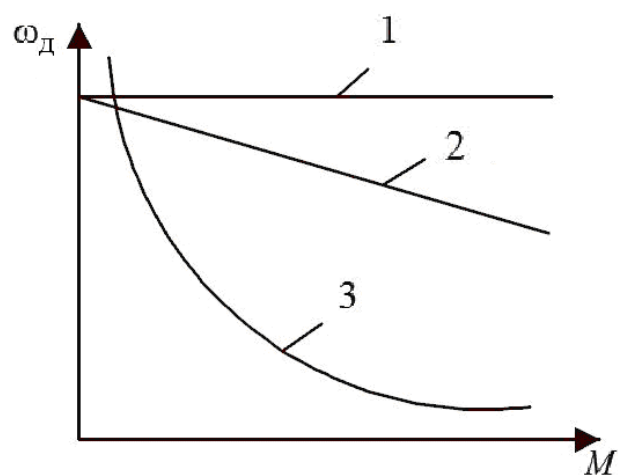


Рис. 1.5

Для оценки свойств механических характеристик электропривода используют понятие жесткости характеристики. Жесткость определяется по выражению

$$\beta = \Delta M / \Delta \omega_d,$$

где ΔM - изменение момента двигателя; $\Delta \omega_d$ - соответствующее изменение угловой скорости.

Для линейных характеристик значение β остается постоянным, для нелинейных - зависит от рабочей точки.

Используя это понятие, характеристики, приведенные на рис. 1.5, можно качественно оценить так: 1 - абсолютно жесткая ($\beta = \infty$); 2 - жесткая; 3 - мягкая.

1.4. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

При воздействии на электропривод различных возмущений (изменение статического момента, колебания сетевого напряжения и т.п.) в нем возникают переходные процессы. Уравнение движения

электропривода учитывает силы и моменты, действующие в переходных режимах.

Как известно из физики, в соответствии с законом Ньютона при поступательном движении движущая сила F уравнивается силой сопротивления F_c машины и инерционной силой $m \frac{dV}{dt}$:

$$m \frac{dV}{dt} = F - F_c.$$

Так как для электропривода характерно вращательное движение, то уравнение его движения имеет вид

$$J_{\text{пр}} \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = M - M_c. \quad (1.6)$$

Здесь аналогом массы является приведенный момент инерции $J_{\text{пр}}$, вместо линейной скорости V рассматривается угловая скорость $\omega_{\text{д}}$, а в правую часть уравнения входят момент двигателя M и статический момент механизма M_c . Из уравнения (1.6) следует, что в установившемся режиме, когда ускорение $\frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = 0$,

$$M = M_c, \quad (1.7)$$

т.е. момент двигателя уравнивается моментом сопротивления производственного механизма.

На рис. 1.6 показаны механические характеристики двигателя (1) и производственного механизма (2). (Фактически момент двигателя и момент M_c имеют противоположные знаки, но для удобства анализа их показывают в одном и том же квадрате). Очевидно, что равенству (1.7) соответствует на рис. 1.6 точка a , где характеристики пересекаются. При этом угловая скорость электропривода равна $\omega_{\text{д}}$.

Установившийся режим работы привода может быть **устойчивым** или **неустойчивым**. Для решения этого вопроса проанализируем поведение электропривода при отклонениях от равновесного режима в точке a .

Предположим, под действием возмущения угловая скорость отклонилась относительно $\omega_{\text{д}}$ на $+\Delta\omega$. В этом случае момент двигателя

уменьшается и примет значение M_1 (см. рис 1.6), а статический момент возрастет до M_{c1} , т.е. будет иметь место соотношение

$$M_1 - M_{c1} < 0.$$

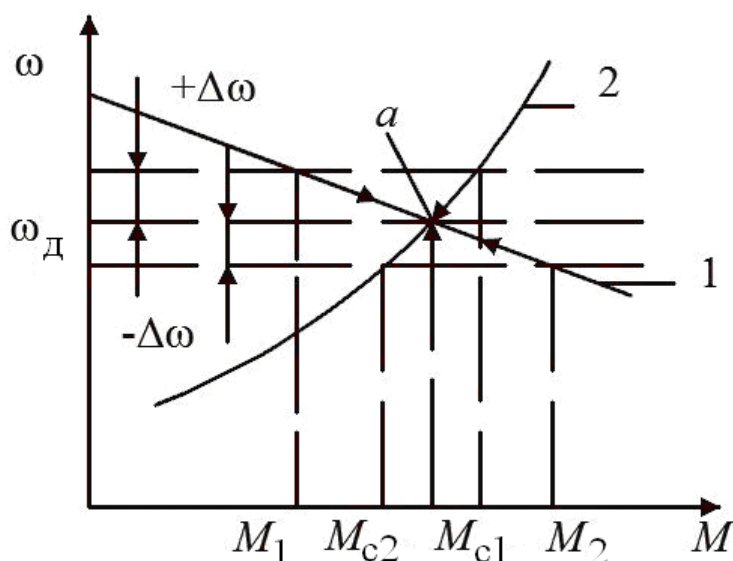


Рис. 1.6

При этом в соответствии с уравнением (1.6), ускорение $\frac{d\omega_{д}}{dt}$ будет отрицательным, т.е. привод будет замедляться, а $\omega_{д}$ снижаться. Система стремится возвратиться к положению равновесия в точку a , что условно показано на рис. 1.6 стрелками.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда угловая скорость отклоняется на $-\Delta\omega$. При этом момент двигателя возрастает до M_2 , а момент механизма снижается до M_{c2} , и выполняется соотношение

$$M_2 - M_{c2} > 0.$$

Ускорение $\frac{d\omega_{д}}{dt}$ в этом случае будет положительным, угловая скорость $\omega_{д}$ возрастает, и система вновь стремится к положению равновесия в точке a .

Проведенный анализ показывает, что режим работы электропривода в точке a для рассматриваемого сочетания характеристик двигателя и механизма будет устойчивым.

Условие устойчивости является совершенно необходимым условием работоспособности электропривода. Следует учитывать, что оно выполняется далеко не всегда. Предлагается самостоятельно провести аналогичный анализ для сочетания характеристик, показанных на рис. 1.7 (1 - характеристика двигателя; 2 - характеристика механизма).

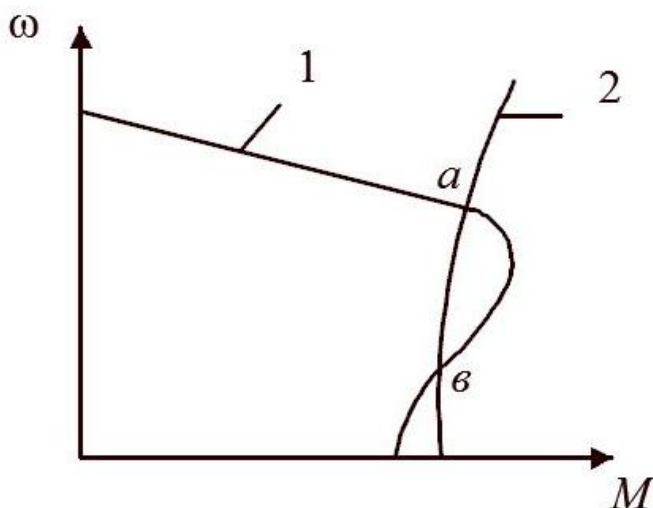


Рис. 1.7

Выводы, получаемые в результате проведенного анализа, характеризуют, так называемую **статическую устойчивость** электропривода, т.е. способность системы возвращаться к исходному режиму при достаточно «малых» отклонениях.

1.5. ДИАПАЗОН РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ. СТАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ

Многие производственные механизмы требуют регулирования скорости исполнительных органов, т.е. целенаправленного изменения частоты вращения двигателя. Для таких механизмов используются **регулируемые электроприводы**.

Важнейшими показателями качества для регулируемого электропривода являются диапазон регулирования скорости и падение скорости от нагрузки.

Предположим, электропривод обеспечивает формирование верхней 1 и нижней 2 характеристик, показанных на рис. 1.8.

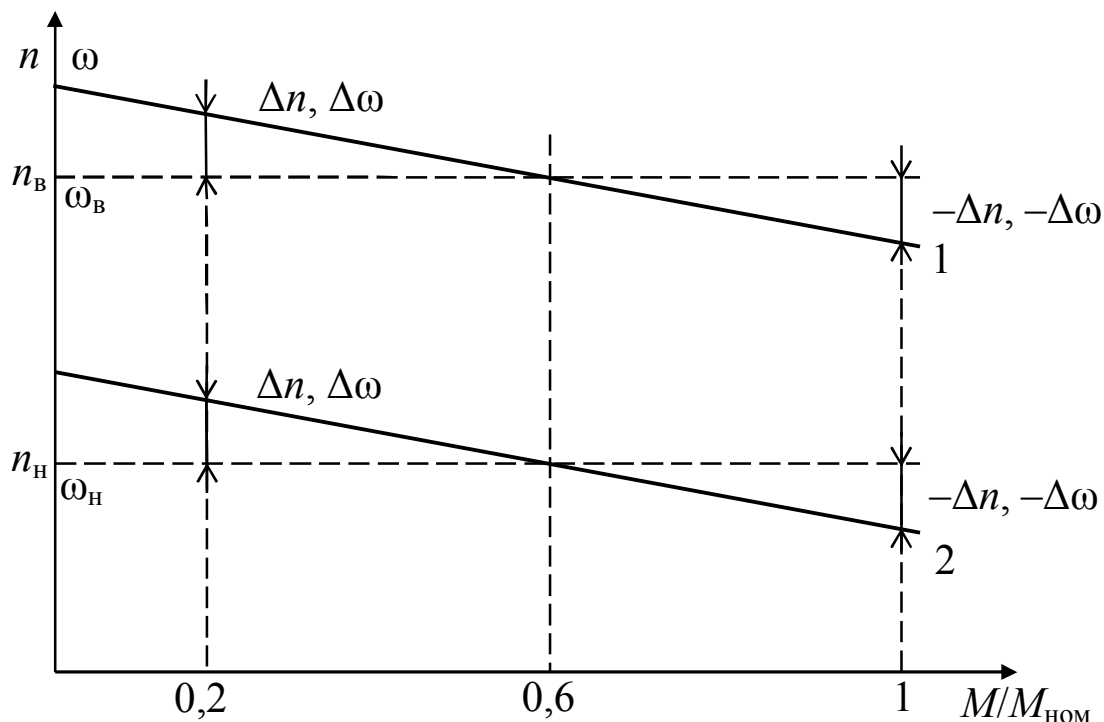


Рис. 1.8.

Под **диапазоном регулирования скорости** понимают отношение наибольшей (верхней) скорости ω_B к наименьшей (нижней) скорости ω_H :

$$D = \frac{\omega_B}{\omega_H} = \frac{n_B}{n_H}. \quad (1.8)$$

В качестве верхней и нижней скоростей обычно рассматривают их средние значения, соответствующие середине интервала возможного изменения момента. Так, для комплектных электроприводов принимают, что момент может изменяться от $0,2 \times M_{\text{ном}}$ до $M_{\text{ном}}$. При этом середина интервала изменения момента соответствует значению $0,6 \times M_{\text{ном}}$ (см. рис. 1.8).

Например, если электропривод имеет верхнюю частоту вращения $n_B = 1000$ об/мин и диапазон регулирования $D = 1000$, то нижняя частота вращения

$$n_H = \frac{n_B}{D} = \frac{1000}{1000} = 1 \text{ об/мин.}$$

Диапазон регулирования скорости ограничивается допустимым изменением скорости от изменения нагрузки и действия других возмущений. Поясним это.

Падение скорости $\Delta\omega$ (Δn) от изменения нагрузки (см. рис. 1.8) определяют при минимальном и максимальном значениях нагрузки (момента). Для линейной характеристики значения $\Delta\omega$ (Δn) для крайних значений момента оказываются при этом одинаковыми по абсолютной величине. Величину $\Delta\omega_d$ (или Δn_d) называют также **абсолютной статической ошибкой от нагрузки**. Для оценки качества работы электропривода удобнее использовать значение **относительной статической ошибки от нагрузки**.

Относительная ошибка определяется обычно в процентах по выражению

$$\Delta = \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_{\text{ср}}} \right) \times 100\% = \left(\frac{\Delta n}{n_{\text{ср}}} \right) \times 100\%,$$

где $\omega_{\text{ср}}$, $n_{\text{ср}}$ - среднее значение угловой скорости или частоты вращения на соответствующих характеристиках.

Значение абсолютной ошибки $\Delta\omega$ (или Δn) на верхней и нижней характеристиках, как правило, одно и то же. При этом относительные ошибки на верхней и на нижней скоростях

$$\Delta_{\text{в}} = \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_{\text{в}}} \right) \times 100\% = \left(\frac{\Delta n}{n_{\text{в}}} \right) \times 100\%; \quad (1.9)$$

$$\Delta_{\text{н}} = \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_{\text{н}}} \right) \times 100\% = \left(\frac{\Delta n}{n_{\text{н}}} \right) \times 100\%. \quad (1.10)$$

Используя выражения (1.9) и (1.10), найдем отношение

$$\frac{\Delta_{\text{в}}}{\Delta_{\text{н}}} = \frac{\omega_{\text{н}}}{\omega_{\text{в}}} = \frac{n_{\text{н}}}{n_{\text{в}}}.$$

Тогда, с учетом выражения (1.8) для диапазона регулирования, получим

$$\Delta_{\text{н}} = D \cdot \Delta_{\text{в}}. \quad (1.11)$$

Таким образом, относительная статическая ошибка от нагрузки на нижней скорости в D раз больше, чем на верхней.

Производственные механизмы, как правило, требуют поддержания скорости с заданной точностью во всем диапазоне регулирова-

ния. Из этого следует, что стремление увеличить диапазон регулирования ограничивается возрастанием относительной статической ошибки на нижней характеристике, и при проектировании электропривода необходимо прежде всего обеспечить требуемую точность стабилизации на нижней скорости.

2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА (ДПТ) НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ (НВ)

2.1. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДПТ НВ

Схема подключения ДПТ НВ приведена на рис. 2.1. Напряжение $U_{\text{я}}$ на якорь двигателя M с электромагнитным возбуждением подается от подключенного к сети переменного тока преобразователя (выпрямителя) П1 (предполагается, что он нерегулируемый). Обмотка возбуждения LM двигателя может быть подключена к другому преобразователю П2 или к точкам $a, в$ первого преобразователя. При наличии сети постоянного тока якорь и обмотка возбуждения также получают питание от одного источника.

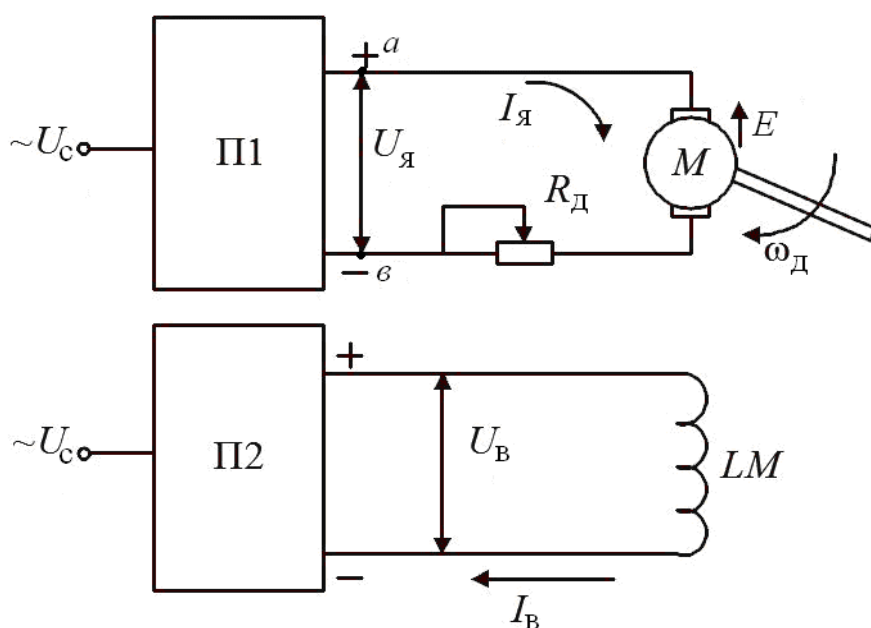


Рис. 2.1

Для подключения машины с возбуждением от постоянных магнитов (рис. 2.2) достаточно одного преобразователя. В цепь якоря при питании его от неуправляемого преобразователя обычно включается добавочное сопротивление R_d (его назначение поясняется ниже).

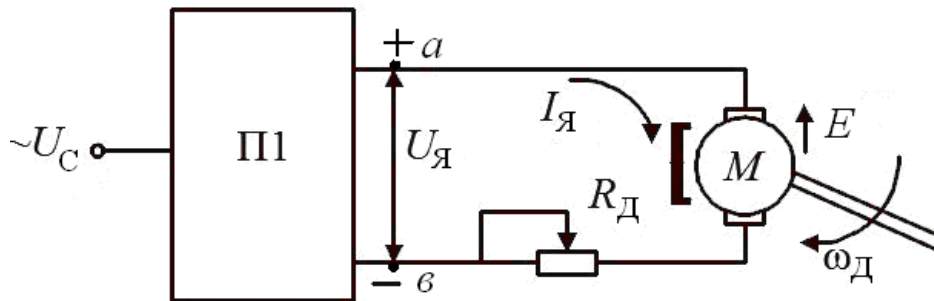


Рис. 2.2

В двигательном режиме электрическая энергия потребляется машиной из сети и преобразуется в механическую энергию.

Направление тока якоря $I_я$ и ЭДС E на рис. 2.1, 2.2 показано для двигательного режима.

Напряжение $U_я$ (В), приложенное к якорю, в установившемся режиме уравнивается ЭДС E (В), наведенной в якорю (ее называют также противоЭДС), и падением напряжения в якорной цепи

$$U_я = E + I_я(R_я + R_d), \quad (2.1)$$

где $R_я$ - сопротивление якорной цепи двигателя, Ом, включающее сопротивления обмотки якоря, щеточного контакта, дополнительных полюсов и компенсационной обмотки; R_d - добавочное сопротивление.

ЭДС машины определяется соотношением

$$E = c\Phi\omega_d. \quad (2.2)$$

Здесь конструктивный коэффициент

$$c = \frac{pN}{2\pi a},$$

где p - число пар полюсов, N - число активных проводников обмотки якоря, a - число пар параллельных ветвей обмотки якоря; Φ - магнитный поток, Вб, создаваемый обмоткой возбуждения или постоянными магнитами.

Подставляя выражение (2.2) для E в уравнение (2.1) и решая его относительно ω_d , получим

$$\omega_d = \frac{U_{\text{я}}}{c\Phi} - \frac{I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_d)}{c\Phi}. \quad (2.3)$$

Это уравнение устанавливает связь между частотой вращения и током якоря $\omega_d = f(I_{\text{я}})$ и называется **электро механической характеристикой двигателя**.

Электромагнитный момент двигателя, M , определяется током якоря и магнитным потоком:

$$M = c\Phi I_{\text{я}}. \quad (2.4)$$

Момент на валу двигателя меньше электромагнитного на значение, определяемое потерями в стали и механическими потерями. Для инженерных расчетов этими потерями можно пренебречь и принять, что момент на валу равен электромагнитному моменту. Тогда, определив из (2.4) ток якоря и подставив его в соотношение (2.3), получим уравнение **механической характеристики двигателя**:

$$\omega_d = \frac{U_{\text{я}}}{c\Phi} - \frac{M(R_{\text{я}} + R_d)}{c^2\Phi^2}. \quad (2.5)$$

Полученные выражения (2.3), (2.5) для характеристик двигателя представляют собой уравнение прямой. Они справедливы, если пренебречь реакцией якоря.

В уравнениях (2.3), (2.5) первое слагаемое представляет собой **угловую скорость идеального холостого хода** (при этом ток якоря и момент равны 0):

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{я}}}{c\Phi}. \quad (2.6)$$

Второй член в этих уравнениях характеризует **статическое падение угловой скорости** от нагрузки:

$$\Delta\omega_d = \frac{I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_d)}{c\Phi} \text{ или } \Delta\omega_d = \frac{M(R_{\text{я}} + R_d)}{c^2\Phi^2}. \quad (2.7)$$

На рис. 2.3 падение скорости показано для **номинального** значения момента $M_{\text{ном}}$ (тока $I_{\text{ном}}$). При неизменном магнитном потоке момент и ток якоря, как следует из соотношения (2.4), пропорциональны, поэтому механическая и электромеханическая характеристики двигателя (см. рис. 2.3) отличаются только масштабом по оси ординат. **Характеристика, полученная при номинальном значении напряжения на якоре $U_{\text{ном}}$, номинальном магнитном потоке $\Phi_{\text{ном}}$ и отсутствии внешних резисторов в якорной цепи, называется естественной.** Жесткость естественной характеристики определяется только сопротивлением якорной цепи двигателя:

$$\Delta\omega = \frac{I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c\Phi} \quad \text{или} \quad \Delta\omega = \frac{MR_{\text{я}}}{c^2\Phi^2}. \quad (2.8)$$

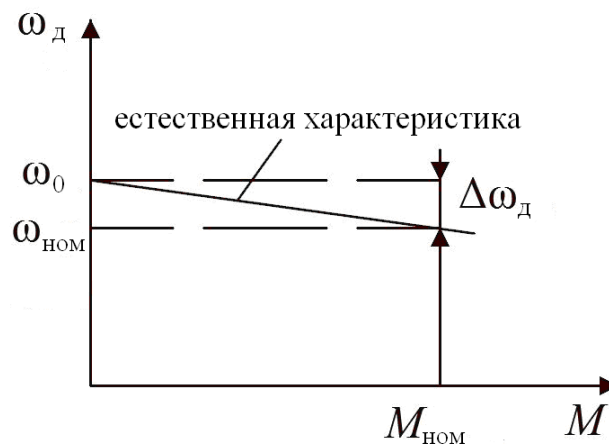


Рис. 2.3

Снижение скорости двигателя ω_d под нагрузкой объясняется следующим. При увеличении момента сопротивления механизма угловая скорость начинает снижаться. В результате уменьшается ЭДС E согласно (2.2). Ток якоря при этом, как следует из (2.1), увеличивается. Соответственно возрастает момент двигателя (см. уравнение (2.4)). 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 ω_d .

При инженерных расчетах коэффициенты, входящие в уравнения характеристик двигателя, могут быть определены через номинальные

параметры двигателя, приводимые в каталогах. При номинальном магнитном потоке

$$\frac{1}{c\Phi_{\text{ном}}} = K_{\text{д}} = \frac{\omega_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}}R_{\text{я}}}. \quad (2.9)$$

Здесь коэффициент $K_{\text{д}}$ - коэффициент передачи двигателя, его размерность $\frac{\text{рад/с}}{\text{В}}$. С использованием этого понятия уравнения (2.3), (2.5) могут быть переписаны в виде

$$\omega_{\text{д}} = K_{\text{д}}U_{\text{я}} - K_{\text{д}}I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{д}}); \quad (2.10)$$

$$\omega_{\text{д}} = K_{\text{д}}U_{\text{я}} - K_{\text{д}}^2M(R_{\text{я}} + R_{\text{д}}). \quad (2.11)$$

В этих уравнениях, как и в (2.3), (2.5), первый член представляет собой угловую скорость идеального холостого хода, а второй - падение скорости от нагрузки:

$$\omega_0 = K_{\text{д}}U_{\text{я}}, \quad \Delta\omega_{\text{д}} = K_{\text{д}}I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{д}}) \quad (2.12)$$

или

$$\Delta\omega_{\text{д}} = K_{\text{д}}^2M(R_{\text{я}} + R_{\text{д}}). \quad (2.13)$$

2.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ДПТ НВ ВВЕДЕНИЕМ ДОБАВОЧНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В ЦЕПЬ ЯКОРЯ

Схема подключения двигателя для этого способа регулирования приведена на рис. 2.1, 2.2. На якорь и обмотку возбуждения двигателя подается номинальное напряжение $U_{\text{я}} = U_{\text{ном}}$, при этом поток также номинальный $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$.

Электромеханическая и механическая характеристики двигателя описываются уравнениями (2.10), (2.11), в которых принято

$$U_{\text{я}} = U_{\text{ном}};$$

$$\omega_{\text{д}} = K_{\text{д}}U_{\text{ном}} - K_{\text{д}}I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{д}}); \quad \omega_{\text{д}} = K_{\text{д}}U_{\text{ном}} - K_{\text{д}}^2M(R_{\text{я}} + R_{\text{д}}).$$

Очевидно, что первое слагаемое в этих уравнениях ω_0 остается неизменным, а второй член - падение угловой скорости от нагрузки -

тем больше, чем больше добавочное сопротивление. Иными словами, с увеличением R_d жесткость характеристик снижается (рис. 2.4).

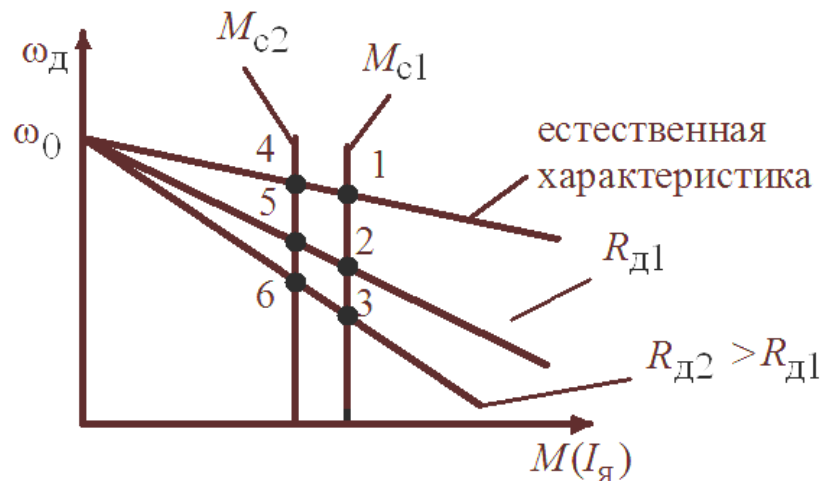


Рис. 2.4

Если, например, механизм имеет характеристику с моментом M_{c1} , не зависящим от скорости, то на естественной характеристике угловая скорость электропривода определяется т. 1 (см. рис. 2.4), а при введении добавочных сопротивлений R_{d1} и R_{d2} снижается (т. 2, т. 3). **Получаемые при введении добавочных сопротивлений 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, ω_d 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. 2.4), то угловая скорость электропривода будет определяться т. 4, 5, 6.

Этот способ регулирования 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 автомобилях.

Кроме того, при использовании нерегулируемого источника или сети постоянного тока включение добавочных сопротивлений необходимо для обеспечения нормального пуска двигателя.

Рассмотрим особенности пускового режима. В начальный момент пуска угловая скорость и соответственно ЭДС двигателя равны нулю. Ток якоря при этом, как следует из уравнения (2.1), будет

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}}.$$

Если не вводить добавочных сопротивлений, то ток ограничивается только сопротивлением якоря. Для двигателей мощностью больше 0,5...1,0 кВт бросок пускового тока, как правило, значительно превышает допустимое значение (обычно максимально допустимый ток ДПТ составляет 2,5...4 от номинального значения), т.е. прямой пуск (подачей на якорь номинального напряжения) допустим только для двигателей небольшой мощности, с большим сопротивлением якоря.

Для более мощных двигателей с целью ограничения пускового тока в цепь якоря включают добавочные сопротивления. Коммутацию добавочных сопротивлений обычно осуществляют с помощью контакторов (рис. 2.5). В начальный момент пуска на якорь двигателя контактом *КМ1* подается напряжение, при этом величина добавочного сопротивления максимальна:

$$R_{\text{д}} = R_1 + R_2 + R_3.$$

Значение максимального добавочного сопротивления выбирают так, чтобы ток якоря не превысил допустимого I_{max} (рис. 2.6). Далее идет разгон по характеристике с максимальным значением $R_{\text{д}}$.

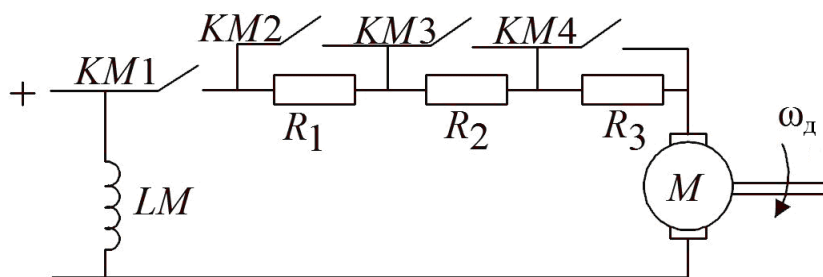


Рис. 2.5

Ток якоря постепенно снижается за счет возрастания ЭДС. Обратите внимание, что напряжение на обмотку возбуждения подается до подключения якоря к сети. Пуск двигателя без подачи возбуждения недопустим - в этом случае момент двигателя и ЭДС будут равны нулю (см. выражения (2.2), (2.4)).

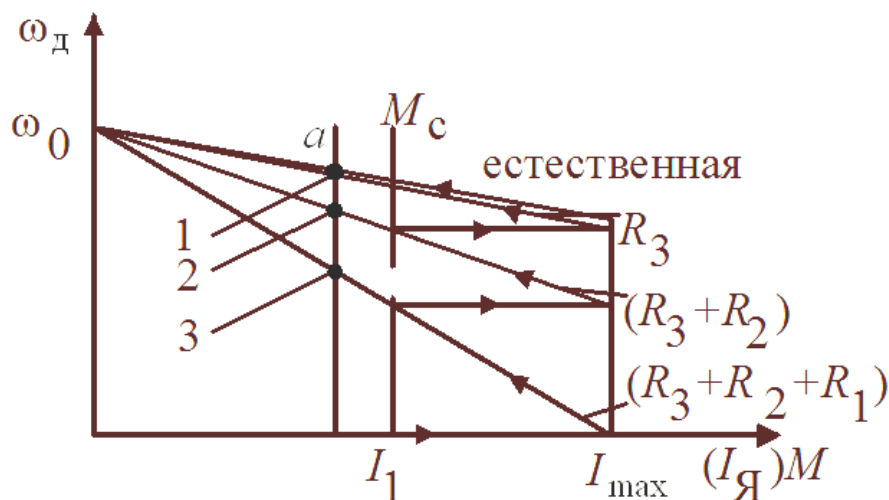


Рис. 2.6

По мере разгона двигателя и снижения тока до некоторого значения I_1 контактом $KM2$ шунтируется резистор R_1 , и машина переходит на характеристику с $R_d = R_2 + R_3$ и т.д. до выхода на естественную характеристику (процесс разгона на рис 2.6 условно показан стрелками). Добавочные сопротивления подбирают так, чтобы переключения происходили при одних и тех же значениях тока (I_1 и $I_{\max}$).

Процесс разгона заканчивается установившимся режимом в т. a , где момент двигателя уравнивается моментом сопротивления механизма M_c .

При автоматическом пуске переключение контакторов осуществляется схемой управления, обычно в функции времени. Схема управления может предусматривать длительную работу двигателя на любой из характеристик, т.е. обеспечивать ступенчатое регулирование угловой скорости (т. 1, 2, 3, a на рис. 2.6).

2.3. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ДПТ НВ ИЗМЕНЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЯКОРЕ

Схема включения машины для этого способа регулирования приведена на рис. 2.7. Здесь необходим управляемый преобразователь (УП), с помощью которого изменяется напряжение $U_{\text{я}}$ на якоре в функции задающего сигнала $U_{\text{зд}}$.

На рис. 2.7 показана машина с возбуждением от постоянных магнитов. В случае, когда машина имеет электромагнитное возбуждение, обмотка возбуждения подключается к независимому нерегулируемому преобразователю. Регулирование $\omega_{\text{д}}$ ведется при номинальном потоке возбуждения $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$, и для анализа удобно использовать уравнения (2.10), (2.11), приняв в них $R_{\text{д}} = 0$:

$$\omega_{\text{д}} = K_{\text{д}} U_{\text{я}} - K_{\text{д}} I_{\text{я}} R_{\text{я}}; \quad (2.14)$$

$$\omega_{\text{д}} = K_{\text{д}} U_{\text{я}} - K_{\text{д}}^2 M R_{\text{я}}. \quad (2.15)$$

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 $\omega_0 = \omega_{\text{в}}, \omega_1, \omega_2$ и т.д., т.е. регулировать скорость вниз от номинальной. Второй член в уравнениях электромеханической (2.14) и механической (2.15) характеристик определяет падение скорости $\Delta\omega_{\text{д}}$ под нагрузкой. Характеристики при различных значениях напряжения на якоре располагаются взаимно параллельно (рис. 2.8).

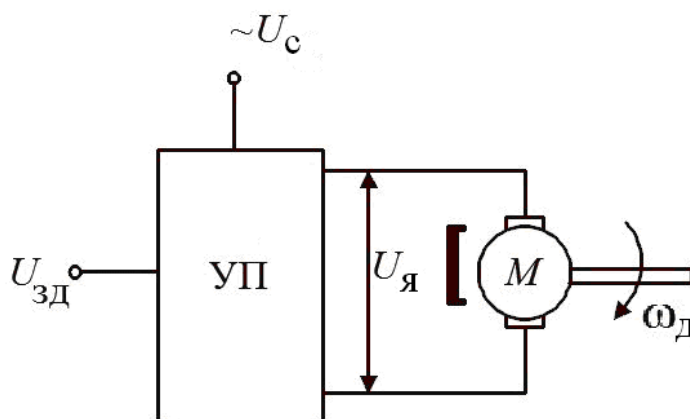


Рис. 2.7

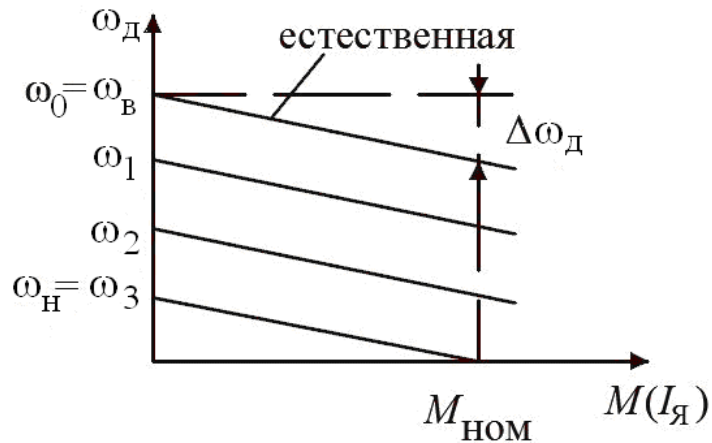


Рис. 2.8

При регулировании ω_d изменением напряжения на якоре в разомкнутой системе нижняя скорость ω_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, как показано далее, падение скорости может быть сведено до достаточно малых значений. В результате удастся получить диапазон регулирования скорости изменением напряжения на якоре $D_u = 1000 \div 10000$.

Таким образом, **регулирование скорости изменением напряжения на якоре является основным способом регулирования ω_d в широкорегулируемых приводах.**

Для рассматриваемого способа регулирования длительно допустимый ток якоря и соответственно момент ограничены номинальными значениями $I_{НОМ}, M_{НОМ}$, т.е. **регулирование ω_d изменением напряжения на якоре осуществляется при постоянном допустимом моменте.** Длительно допустимая мощность при номинальной угловой скорости равна номинальной $P_{НОМ}$ и снижается по мере уменьшения ω_d :

$$P = M_{НОМ} \omega_d. \quad (2.16)$$

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

2.4. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ДПТ ИЗМЕНЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОТОКА

Схема подключения двигателя для рассматриваемого способа регулирования приведена на рис. 2.9. Обмотка возбуждения LM двигателя подключена к управляемому преобразователю УП, с помощью которого изменяется напряжение возбуждения U_B и соответственно магнитный поток Φ . На якорь двигателя подается напряжение $U_{ном}$ от неуправляемого преобразователя П.

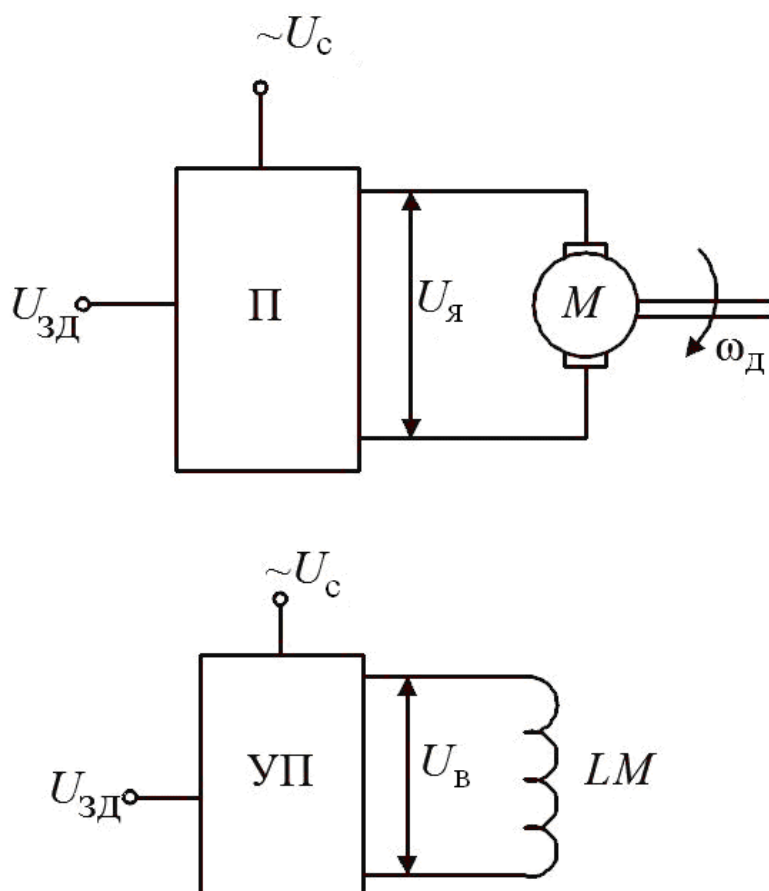


Рис. 2.9

Возможна и иная схема (рис. 2.10), в которой обмотку возбуждения подключают к неуправляемому преобразователю или сети постоянного тока через реостат R , регулирующий ток возбуждения и магнитный поток.

Для анализа удобно воспользоваться уравнениями электрической и механической характеристик в форме (2.3), (2.5). Учитывая, что

напряжение на якоре остается номинальным, а добавочное сопротивление в цепи якоря равно нулю, указанные уравнения можно переписать в виде

$$\omega_{\text{д}} = \frac{U_{\text{ном}}}{c\Phi} - \frac{I_{\text{я}}R_{\text{я}}}{c\Phi}; \quad (2.17)$$

$$\omega_{\text{д}} = \frac{U_{\text{ном}}}{c\Phi} - \frac{MR_{\text{я}}}{c^2\Phi^2}; \quad (2.18)$$

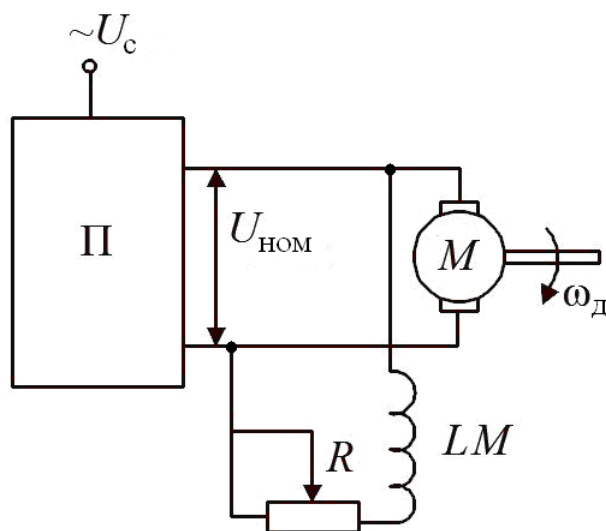


Рис. 2.10

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

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. Причем падение скорости на механической характеристике зависит от Φ^2 , т.е. при ослаблении магнитного потока, например в 2 раза, падение угловой скорости при том же моменте увеличивается в 4 раза.

Момент двигателя в соответствии с уравнением (2.11) снижается пропорционально ослаблению магнитного потока.

Действительно, допустимая нагрузка двигателя ограничена номинальным значением тока якоря $I_{\text{ном}}$. Предельно допустимый момент двигателя для этого способа регулирования $M = c\Phi I_{\text{ном}}$ снижается пропорционально уменьшению магнитного потока, а предельно допустимая мощность остается постоянной.

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

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

Диапазон регулирования D_Φ изменением магнитного потока определяется отношением наибольшей угловой скорости к скорости холостого хода ω_0 соответствующей естественной характеристики. Предельное значение D_Φ составляет 4...5 и ограничено, в основном, коммутационной устойчивостью машины.

Особенности регулирования скорости изменением напряжения на якоре и ослаблением магнитного потока дополнительно поясняет рис. 2.11. Регулирование угловой скорости изменением напряжения на якоре принято называть первой зоной регулирования, изменением магнитного потока - второй зоной.

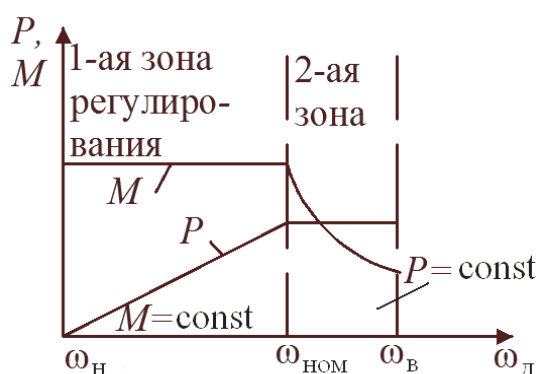


Рис. 2.11

В первой зоне ω_d регулируется вниз от номинального значения, допустимый момент двигателя остается постоянным, а допустимая мощность снижается пропорционально уменьшению ω_d .

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

2.5. 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 квадрате (рис. 2.12.)

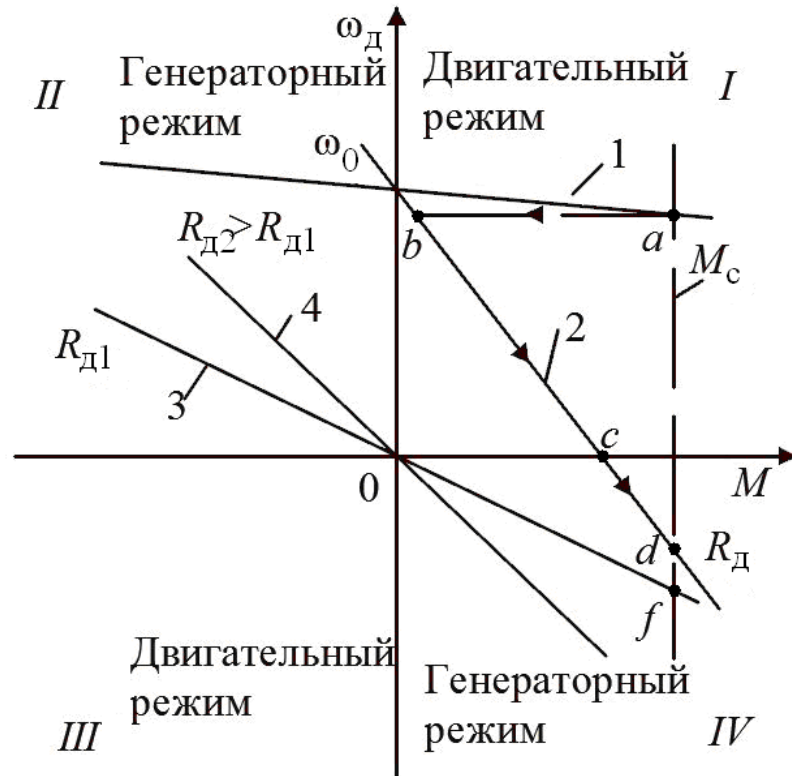


Рис. 2.12

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

Рассмотрим способы электрического торможения машины постоянного тока независимого возбуждения.

1. Генераторное торможение с отдачей энергии в сеть. Если скорость двигателя оказывается выше скорости идеального холостого хода ω_0 (см. рис. 2.12), то ЭДС машины становится больше напряжения сети. Ток якоря, как следует из уравнения $I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{я}} - E}{R_{\text{я}}}$, становится отрицательным. Следовательно, меняется и знак момента - он ста-

новится 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 II квадранте.

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

2. Торможение противовключением. Предположим, что электропривод грузоподъемного механизма работает на естественной характеристике 1 (см. рис. 2.12) 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 в точку *b*. Момент двигателя уменьшается, и скорость ω_d начинает снижаться. В точке *c* скорость ω_d 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. 2.12 стрелками). При изменении направления вращения меняется знак ЭДС - двигателя, она складывается с питающим напряжением, и ток якоря определяется выражением

$$I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{я}} + E}{R_{\text{я}} + R_d}.$$

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 противовключением. 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 ω_d , 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 (см. формулу (2.4)).

3. 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. 2.13).

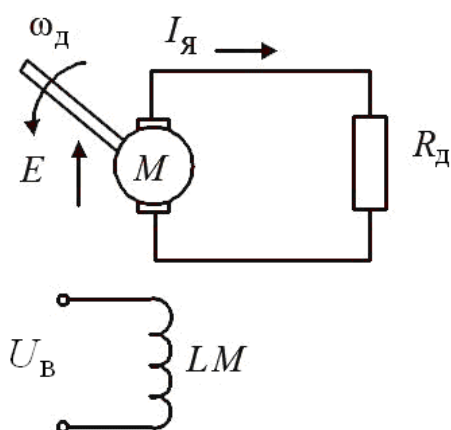


Рис. 2.13

Машина в этом случае работает в режиме генератора. Механическая энергия, поступающая со стороны вала, преобразуется в элек-

трическую и выделяется в виде тепла в сопротивлениях цепи якоря. Следовательно, режим неэкономичен. Уравнение механической характеристики несложно получить из (2.5), приняв $U_{\text{я}} = 0$:

$$\omega_{\text{д}} = -\frac{M(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{c^2 \Phi^2},$$

откуда для тормозного момента двигателя получим

$$M = -\frac{c^2 \Phi^2 \omega_{\text{д}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}}.$$

Из этого соотношения следует: во-первых, момент становится тормозящим (отрицательным); во-вторых, момент возрастает с увеличением скорости $\omega_{\text{д}}$; в-третьих, тормозной момент при отрицательном значении $\omega_{\text{д}}$ тем больше, чем меньше $R_{\text{д}}$ (см. характеристики 3, 4 на рис. 2.12).

Динамическое торможение используется, в частности, в подъемных механизмах при спуске грузов. Например, при работе двигателя на характеристике 3 (см. рис. 2.12) и моменте $M_{\text{с}}$, 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, так как по мере снижения $\omega_{\text{д}}$ уменьшается и тормозной момент.

2.6. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДПТ НВ

Пример 1. *Рассчитать естественную характеристику* двигателя постоянного тока независимого возбуждения, а также *искусственную характеристику* при напряжении на якоре, равном $0,1 U_{\text{ном}}$.

Номинальные данные двигателя:

$$P_{\text{ном}} = 5,3 \text{ кВт}; U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}; n_{\text{ном}} = 3000 \text{ об/мин};$$

$$R_{\text{я0}} = 0,242 \text{ Ом}; R_{\text{дп}} = 0,195 \text{ Ом}; \eta = 80\%.$$

Сопротивление якорной цепи двигателя находится как сумма сопротивлений якоря $R_{\text{я0}}$ и сопротивления добавочных полюсов $R_{\text{дп}}$, значения которых приводятся в справочниках.

Повышение сопротивлений обмоток при нагреве учитывается с помощью коэффициента 1,2:

$$R_{\text{яц}} = 1,2(R_{\text{я}} + R_{\text{дп}}) = 1,2(0,242 + 0,195) = 0,524 \text{ Ом}.$$

Если значение $I_{\text{ном}}$ в справочнике не указано, то его можно приближенно рассчитать по выражению

$$I_{\text{ном}} \cong (0,9 \dots 0,95) \frac{P_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} \eta} = 0,95 \frac{5300}{220 \cdot 0,8} = 28,6 \text{ А},$$

где η - КПД двигателя.

Вычисляем номинальную угловую скорость и по формуле (2.9) коэффициент передачи двигателя:

$$\omega_{\text{ном}} \cong 0,105 n_{\text{ном}} = 0,105 \cdot 3000 = 315 \text{ рад/с};$$

$$K_{\text{д}} = \frac{\omega_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} R_{\text{яц}}} = \frac{315}{220 - 28,6 \cdot 0,524} = 1,536 \frac{\text{рад/с}}{\text{В}}.$$

Определяем по формулам (2.12) угловую скорость двигателя на холостом ходу при номинальном напряжении и напряжении, равном $0,1 U_{\text{ном}}$:

$$\omega_{01} = K_{\text{д}} \cdot U_{\text{ном}} = 1,536 \cdot 220 = 338 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{02} = K_{\text{д}} \cdot 0,1 \cdot U_{\text{ном}} = 1,536 \cdot 0,1 \cdot 220 = 33,8 \text{ рад/с},$$

а также падение угловой скорости при номинальном токе

$$\Delta\omega = k_{\text{д}} R_{\text{яц}} I_{\text{ном}} = 1,536 \cdot 0,524 \cdot 28,6 = 23 \text{ рад/с}.$$

Для проверки вычисляем номинальную скорость двигателя по найденным данным:

$$\omega_{\text{ном}} = \omega_{01} - \Delta\omega = 338 - 23 = 315 \text{ рад/с}.$$

Полученное значение совпадает с рассчитанным выше, что подтверждает правильность расчетов.

По полученным данным на рис. 2.14 построены требуемые характеристики.

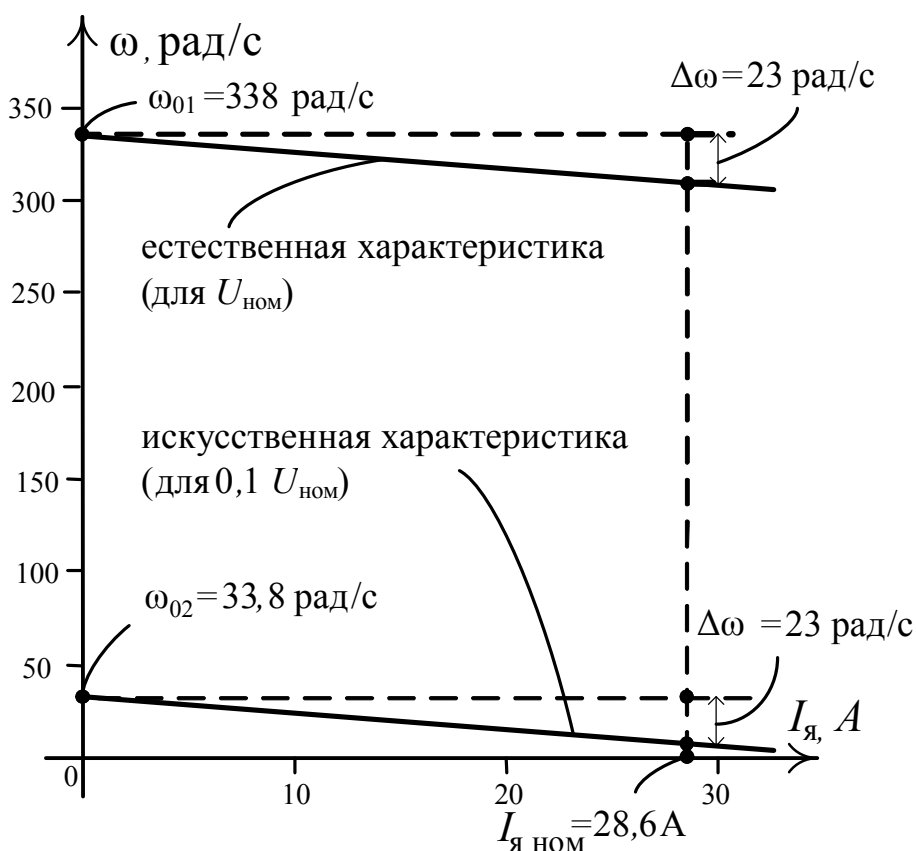


Рис. 2.14

Пример 2. Проверка возможности пуска двигателя прямым включением в сеть. При пуске двигателя в начальный момент его ЭДС равна нулю, и пусковой ток ограничивается только сопротивлением якорной цепи. При пуске двигателя прямым включением в сеть (без добавочных сопротивлений в цепи якоря) начальное значение пускового тока

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{яц}}}.$$

В качестве примера используем здесь и далее параметры двигателя из примера 1. Для двигателя с $U_{\text{ном}} = 220$ В и $R_{\text{яц}} = 0,524$ Ом начальное значение пускового тока составит

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{яц}}} = \frac{220}{0,524} = 419 \text{ А}.$$

Номинальный ток этого двигателя $I_{\text{ном}} = 28,6 \text{ А}$. Следовательно, кратность пускового тока будет

$$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}} = 14,6.$$

Допустимая кратность перегрузки двигателя по току не превышает 2...2,5. Таким образом, прямой пуск двигателя недопустим. Следует отметить, что двигатели малой мощности (менее 200...400Вт) имеют достаточно большое сопротивление якорной цепи, и для них $I_{\text{пуск}}$ может лежать в пределах допустимых значений, т.е. для таких двигателей прямой пуск допустим.

Пример 3. Расчет пускового сопротивления. Рассчитаем величину добавочного сопротивления, включение которого позволит ограничить ток до заданного значения $I_{\text{ном}}$. При пуске с добавочным сопротивлением пусковой ток будет

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{доб}}}.$$

Приняв в приведенной формуле $I_{\text{пуск}} = 2I_{\text{ном}}$, найдем требуемую величину добавочного сопротивления:

$$R_{\text{доб}} = \frac{U_{\text{ном}}}{2I_{\text{ном}}} - R_{\text{я}} = \frac{220}{2 \cdot 28,6} - 0,524 = 3,32 \text{ Ом}.$$

Электромеханическая характеристика двигателя с $R_{\text{доб}}$ приведена на рис. 2.15.

Пример 4. Расчет характеристик при введении добавочных сопротивлений. Рассчитать и построить механические характеристики двигателя при введении в цепь якоря добавочных сопротивлений $R_{\text{д1}} = 2R_{\text{яц}}$ и $R_{\text{д2}} = 5R_{\text{яц}}$, ($R_{\text{яц}}$ - сопротивление якорной цепи двигателя); определить номинальную угловую скорость двигателя и угло-

вую скорость при введении указанных сопротивлений и номинальном моменте на валу двигателя.

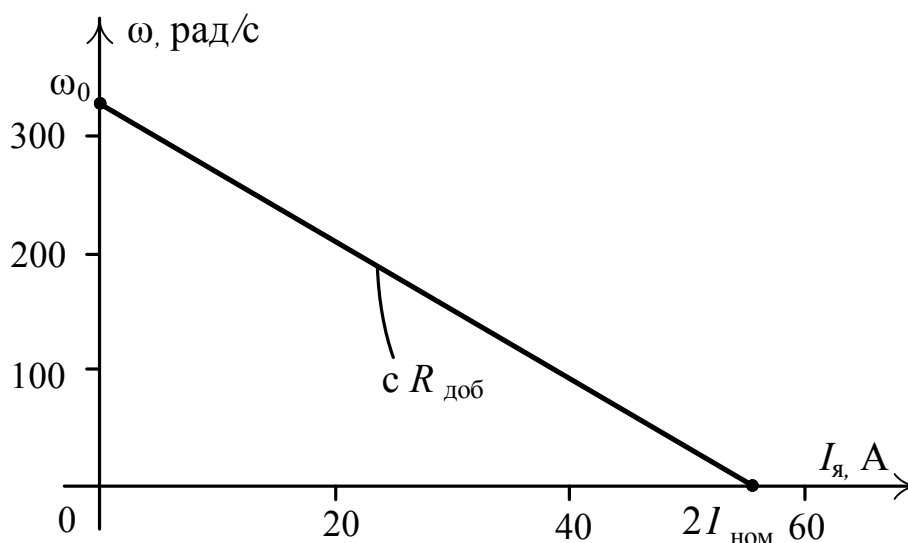


Рис. 2.15

Как отмечалось выше, при введении добавочных сопротивлений скорость холостого хода не изменяется, а меняется только падение скорости под нагрузкой.

Для построения характеристик необходимо рассчитать скорость двигателя на холостом ходу при номинальном напряжении (см. пример 1):

$$\omega_0 = K_d U_{\text{ном}} = 1,536 \cdot 220 = 338 \text{ рад/с},$$

а также падения скорости при введении первого (равного $2R_{\text{яц}}$) и второго (равного $5R_{\text{яц}}$) добавочных сопротивлений:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_1 &= K_d I_{\text{ном}} (R_{\text{яц}} + 2R_{\text{яц}}) = \\ &= 1,536 \cdot 28,6 (0,524 + 2 \cdot 0,524) = 69,1 \text{ рад/с}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\omega_2 &= K_d I_{\text{ном}} (R_{\text{яц}} + 5R_{\text{яц}}) = \\ &= 1,536 \cdot 28,6 (0,524 + 5 \cdot 0,524) = 138,1 \text{ рад/с}. \end{aligned}$$

Угловая скорость при введении добавочных сопротивлений и номинальном токе (моменте) двигателя будет:

$$\omega_1 = \omega_{01} - \Delta\omega_1 = 338 - 69,1 = 268,9 \text{ рад/с};$$

$$\omega_2 = \omega_{01} - \Delta\omega_2 = 338 - 138,1 = 199,9 \text{ рад/с}.$$

По полученным данным на рис. 2.16 построены характеристики.

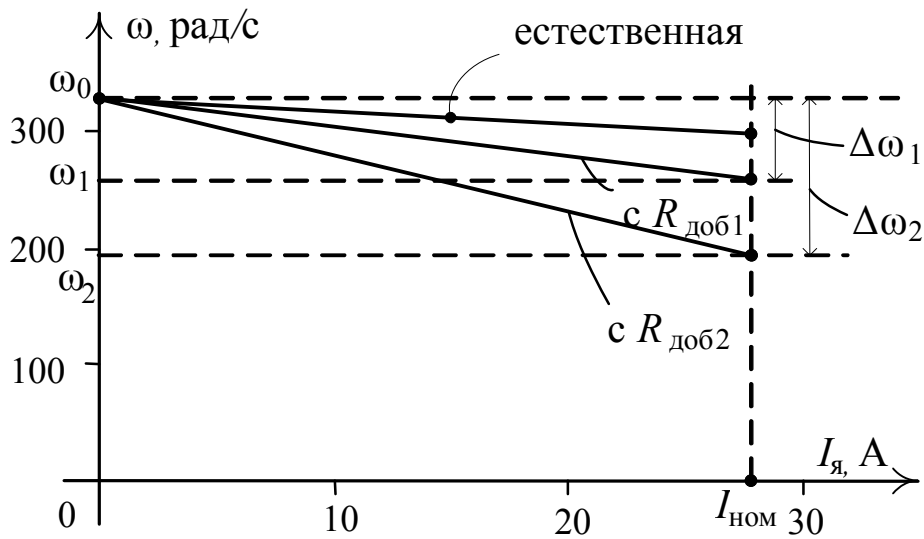


Рис. 2.16

Пример 5. Расчет добавочного сопротивления для режима торможения противовключением. Рассчитать значение добавочного сопротивления, которое нужно ввести в якорную цепь, чтобы двигатель при номинальном моменте (токе) работал в режиме торможения противовключением и вращался со скоростью $-0,5\omega_{\text{ном}}$.

Ток якоря в этом режиме, как отмечалось выше, определяется выражением

$$I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{я}} + E}{R_{\text{яц}} + R_{\text{доб}}}.$$

Для ограничения тока якоря до допустимого значения в цепь якоря необходимо вводить добавочное сопротивление $R_{\text{доб}}$. Величина ЭДС определяется выражением

$$E = \frac{\omega}{K_{\text{д}}}.$$

Примем в соответствии с заданием скорость $\omega = -0,5\omega_{\text{ном}}$, а ток $I_{\text{я}} = I_{\text{ном}}$. Тогда из последнего соотношения с учетом формулы для ЭДС получим выражение для величины добавочного сопротивления и рассчитаем его значение для рассматриваемого примера:

$$R_{\text{доб}} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}} + \frac{0,5\omega_{\text{ном}}}{K_{\text{д}}I_{\text{ном}}} - R_{\text{ящ}} = \frac{220}{28,6} + \frac{0,5 \cdot 315}{1,536 \cdot 28,6} - 0,524 = 10,77 \text{ Ом.}$$

Естественная характеристика 1 и характеристика торможения противовключения 2 показаны на рис. 2.17. Точка *a* соответствует работе двигателя на естественной характеристике с номинальным током (моментом); точка *d* - торможению противовключением с номинальным током (моментом). Стрелками условно показан переход с естественной характеристики на характеристику торможения при введении добавочного сопротивления.

Следует учитывать, что в режиме противовключения направление вращения машины противоположно заданному, машина работает в режиме генератора и создает тормозной момент. Энергия выделяется на $R_{\text{доб}}$, следовательно, этот режим торможения малоэкономичен.

Пример 6. Расчет характеристики динамического торможения. Рассчитать и построить электромеханическую характеристику двигателя в режиме динамического торможения: найти значение добавочного сопротивления, которое необходимо ввести в цепь якоря, чтобы при номинальной скорости двигатель создавал тормозной момент, равный номинальному.

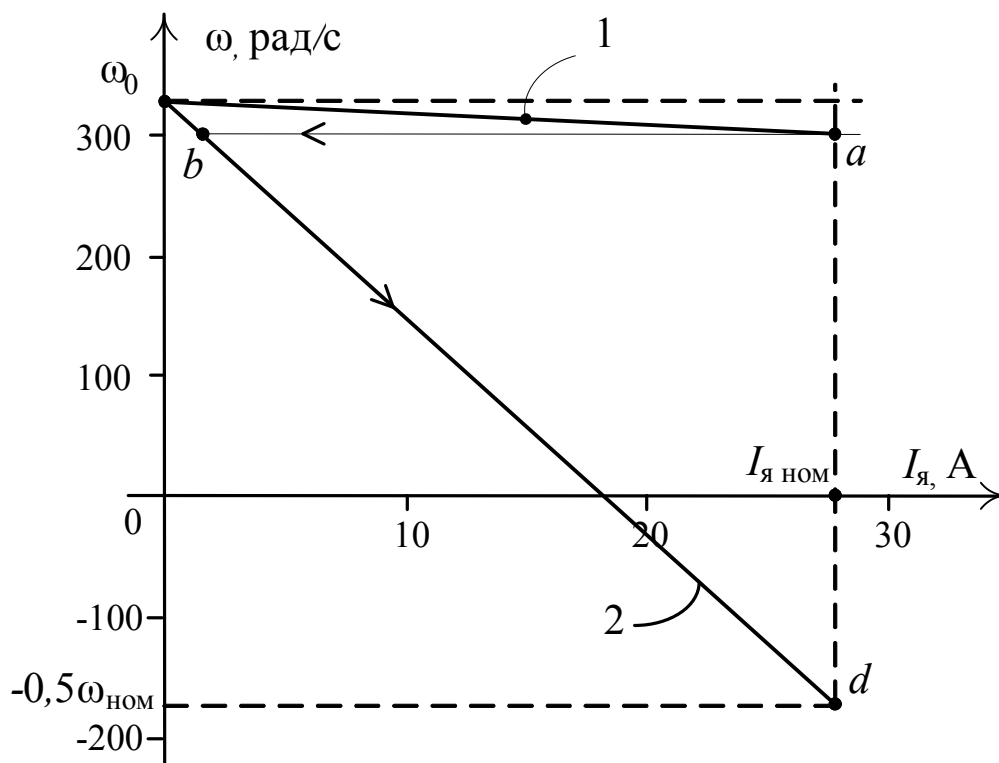


Рис. 2.17

При динамическом торможении цепь якоря замыкают на добавочное сопротивление (рис. 2.17), а обмотку возбуждения оставляют подключенной к источнику питания.

Поток возбуждения двигателя номинальный, поэтому номинальному значению момента на рис. 2.18 соответствует номинальный ток якоря. Расчеты ведем по номинальному току. В этом режиме напряжение на якоре равно нулю, и уравнение электрохимической характеристики имеет вид

$$\omega = -K_d I_{\text{я}} (R_{\text{яц}} + R_{\text{доб}}).$$

Принимаем в соответствии с заданием $\omega = \omega_{\text{ном}}$, $I_{\text{я}} = I_{\text{ном}}$ и, с учетом последнего выражения, находим

$$R_{\text{доб}} = \frac{\omega_{\text{ном}}}{K_d I_{\text{ном}}} - R_{\text{яц}} = \frac{315}{1,536 \cdot 28,6} - 0,524 = 6,646 \text{ Ом}.$$

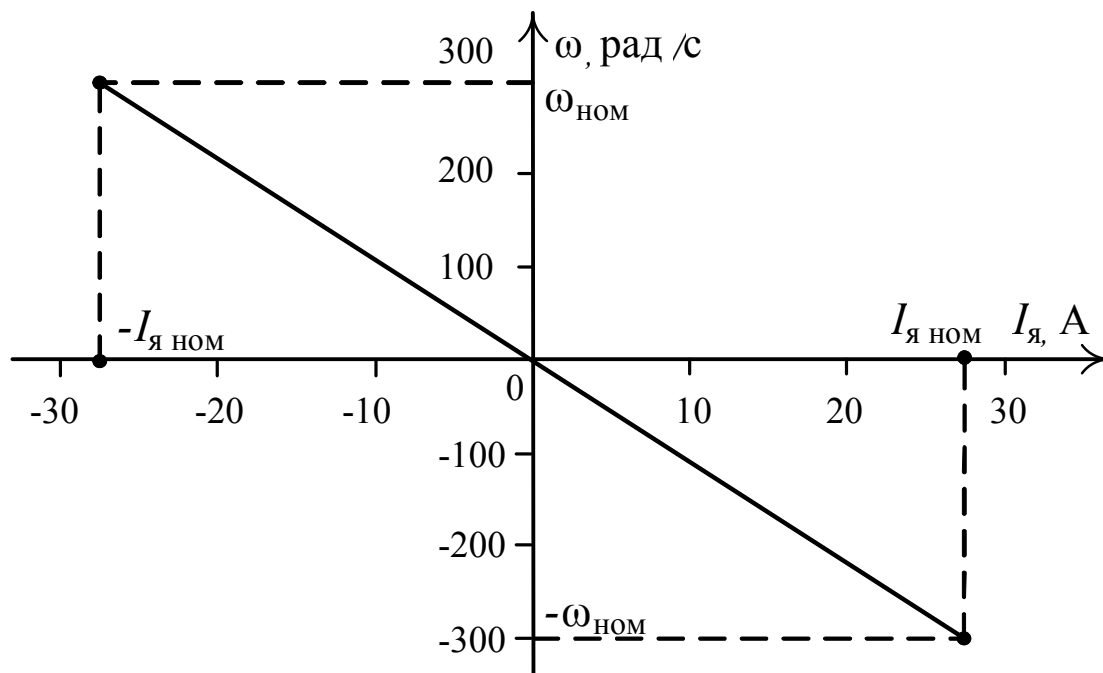


Рис. 2.18

Пример 7. Расчет характеристик при ослаблении потока возбуждения. Рассчитать и построить электромеханическую и механическую характеристики двигателя при ослаблении поля в два раза.

Схема подключения двигателя для регулирования скорости ослаблением потока возбуждения приведена на рис. 2.10.

Рассчитываем и строим *электромеханические* характеристики. Естественная характеристика строится так же, как в примере 1. Для расчета характеристики при ослаблении поля используем выражение (2.17). Из него следует, что при уменьшении потока возбуждения в 2 раза в 2 раза увеличится и первое слагаемое (скорость идеального холостого хода), и второе слагаемое (статическое падение скорости). Таким образом, при ослабленном потоке будем иметь

$$\omega_{0\text{осл}} = 2\omega_{01} = 2 \cdot 338 = 676 \text{ рад/с};$$

$$\Delta\omega_{\text{осл}} = 2\Delta\omega = 2 \cdot 23 = 46 \text{ рад/с}.$$

По полученным данным на рис. 2.19 построена электромеханическая характеристика при ослаблении поля.

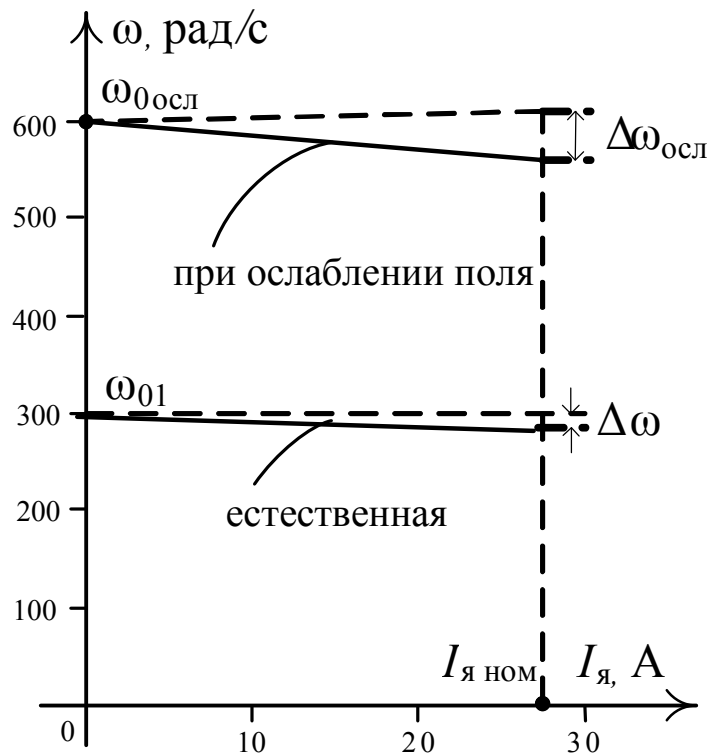


Рис. 2.19

Для построения *механической* характеристики обратимся к выражению (2.18). Из него следует, что второе слагаемое (падение скорости) зависит от квадрата потока возбуждения, и, следовательно, при ослаблении потока в 2 раза оно возрастет в 4 раза. Таким образом, при номинальном моменте получим

$$\Delta\omega_{\text{осл}} = 4\Delta\omega = 4 \cdot 23 = 92 \text{ рад/с}.$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{P_{\text{ном}}}{0,105n_{\text{ном}}} = \frac{2500}{0,105 \cdot 2120} = 11,23 \text{ Нм}.$$

По этим данным на рис. 2.20 построена механическая характеристика двигателя при ослабленном потоке возбуждения 2. Здесь же приведена естественная характеристика 1.

При расчетах падения скорости использовалось номинальное значение момента. Фактически при ослаблении потока длительная работа двигателя с номинальным моментом недопустима. Действительно, двигатель рассчитан на длительную работу с номинальным током, а момент двигателя зависит от тока якоря и потока возбуждения, поэтому при ослаблении потока возбуждения в 2 раза длительно допустимый момент также уменьшится в 2 раза:

$$M_{\text{осл}} = 0,5M_{\text{ном}}.$$

Таким образом, при ослаблении потока возбуждения на длительно допустимый момент двигателя накладываются ограничения (на рис. 2.20 показана заштрихованная линия 3 ограничения момента).

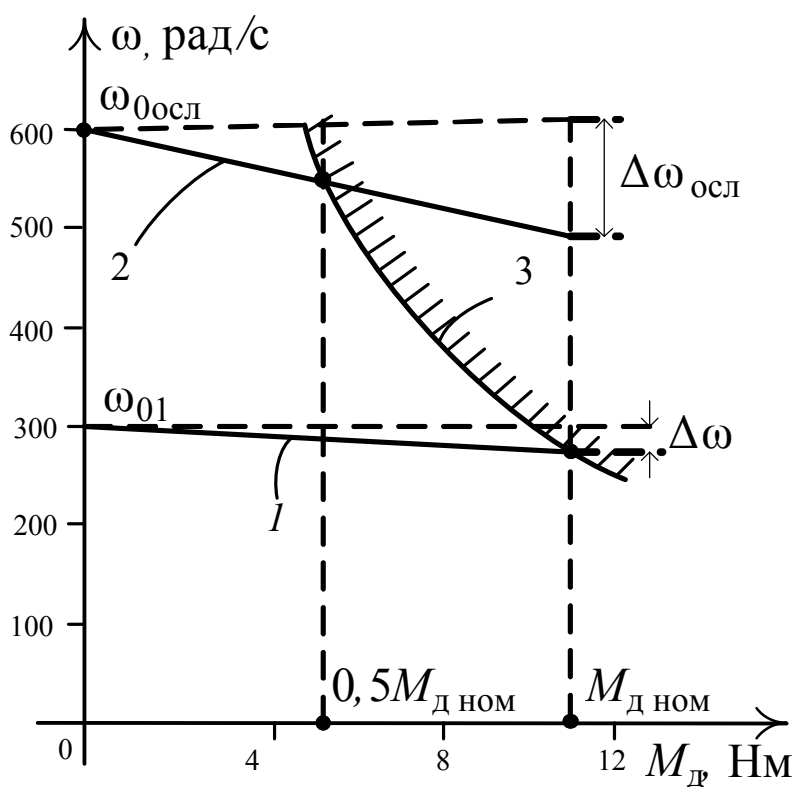


Рис. 2.20

Из приведенных рассуждений следует, что при ослаблении поля в β раз скорость идеального хода возрастает в β раз, а допустимый момент снижается в β раз.

При этом длительно допустимая мощность остается постоянной:

$$P = M\omega = \text{const}.$$

2.7. ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Для электродвигателя с постоянными магнитами (рис. 2.21) составим схему замещения (рис. 2.22).

На схеме замещения обозначены изображения по Лапласу: $U_{\text{я}}(p)$ - напряжения якоря; $E(p)$ - электродвижущей силы двигателя; $I_{\text{я}}(p)$ - тока якоря; $R_{\text{я}}$ и $pL_{\text{я}}$ - активного и индуктивного сопротивлений якорной цепи.

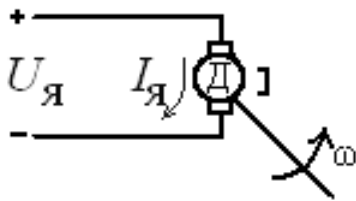


Рис. 2.21

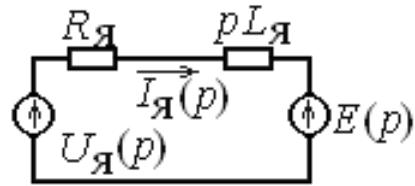


Рис. 2.22

Из схемы замещения найдем изображение тока якоря:

$$I_{\text{я}}(p) = \frac{U_{\text{я}}(p) - E(p)}{R_{\text{я}} + pL_{\text{я}}} = \frac{1}{R_{\text{я}}(1 + T_{\text{э}}p)}(U_{\text{я}}(p) - E(p)), \quad (2.19)$$

где $T_{\text{э}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$ - электромагнитная постоянная времени.

Как уже отмечалось, ЭДС двигателя при постоянном магнитном потоке Φ пропорциональна скорости вращения:

$$E = c\Phi\omega.$$

Из основного уравнения электропривода (1.6) известно, что динамический момент $M_{\text{дин}}(p)$ равен разности между электромагнитным моментом двигателя $M(p)$ и моментом сопротивления нагрузки

$M_c(p)$, т.е.

$$M_{\text{дин}}(p) = M(p) - M_c(p). \quad (2.20)$$

Момент двигателя при постоянном потоке пропорционален току якоря:

$$M(p) = c \Phi I_{\text{я}}(p).$$

В установившемся режиме двигатель развивает момент, равный моменту сопротивления:

$$M = M_c.$$

Момент сопротивления можно выразить через фиктивный ток статического сопротивления $I_c(p)$:

$$M_c(p) = c \Phi I_c.$$

В установившемся режиме $I_c = I_{\text{я}}$. Динамический момент

$$M_{\text{дин}}(p) = J_{\text{пр}} p \omega_{\text{д}} \quad (2.21)$$

пропорционален моменту инерции $J_{\text{пр}}$ электродвигателя и нагрузки и ускорению $p \omega_{\text{д}}$. При вращении с постоянной скоростью ускорение $p \omega_{\text{д}} = 0$, поэтому $M_{\text{дин}}(p) = 0$.

Подставив (2.21) в (2.20) и выразив полученное соотношение относительно скорости, получим

$$\omega_{\text{д}}(p) = (M(p) - M_c(p)) \frac{1}{J_{\text{пр}} p}. \quad (2.22)$$

Эту зависимость можно получить и в другом виде, если моменты выразить через токи, а затем полученное умножить и разделить на $R_{\text{я}}/c\Phi$:

$$\omega_{\text{д}}(p) = (I(p) - I_c(p)) \frac{c\Phi c\Phi R_{\text{я}}}{p J_{\text{пр}} c \Phi^2 R_{\text{я}}} = \frac{k_{\text{д}} R_{\text{я}}}{T_{\text{м}} p} (I(p) - I_c(p)), \quad (2.23)$$

где $k_{\text{д}} = \frac{1}{c \Phi}$ - коэффициент передачи двигателя по управляющему воз-

действию $U_{\text{я}}$; $T_{\text{м}} = \frac{J_{\text{пр}} R_{\text{я}}}{c \Phi^2}$ - электрохимическая постоянная времени.

Приведенным уравнениям (2.19), (2.22) соответствует структурная схема на рис. 2.23, а уравнениям (2.19), (2.23) - структурная схема на рис. 2.24.

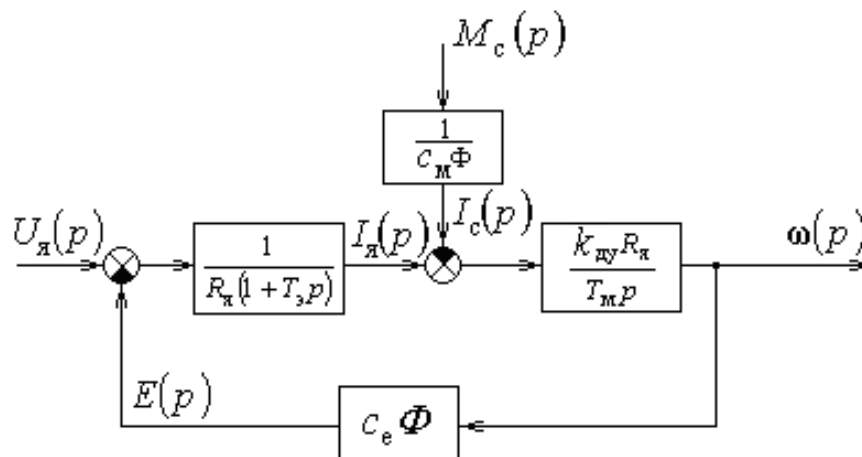


Рис. 2.23

Обе структурные схемы дают одинаковые зависимости тока $I_я(p)$ и скорости $\omega(p)$ от управляющего $U_я(p)$ и возмущающего $M_c(p)$ воздействий. Структурная схема (см. рис. 2.23) чаще встречается в отечественной литературе, а другой вид структурной схемы (см. рис. 2.24) - в зарубежных источниках.

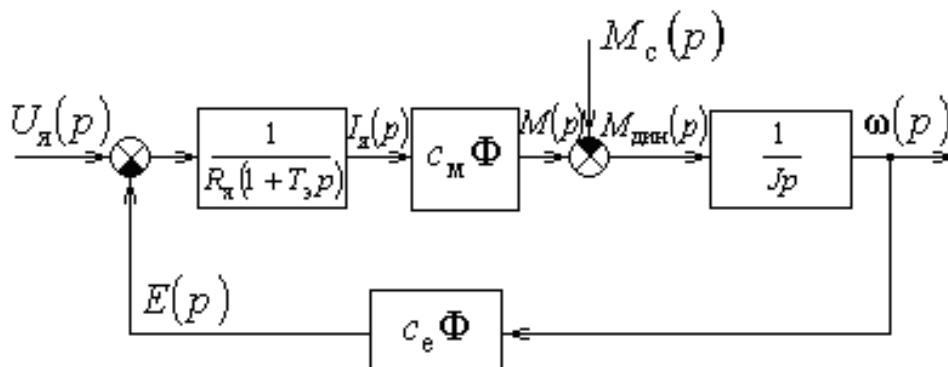


Рис. 2.24

Приведенные структурные схемы удобно использовать при расчете систем подчиненного регулирования.

При расчете динамики одноконтурных систем электропривода выражения для передаточных функций двигателя целесообразно привести к виду передаточных функций типовых звеньев.

На основании структурной схемы, представленной на рис. 2.23 или рис. 2.24, по известной из теории управления формуле можно найти передаточные функции двигателя по управляющему воздействию

$$W_{\text{д}}(p) = \frac{\omega_{\text{д}}(p)}{U_{\text{я}}(p)} = \frac{k_{\text{д}}}{T_{\text{э}}T_{\text{м}}p^2 + T_{\text{м}}p + 1} \quad (2.24)$$

и по возмущающему воздействию

$$W_{\text{дв}}(p) = \frac{\omega_{\text{д}}(p)}{M_{\text{с}}(p)} = -\frac{k_{\text{дв}}(1 + T_{\text{э}}p)}{T_{\text{э}}T_{\text{м}}p^2 + T_{\text{м}}p + 1}, \quad (2.25)$$

где $k_{\text{дв}} = \frac{k_{\text{д}}R_{\text{я}}}{c \Phi}$ - коэффициент передачи двигателя по возмущающему воздействию.

Знак минус показывает, что при набросе нагрузки скорость двигателя будет уменьшаться.

Полученные передаточные функции относятся к передаточным функциям звеньев второго порядка. Чтобы выяснить, к какому типу динамических звеньев относится передаточная функция, необходимо найти корни характеристического уравнения

$$T_{\text{э}}T_{\text{м}}p^2 + T_{\text{м}}p + 1 = 0.$$

Здесь возможны 2 случая.

1. Если выполняется неравенство $T_{\text{м}} < 4T_{\text{э}}$, то знаменатель передаточных функций (2.24), (2.25) может быть приведен к виду

$$T^2p^2 + 2\varepsilon Tp + 1.$$

При этом значения новой постоянной времени и коэффициента затухания подсчитываются по выражениям

$$T = \sqrt{T_{\text{м}}T_{\text{э}}} \text{ с};$$

$$\varepsilon = \frac{T_{\text{м}}}{2T}.$$

2. Если имеет место соотношение $T_{\text{м}} \geq 4T_{\text{э}}$, то знаменатель пе-

редаточных функций может быть записан в следующей форме:

$$(T_1 p + 1)(T_2 p + 1).$$

Для определения величин новых постоянных времени T_1 и T_2 необходимо найти корни квадратного уравнения

$$T_M T_\Sigma p^2 + T_M p + 1 = 0;$$
$$p_{1,2} = \frac{-T_M \pm \sqrt{T_M^2 - 4T_\Sigma T_M}}{2T_M T_\Sigma}.$$

Тогда постоянные времени определяются из выражений

$$T_1 = -\frac{1}{p_1} c ; T_2 = -\frac{1}{p_2} c.$$

3. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТЬЮ И ТОКОМ ЯКОРЯ ДПТ НВ В ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

3.1. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ В СИСТЕМЕ УП-ДПТ НВ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО СКОРОСТИ И ОТСЕЧКОЙ ПО ТОКУ ЯКОРЯ

Как отмечалось выше, для обеспечения большего диапазона регулирования скорости целесообразно осуществлять регулирование ω_d изменением напряжения на якоре. В простейшей схеме (см. рис. 2.7) диапазон регулирования ω_d ограничен падением скорости под нагрузкой. Этот недостаток устраняется использованием замкнутых систем с отрицательной обратной связью по угловой скорости. Функциональная схема такой системы приведена на рис. 3.1. Она содержит двигатель М, выходной величиной которого является угловая скорость ω_d ; управляемый преобразователь УП, создающий регулирую-

щее воздействие $U_{\text{я}}$ на двигатель; усилитель Y , на входе которого сравниваются напряжение $U_{\text{зд}}$ и напряжение обратной связи $U_{\text{ос}}$. Напряжение $U_{\text{зд}}$ создается задатчиком скорости (ЗС). В качестве датчика обратной связи используется тахогенератор BR , напряжение на выходе которого $U_{\text{ос}}$ пропорционально $\omega_{\text{д}}$.

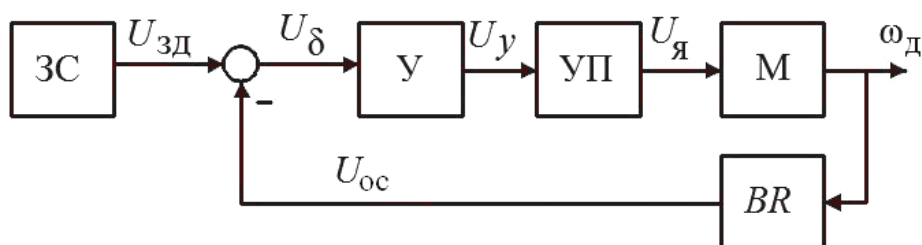


Рис. 3.1

На выходе узла сравнения сигналов (на схеме узел показан в виде окружности) формируется напряжение ошибки

$$U_{\delta} = U_{\text{зд}} - U_{\text{ос}}. \quad (3.1)$$

Как известно из теории автоматического управления, в замкнутой системе обеспечивается стабилизация регулируемой переменной - в данном случае $\omega_{\text{д}}$.

Напомним, как протекает этот процесс. Если, например, под действием сил нагрузки $\omega_{\text{д}}$ начинает снижаться, то уменьшается $U_{\text{ос}}$, а напряжение U_{δ} , в соответствии с выражением (3.1), начинает увеличиваться. При этом возрастает напряжение на выходе усилителя U_y и якоря двигателя $U_{\text{я}}$. В результате угловая скорость стремится к заданному значению. Несложно убедиться, что в случае возрастания $\omega_{\text{д}}$ действие обратной связи приведет к снижению $U_{\text{я}}$, и угловая скорость вновь будет стремиться к заданной.

Таким образом, в замкнутой системе удастся получить механические характеристики, близкие к абсолютно жестким (см. участок характеристики для $I_{\text{я}} < I_{\text{отс}}$ на рис. 3.2) и обеспечить достаточно малые значения нижней скорости $\omega_{\text{н}}$. Иными словами, в такой схеме удастся реализовать большой диапазон регулирования скорости.

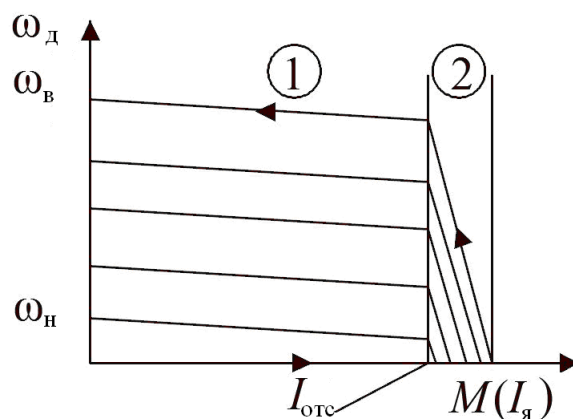


Рис. 3.2

Упрощенная принципиальная схема рассматриваемой системы приведена на рис. 3.3. Датчиком скорости в схеме является тахогенератор BR - машина постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, вал которой механически соединен с валом двигателя M . Машина BR работает в режиме генератора, и ее ЭДС - напряжение обратной связи U_{OC} пропорционально ω_d .

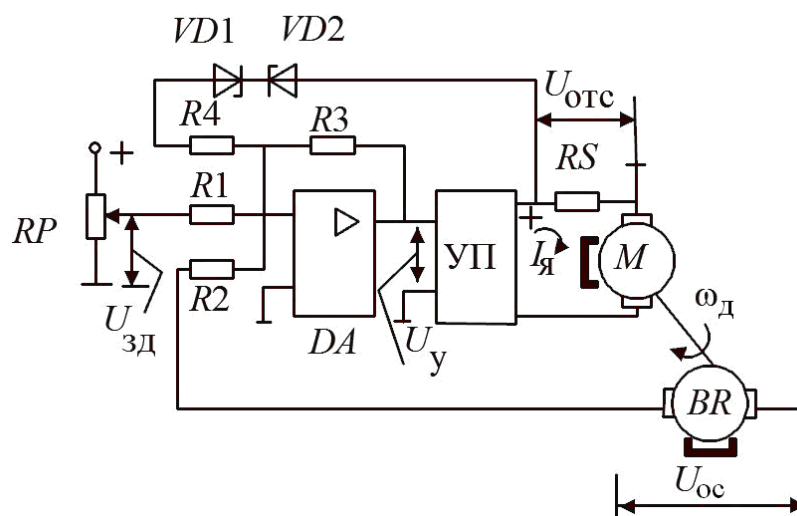


Рис. 3.3

Сравнение электрических сигналов в современных схемах осуществляется на входе операционного усилителя DA . На его инвертирующий вход через резистор $R1$ подается напряжение задания $U_{зд}$, снимаемое с потенциометра RP (задатчика скорости), а через $R2$ - напряжение U_{OC} .

На входе усилителя происходит сравнение (вычитание) этих сиг-

налов в соответствии с (3.1), а напряжение на выходе усилителя

$$U_y = K_y U_\delta,$$

где K_y - коэффициент усиления усилителя.

В цепь обратной связи операционного усилителя включен резистор R_3 , определяющий значение K_y .

Рассмотренные узлы и элементы схемы обеспечивают ее работу в режиме стабилизации скорости, однако для нормальной работы электропривода этого недостаточно. Действительно, если произойдет, например, поломка механизма, порождающая возрастание момента статического сопротивления, то соответственно будут нарастать ток якоря и момент двигателя. Недопустимое нарастание тока якоря возникает также при пуске двигателя и других переходных режимах.

Для исключения подобных ситуаций схема должна быть **дополнена узлом ограничения тока якоря**. Один из возможных вариантов реализации этого узла показан на рис. 3.3 (его также называют **узлом токовой отсечки**). Он включает датчик тока якоря - шунт RS , включенный в якорную цепь и стабилитроны $VD1$, $VD2$. Сигнал $U_{отс}$ с шунта RS может поступать на вход операционного усилителя через $VD1$, $VD2$ и резистор R_4 .

Рассмотрим работу схемы. При проектировании схемы задаются значением тока отсечки $I_{отс}$. С учетом допустимой кратковременной перегрузки двигателя его обычно принимают $I_{отс} = (2...2,5)I_{ном}$. Напряжение стабилизации стабилитронов выбирают

$$U_z = I_{отс} \cdot RS.$$

Тогда при токе якоря $I_y < I_{отс}$ напряжение $U_{отс} < U_z$. Для полярности напряжения $U_{отс}$, показанной на рис. 3.3, стабилитрон $VD1$ включен в обратном направлении. Его сопротивление при $U_{отс} < U_z$ велико, и напряжение $U_{отс}$ не поступает на вход DA . В результате узел токовой отсечки при токах $I_y < I_{отс}$ не оказывает влияния на работу схемы - система работает в режиме стабилизации скорости (1-й участок на рис. 3.2).

Если же ток якоря превысит ток отсечки $I_{\text{я}} > I_{\text{отс}}$, то напряжение на шунте $U_{\text{отс}}$ станет больше U_z . Сопротивление стабилитрона при этом резко снизится (стабилитрон «пробьется»), и на вход DA будет поступать дополнительный сигнал $(U_{\text{отс}} - U_z)$. Этот сигнал вычитается из сигнала задания, т.е. теперь сигнал ошибки будет

$$U_{\delta} = U_{\text{зд}} - U_{\text{ос}} - (U_{\text{отс}} - U_z). \quad (3.2)$$

Схема переходит в режим стабилизации тока якоря (2-й участок на рис. 3.2). При возрастании тока $I_{\text{я}}$ увеличивается напряжение $U_{\text{отс}}$, а сигнал ошибки U_{δ} уменьшается. Это ведет к снижению напряжения на выходе усилителя $U_{\text{у}}$, уменьшается также $U_{\text{я}}$ и $\omega_{\text{д}}$. В итоге двигатель останавливается.

В реверсивном электроприводе полярность напряжения на шунте изменяется, поэтому необходимо использовать два стабилитрона, включенных встречно.

Как следует из изложенного, в схеме для ограничения тока якоря используется отрицательная обратная связь по току якоря. В отличие от обратной связи по скорости *связь по току задержанная* - она вступает в действие только тогда, когда ток якоря превышает ток отсечки.

Узел токовой отсечки обеспечивает ограничение тока якоря также *в переходных режимах*. Например, при пуске двигателя в начальный момент сигнал тахогенератора $U_{\text{ос}} = 0$, а сигнал ошибки U_{δ} значительно превышает установившееся значение, поэтому напряжения $U_{\text{у}}$ и $U_{\text{я}}$ начинают интенсивно нарастать.

Поскольку $\omega_{\text{д}}$ и ЭДС двигателя пока малы, ток якоря резко возрастает, и вступает в действие токовая отсечка. Следовательно, разгон двигателя идет при ограниченном значении тока (на рис. 3.2 процесс изменения $I_{\text{я}}$ при пуске условно показан стрелками).

По мере разгона двигателя $\omega_{\text{д}}$ ЭДС двигателя и сигнал обратной связи по скорости $U_{\text{ос}}$ возрастают, а сигнал U_{δ} уменьшается. При подходе к заданной скорости ток якоря начинает спадать, и система переходит в режим стабилизации заданного значения скорости

(например ω_B на рис. 3.2).

Таким образом, *задержанная отрицательная обратная связь в электроприводе обеспечивает ограничение тока (момента) двигателя в переходных режимах и в ситуациях, связанных с недопустимым возрастанием момента сопротивления производственного механизма.*

3.2. УРАВНЕНИЕ СТАТИКИ СИСТЕМЫ УП-ДПТ НВ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Важнейшим показателем качества работы электропривода в установившихся режимах является значение статической ошибки в поддержании скорости. Статическая ошибка возникает из-за изменения нагрузки, отклонений сетевого напряжения, дрейфа нуля усилителя и других возмущений. Наибольший «вклад» в величину статической ошибки, во многих случаях, вносит изменение нагрузки. Использование отрицательной обратной связи по скорости позволяет уменьшить статическую ошибку. Получим количественные соотношения для оценки значения статической ошибки $\Delta\omega_d$, вызванной изменением нагрузки, и выясним, за счет чего можно обеспечить требуемую точность поддержания угловой скорости.

Для анализа статической точности систем, как известно из теории автоматического управления, целесообразно использовать алгоритмическую (структурную) схему системы. Алгоритмическая схема системы с отрицательной обратной связью по угловой скорости показана на рис. 3.4.

Свойства отдельных звеньев отражены на ней соответствующими коэффициентами передачи: K_y – усилителя; $K_{yп}$ – управляемого преобразователя; K_d – двигателя; K_{BR} – тахогенератора. Падение напряжения в якорной цепи двигателя и управляемого преобразователя при номинальном токе $I_{ном}$ учтено помехой нагрузки

$$h_H = I_{\text{НОМ}}(R_{\text{я}} + R_{\text{УП}}), \quad (3.3)$$

где $R_{\text{я}}$, $R_{\text{УП}}$ - сопротивление якорной цепи двигателя и выходное сопротивление УП.

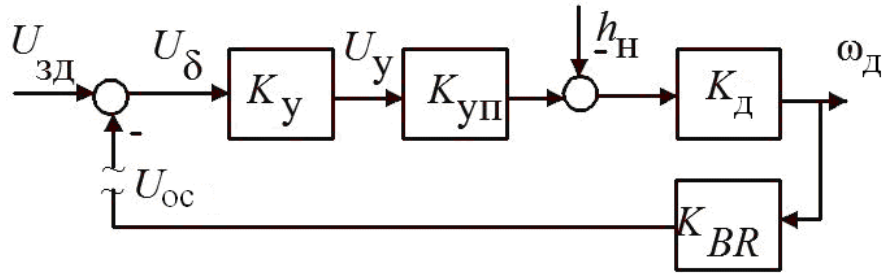


Рис. 3.4

Запишем уравнение для разомкнутой системы (размыкание системы по цепи обратной связи условно показано на рис. 3.4 волнистыми линиями). На основе принципа суперпозиции сигнал на выходе системы можно представить в виде двух составляющих. Одна из них зависит от $U_{\text{зд}}$, а вторая - от h_H :

$$\omega_{\text{д}} = K_{\text{у}}K_{\text{УП}}K_{\text{д}}U_{\text{зд}} - K_{\text{д}}h_H. \quad (3.4)$$

Первая составляющая представляет собой угловую скорость ω_0 на холостом ходу, а вторая - **статическую ошибку разомкнутой системы** (падение угловой скорости от нагрузки в разомкнутой системе - кривая 1 на рис. 3.5):

$$\Delta\omega_{\text{р}} = K_{\text{д}}h_H = K_{\text{д}}I_{\text{НОМ}}(R_{\text{я}} + R_{\text{УП}}). \quad (3.5)$$

Здесь принято, что статический момент может изменяться от нуля до номинального значения, и рассматривается полное падение скорости от нагрузки.

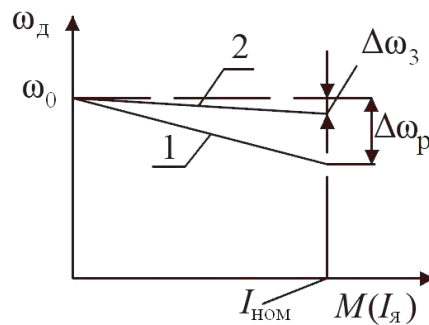


Рис. 3.5

Уравнение для замкнутой системы записывается из аналогичных

соображений; необходимо только учесть, что в замкнутой системе на вход поступает сигнал ошибки $U_{\delta} = U_{зд} - U_{ос}$:

$$\omega_d = K_y K_{уп} K_d U_{\delta} - K_d h_n. \quad (3.6)$$

Напряжение обратной связи, как следует из алгоритмической схемы, можно определить через выходной сигнал системы

$$U_{ос} = K_{BR} \omega_d,$$

тогда

$$U_{\delta} = U_{зд} - K_{BR} \omega_d.$$

Подставив последнее выражение для U_{δ} в (3.6), после несложных преобразований получим

$$\omega_d = \frac{K_y K_{уп} K_d}{1 + K_y K_{уп} K_d K_{BR}} U_{зд} - \frac{K_d h_n}{1 + K_y K_{уп} K_d K_{BR}}. \quad (3.7)$$

Первый член в этом выражении, так же, как в (3.4), - это угловая скорость двигателя ω_0 , но в замкнутой системе. Второй член - **статическая ошибка замкнутой системы** (падение угловой скорости $\Delta\omega_3$ от нагрузки в замкнутой системе). Проанализируем эту составляющую подробнее. Произведение коэффициентов передачи звеньев одноконтурной системы называют **коэффициентом усиления системы в разомкнутом состоянии** (или просто коэффициентом усиления разомкнутой системы):

$$K_y K_{уп} K_d K_{BR} = K_p. \quad (3.8)$$

С учетом этого понятия и выражения (3.5) для статической ошибки разомкнутой системы **статическую ошибку замкнутой системы** можно представить в виде

$$\Delta\omega_3 = \frac{\Delta\omega_p}{1 + K_p}. \quad (3.9)$$

Аналогичное соотношение несложно получить и для относитель-

ных статических ошибок:

$$\Delta_3 = \frac{\Delta_p}{1 + K_p}. \quad (3.10)$$

Из уравнений (3.9), (3.10) следует, что абсолютная и относительная *статические ошибки от нагрузки в замкнутой системе уменьшаются в $(1+K_p)$ раз по сравнению с разомкнутой*.

Очевидно, что для уменьшения статических ошибок $\Delta\omega_3$, Δ_3 до допустимых пределов необходимо увеличивать K_p . Коэффициенты передачи управляемого преобразователя $K_{уп}$, двигателя K_d , тахогенератора K_{BR} , входящие в выражение для K_p , обычно заданы достаточно жестко, и нужное значение K_p обеспечивается выбором соответствующего значения K_y . Известно, что если в цепь обратной связи операционного усилителя включить конденсатор, то усилитель приобретает свойства *интегрирующего звена*. Коэффициент передачи идеального интегрирующего звена $K_y = K_{и} \rightarrow \infty$. В этом случае и $K_p \rightarrow \infty$, а статическая ошибка $\Delta\omega_3$ в соответствии с выражением (3.10) стремится к нулю, поэтому в современных системах электропривода на операционном усилителе обычно реализуют интегрирующее звено (см. п. 3.7). В связи с тем, что коэффициент усиления реальных операционных усилителей имеет конечное значение, реальный интегральный регулятор имеет не бесконечное, но достаточно большое значение коэффициента передачи. В результате статическая ошибка в замкнутой системе сводится не до нуля, но до весьма малых значений.

В современных приводах, выполненных в виде замкнутых систем с интегральными регуляторами, удастся на нижней скорости обеспечить относительную ошибку не более $10 \div 15\%$ при диапазоне регулирования $D=1000 \div 10000$.

Если, например, имеется электропривод с диапазоном регулирования $D = 10000$ и наибольшей (верхней) частотой вращения $n_B = 1000$ об/мин, соответственно, $\omega_B = 0,105 \cdot n_B = 105$ рад/с, то на нижнем пределе диапазона скорость будет

$$n_H = \frac{n_B}{D} = \frac{1000}{10000} = 0,1 \text{ об/мин};$$

$$\omega_H = 0,105 \cdot n_H = 0,0105 \text{ рад/с}.$$

При этом, чтобы относительная ошибка не превышала 10%, абсолютное падение скорости должно быть не больше

$$\Delta n_H = 10\% \cdot n_H = 0,01 \text{ об/мин};$$

$$\Delta \omega_H = 0,105 \cdot \Delta n_H = 0,00105 \text{ рад/с}.$$

Отсюда видно, насколько жесткие требования обеспечиваются в современных широкорегулируемых электроприводах.

3.3. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ В СИСТЕМЕ УП-ДПТ НВ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО НАПРЯЖЕНИЮ

Упрощенная принципиальная схема рассматриваемой системы показана на рис. 3.6 (узел токовой отсечки на схеме не показан).

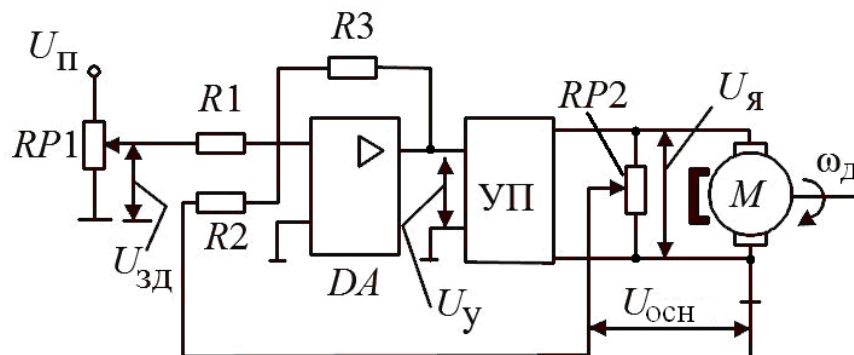


Рис. 3.6

Схема отличается от рассмотренной выше с обратной связью по скорости (см. рис. 3.3) только тем, что в ней сигнал обратной связи снимается с потенциометра $RP2$ и пропорционален напряжению на якоре $U_{Я}$. Конструктивно система несколько проще за счет отсутствия тахогенератора. Регулирование скорости здесь также осуществляется изменением напряжения на якоре.

На входе системы сравниваются сигнал задания $U_{ЗД}$ и сигнал обратной связи по напряжению на якоре $U_{ОСН}$. Сигнал ошибки

$$U_{\delta} = U_{зд} - U_{осн}. \quad (3.11)$$

Регулируемой переменной в схеме является напряжение на якоре $U_{я}$. Процесс стабилизации $U_{я}$ протекает следующим образом. Если, например, нагрузка на двигателе возрастает, то ток якоря увеличивается, и возрастает падение напряжения в преобразователе. Это ведет к снижению напряжения на выходе УП, поступающего на якорь двигателя:

$$U_{я} = E_{уп} - I_{я}R_{уп},$$

где $E_{уп}$ - ЭДС преобразователя; $R_{уп}$ - выходное сопротивление преобразователя.

Соответственно снижается сигнал обратной связи $U_{осн}$, а сигнал ошибки U_{δ} увеличивается. Это, в свою очередь, приводит к возрастанию напряжения на выходе усилителя и напряжения $U_{я}$. Обратите внимание, что в схеме стабилизируется не скорость двигателя $\omega_{д}$, а напряжение на якоре $U_{я}$. Очевидно, что при идеальной стабилизации $U_{я}$ падение скорости от нагрузки будет таким же, как на естественной характеристике при питании двигателя от сети бесконечной мощности.

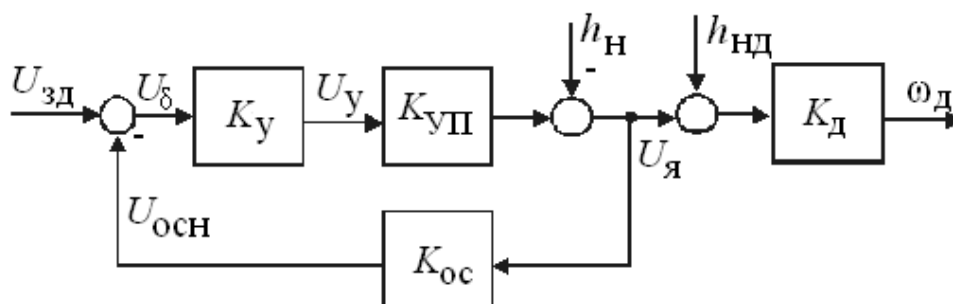


Рис. 3.7

К этому же выводу можно прийти и анализируя алгоритмическую схему системы, показанную на рис. 3.7. На этой схеме отдельно показаны помеха нагрузки преобразователя $h_{нп} = I_{ном}R_{уп}$ и помеха нагрузки двигателя $h_{нд} = I_{ном}R_{я}$. Причем помеха нагрузки двигателя не охвачена цепью обратной связи. Действием отрицательной обратной связи ослабляются только те помехи, которые охвачены цепью обратной свя-

зи, поэтому уравнение для угловой скорости двигателя в замкнутой системе с обратной связью по напряжению записывается в виде

$$\omega_d = \frac{K_y K_{уп}}{1 + K_y K_{уп} K_{ос}} U_{зд} - \frac{K_d h_{нп}}{1 + K_y K_{уп} K_{ос}} - K_d h_{нд}. \quad (3.12)$$

Произведение коэффициентов $K_y K_{уп} K_{ос} = K_{рн}$ представляет собой коэффициент усиления разомкнутой системы со связью по напряжению. Первый член в уравнении (3.12) - угловая скорость двигателя на холостом ходу; второй - падение скорости от нагрузки преобразователя; третий - падение скорости от нагрузки двигателя.

Очевидно, что, выбрав $K_{рн} \rightarrow \infty$, можно свести до нуля второй член (получить идеальный преобразователь с нулевым выходным сопротивлением), однако третий член при этом уменьшить не удастся. Падение скорости от нагрузки определяется падением напряжения в якоре двигателя

$$\Delta\omega = K_d I_{ном} R_{я}.$$

В связи с этим в системе с отрицательной обратной связью по напряжению не удастся обеспечить высокую точность стабилизации скорости. Такие системы применяются при нежестких требованиях к допустимой статической ошибке и небольшом диапазоне регулирования ($D = 5 \div 10$).

3.4. РЕГУЛЯТОРЫ В СИСТЕМАХ ЭП

Как уже отмечалось, современные автоматизированные электроприводы выполняются в виде замкнутых систем автоматического управления. При этом возникает задача обеспечения устойчивости замкнутой системы и требуемых показателей качества регулирования. Эти задачи решаются введением в систему операционных усилителей, охваченных определенными видами обратных связей. Такие усилители в системах автоматического регулирования принято называть регуляторами. Кроме того, на входе усилителя удобно осуществлять опера-

цию сравнения электрических сигналов. Схема *суммирующего усилителя* (пропорционального регулятора) приведена на рис. 3.8.

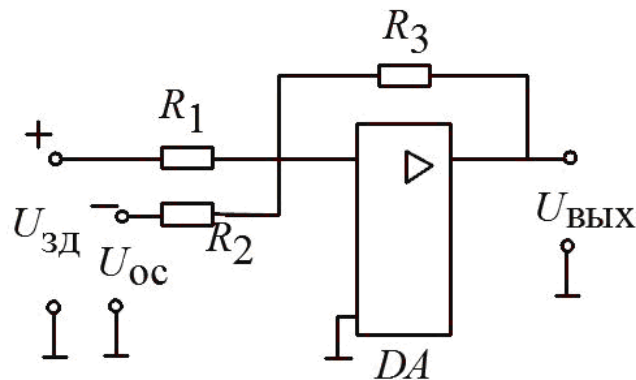


Рис. 3.8

На инвертирующий вход (на схеме помечен окружностью) усилителя DA подается: через резистор R_1 - сигнал задания $U_{зд}$; через резистор R_2 - сигнал отрицательной обратной связи $U_{ос}$ (например сигнал обратной связи по скорости двигателя). Известно, что динамические свойства операционного усилителя, охваченного обратной связью, приближенно можно описать передаточной функцией

$$W(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)} = \frac{Z'_{ос}(p)}{Z_{\text{ВХ}}(p)}, \quad (3.13)$$

где $Z'_{ос}(p)$, $Z_{\text{ВХ}}(p)$ - операторное сопротивление обратной связи самого усилителя и входной цепи соответственно.

Для рассматриваемой схемы $Z'_{ос}(p) = R_3$; входное сопротивление для задающего сигнала $Z_{\text{ВХ}}(p) = R_1$, а для сигнала обратной связи $Z'_{\text{ВХ}}(p) = R_2$. В результате передаточная функция регулятора вырождается в коэффициент передачи. Причем, если $R_1 = R_2$, то коэффициент передачи по обоим входам усилителя один и тот же:

$$K_y = \frac{R_3}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}.$$

Напряжение на выходе усилителя

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{зд}} K_y - U_{\text{ос}} K_y = (U_{\text{зд}} - U_{\text{ос}}) K_y.$$

Последнему выражению соответствует структурная схема, представ-

ленная на рис. 3.9.

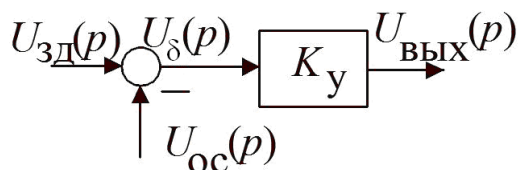


Рис. 3.9

Рассматриваемая схема обеспечивает сравнение (вычитание) напряжений и усиление сигнала ошибки $U_\delta = U_{зд} - U_{ос}$. Приведенную схему (см. рис. 3.8) называют **пропорциональным регулятором**, или сокращенно **П-регулятором**.

Такой регулятор при скачке сигнала на входе обеспечивает на выходе также скачкообразное изменение сигнала.

Для уменьшения статической ошибки, как отмечалось выше, необходимо вводить в систему интегрирующее звено. Схема **интегрального регулятора (И-регулятора)** приведена на рис. 3.10 (для простоты считаем здесь и далее $R_1 = R_2$).

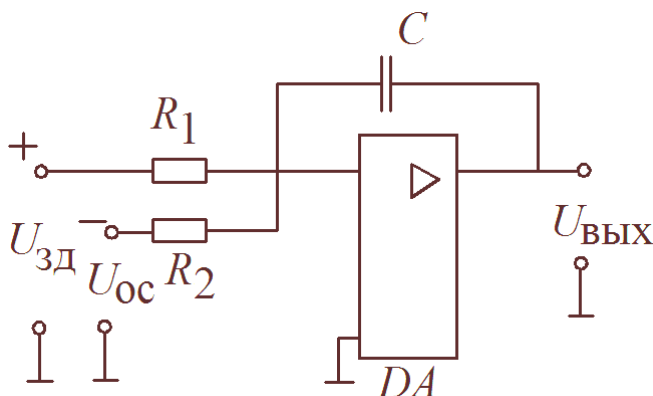


Рис. 3.10

На основании выражения (3.13) несложно получить передаточную функцию регулятора

$$W(p) = \frac{1}{T_{\text{и}} p},$$

где $T_{\text{и}} = R_2 C$ - постоянная времени интегрирующего преобразования.

Передаточная функция соответствует интегрирующему (астатическому) звену.

При скачкообразном изменении сигнала U_{δ} напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ линейно нарастает (рис. 3.11).

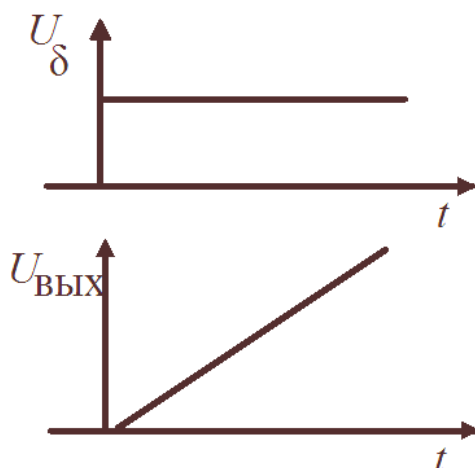


Рис. 3.11

Учитывая свойства И–регулятора «накапливать» входной сигнал, можно дать следующее пояснение особенностям работы астатической системы. Если в системе появляется сигнал ошибки, то напряжение на выходе регулятора начинает изменяться и соответственно изменяется воздействие на двигатель. Этот процесс продолжается до тех пор, пока сигнал ошибки не будет сведен к нулю, т.е. пока не будет достигнуто равенство

$$U_{\text{ос}} = U_{\text{зд}}.$$

Выполнение же этого равенства означает, что регулируемая величина равна заданной, т.е. статическая ошибка системы сведена к нулю.

Отметим, что для сведения статической ошибки к нулю необходим идеальный И–регулятор. В реальной схеме операция интегрирования выполняется с некоторой погрешностью, поэтому статическая ошибка в замкнутой системе сводится не до нуля, но, как правило, до достаточно малых значений.

Структурная схема И –регулятора приведена на рис. 3.12.

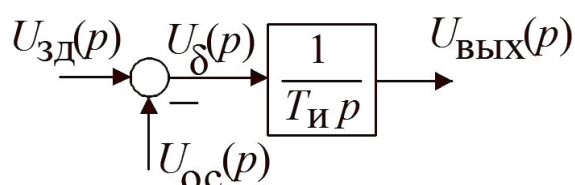


Рис. 3.12

И-регулятор обеспечивает сравнение сигналов $U_{зд}$ и $U_{ос}$, а его выходное напряжение пропорционально интегралу от сигнала ошибки:

$$U_{ВЫХ}(t) = \frac{1}{T_{и}} \int_0^t U_{\delta}(t) dt.$$

Схема пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятора) приведена на рис. 3.13.

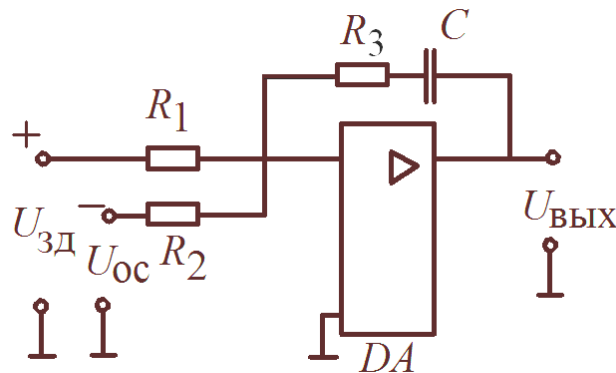


Рис. 3.13

В цепь обратной связи операционного усилителя последовательно включены резистор R_3 и емкость C . На основании выражения (3.13) несложно найти передаточную функцию регулятора:

$$W(p) = \frac{Tp + 1}{T_{и}p}, \quad (3.14)$$

где $T = R_3C$, $T_{и} = R_2C$ - соответственно постоянные времени дифференцирующего и интегрирующего преобразования.

Передаточную функцию (3.14) можно записать и в другом виде. Деля почленно числитель на знаменатель, получим

$$W(p) = \frac{1}{T_{и}p} + K,$$

где $K = T/T_{и}$ - коэффициент усиления пропорциональной части регулятора. Как следует из последнего выражения, передаточную функцию можно представить в виде суммы пропорциональной (П) части и интегральной (И) части. Отсюда название регулятора. Реакция ПИ-регулятора на скачкообразное изменение сигнала U_{δ} приведена на рис. 3.14.

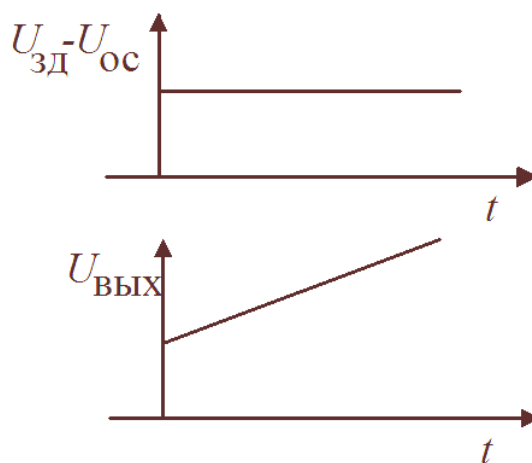


Рис. 3.14

Сравнивая рис. 3.14 и 3.11, можно отметить, что ПИ-регулятор в первый момент времени более «энергично» воздействует на управляемый преобразователь и соответственно на двигатель. Благодаря этому быстродействие системы в принципе может быть улучшено.

Схема пропорционально - интегрально - дифференциального регулятора (ПИД-регулятора) приведена на рис. 3.15.

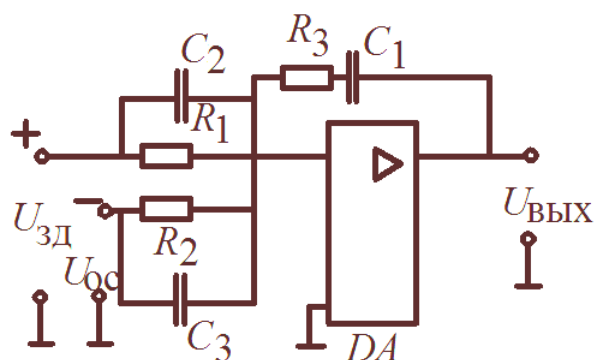


Рис. 3.15

По сравнению с предыдущей схемой здесь добавлены емкости C_2 и C_3 , включенные параллельно резисторам R_1 , R_2 . Иногда емкость включают только параллельно R_2 . Тогда для сигнала обратной связи схема имеет свойства ПИД - регулятора, а для сигнала задания - свойства ПИ - регулятора.

Используя выражение (3.13), передаточную функцию рассматриваемого регулятора можно записать в виде

$$W(p) = \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}{T_u p}, \quad (3.15)$$

где постоянные времени дифференцирования T_1 , T_2 и интегрирования T_u определяются соотношениями

$$T_1 = R_3 \cdot C_1; \quad T_2 = R_2 \cdot C_3; \quad T_u = R_2 \cdot C_1.$$

Раскрыв скобки в числителе (3.15) и деля почленно числитель на знаменатель, получим передаточную функцию ПИД - регулятора в виде

$$W(p) = K + \frac{1}{T_u p} + Tp, \quad (3.16)$$

где $K = (T_1 + T_2)/T_u$; $T = T_1 \cdot T_2/T_u$.

Как следует из последнего выражения, передаточная функция может быть представлена в виде суммы трех слагаемых:

первое слагаемое - пропорциональное звено;

второе - интегральное;

третье - дифференциальное.

Реакция ПИД - регулятора на скачок сигнала U_δ приведена на рис. 3.16.

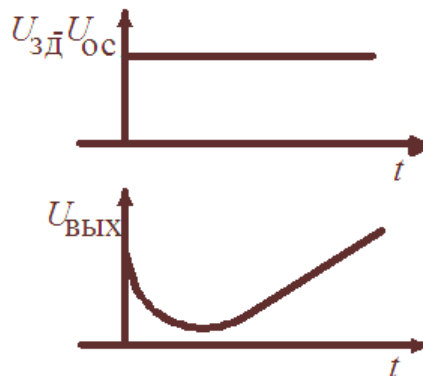


Рис. 3.16

Можно отметить, что в начальный момент времени при появлении сигнала рассогласования ПИД - регулятор обеспечивает еще более «энергичное» воздействие, чем ПИ - регулятор.

Отметим, что описанное влияние различных регуляторов на динамические свойства системы поясняет лишь качественный характер процессов. Вопрос о выборе того или иного типа регулятора и его параметров решается при синтезе корректирующих звеньев.

3.5. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ В СИСТЕМЕ ГЕНЕРАТОР-ДВИГАТЕЛЬ (Г-Д) С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО СКОРОСТИ И ТОКОВОЙ ОТСЕЧКОЙ

Упрощенная схема системы Г-Д приведена на рис. 3.17. Она содержит двигатель постоянного тока независимого возбуждения M ; генератор постоянного тока G , от которого получает питание якорь двигателя; усилитель мощности $УМ$, к выходу которого подключена обмотка возбуждения $ОВГ$ генератора; регулятор, выполненный на операционном усилителе DA ; задатчик частоты вращения RP ; тахогенератор BR ; датчик тока якоря - шунт Rh ; стабилитроны $VD1$, $VD2$. Генератор G приводится в движение приводным (гонным) двигателем (на схеме не показан). На промышленных предприятиях, где имеется сеть переменного тока, в качестве гонного двигателя используется асинхронный короткозамкнутый двигатель. В автономных установках, например на удаленных буровых установках, судах речного, морского, железнодорожного транспорта и т.п., в качестве приводного двигателя могут служить двигатель внутреннего сгорания, паровая или газовая турбина и т.п.

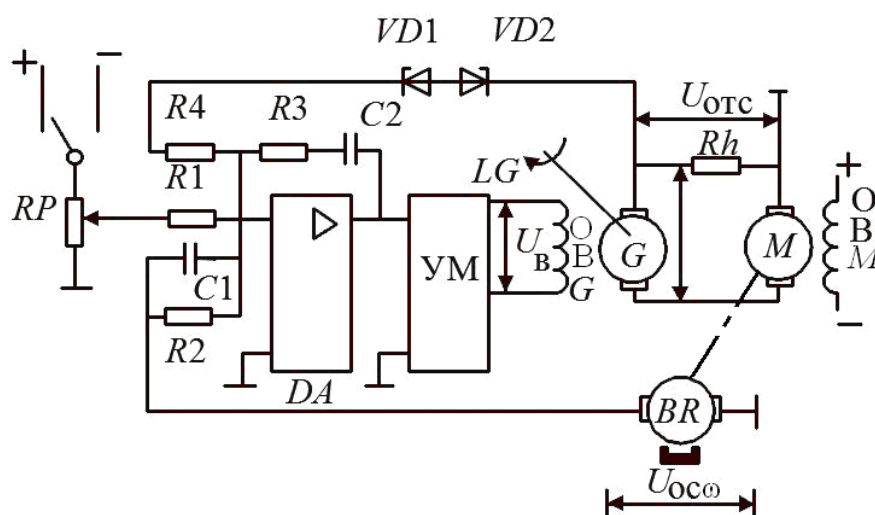


Рис. 3.17

Регулирование угловой скорости двигателя в схеме осуществляется изменением напряжения $U_{я}$ на якоре двигателя M . Изменение $U_{я}$ осуществляется за счет регулирования напряжения $U_{в}$ на обмотке возбуждения генератора. Для согласования между напряжением и

мощностью на выходе регулятора с потребной мощностью и напряжением питания обмотки ОВГ служит усилитель мощности, например транзисторный усилитель.

Стабилизация скорости двигателя достигается за счет отрицательной обратной связи по скорости. Так, если под действием возмущений ω_d начинает снижаться, то уменьшается сигнал обратной связи по скорости $U_{OC\omega}$, а сигнал ошибки $U_\omega = U_{зд} - U_{OC\omega}$ увеличивается. При этом повышается напряжение на выходе регулятора, на выходе УМ и на якоре двигателя. В результате ω_d стремится к заданному значению. Точность стабилизации ω_d , как показано выше, определяется коэффициентом усиления разомкнутой системы. При использовании регулятора, содержащего интегральную составляющую (например ПИД-регулятор, как на рис. 3.17), удастся получить достаточно высокую точность стабилизации (первый участок характеристики на рис. 3.18).

Для ограничения тока якоря служит узел токовой отсечки. Один из возможных вариантов его реализации (см. рис. 3.17) включает шунт R_h и стабилитроны $VD1, VD2$. Этот узел работает так же, как описано выше. Пока ток якоря I_a меньше тока отсечки $I_{отс}$, стабилитроны имеют большее сопротивление и не оказывают влияния на работу схемы. Если ток I_a превышает $I_{отс}$, то сопротивление стабилитрона резко снижается, и на выход регулятора через резистор $R4$ начинает поступать дополнительный сигнал $(U_{отс} - U_z)$. При этом сигнал ошибки

$$U_\delta = U_{зд} - U_{OC\omega} - (U_{отс} - U_z).$$

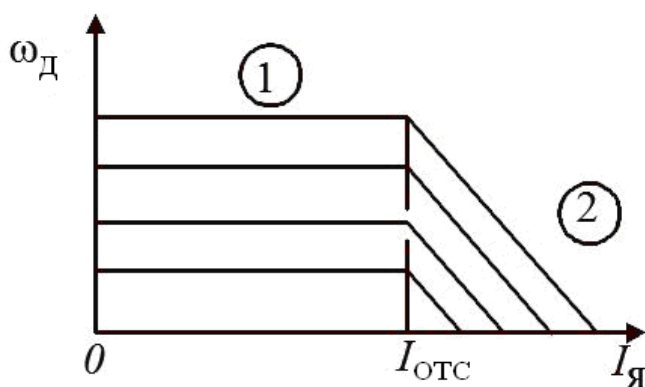


Рис. 3.18

По мере увеличения тока якоря $I_{\text{я}}$ растет напряжение $U_{\text{отс}}$. Как следствие, снижаются U_{δ} , $U_{\text{в}}$, $U_{\text{я}}$, $\omega_{\text{д}}$. В результате достигается ограничение тока якоря (второй участок характеристик на рис. 3.18)

К достоинствам схемы можно отнести простоту реверса двигателя и реализации рекуперативного торможения. Реверс осуществляется изменением полярности напряжения на задатчике RP , что, в конечном счете, ведет к изменению полярности напряжения на якоре двигателя.

Генераторное торможение с отдачей энергии в сеть возможно, если в качестве гонного двигателя генератора используется электродвигатель, например асинхронный. Поясним это. Предположим, что машина работает на характеристике 1 (рис. 3.19) в точке a . Чтобы снизить скорость, напряжение на датчике RP снижают, и после переходного процесса машина должна перейти на характеристику 2 в точке b . Процесс перехода на новую характеристику протекает так. В первый момент времени $\omega_{\text{д}}$, вследствие механической инерционности привода, остается неизменной (на рис. 3.19 процесс перехода условно показан стрелками). Напряжение генератора уменьшается и становится меньше противоЭДС двигателя. Ток в якорной цепи меняет знак. Машина M теперь работает генератором, а машина G - двигателем и заставляет гонный двигатель вращаться со скоростью выше скорости идеального холостого хода. Последний переходит в режим генератора и отдает электрическую энергию в сеть переменного тока. Если ток якоря превышает по модулю $I_{\text{отс}}$, то в переходном процессе вступает в действие токовая отсечка, и процесс перехода на новую характеристику, от точки c до точки d , идет при токе $I_{\text{я}} = |I_{\text{отс}}|$. Далее под действием момента сопротивления $M_{\text{с}}$ механизма $\omega_{\text{д}}$ продолжает снижаться до нового установившегося режима в точке b .

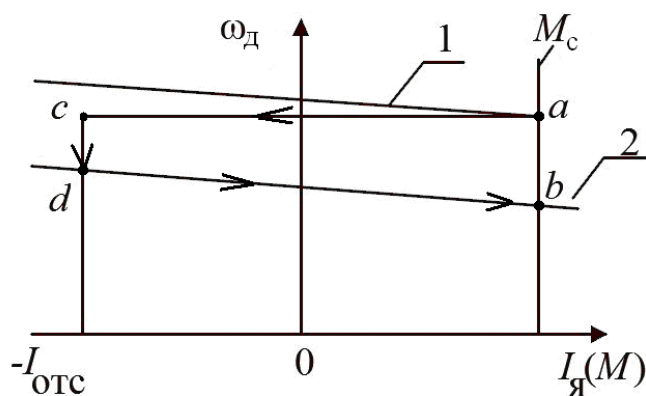


Рис. 3.19

Система Г-Д имеет очевидные недостатки. Прежде всего, это большая установленная мощность электрических машин: мощность генератора и гонного двигателя должны быть не меньше мощности двигателя, т.е. общая установленная мощность электрических машин равна или превышает мощность двигателя в 3 раза. Кроме того, наличие дополнительных вращающихся машин приводит к снижению надежности, значительным затратам на профилактику и ремонт. Значительная инерционность генератора затрудняет достижение высоких динамических характеристик системы. В связи с этим в настоящее время система Г-Д используется в основном в автономных устройствах, а в промышленных установках, получающих питание от электрических сетей, такая система почти не применяется.

3.6. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЯЕМЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ - ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ (УВ - ДПТ НВ)

В настоящее время в различных областях техники наиболее широко применяются регулируемые электроприводы с ДПТ с управляемыми вентильными (тиристорными) 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 используется два УВ: один работает на якоре, а вто-

рой - 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.

3.6.1. ОДНОФАЗНЫЙ ОДНОПОЛУПЕРИОДНЫЙ УВ. ФАЗОВЫЙ СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЫПРЯМЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Принцип работы УВ поясним на примере простейшей однофазной однополупериодной схемы УВ (рис. 3.20), работающей на активную нагрузку R . В этой схеме VS – тиристор; СИФУ - система импульсно-фазового управления. Тиристор служит для выпрямления и регулирования выпрямленного напряжения на нагрузке. СИФУ предназначена для управления моментом отпирания тиристора.

Фазовый способ регулирования основан на управлении моментом отпирания 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_{BX} СИФУ, а частота равна частоте питающей сети.

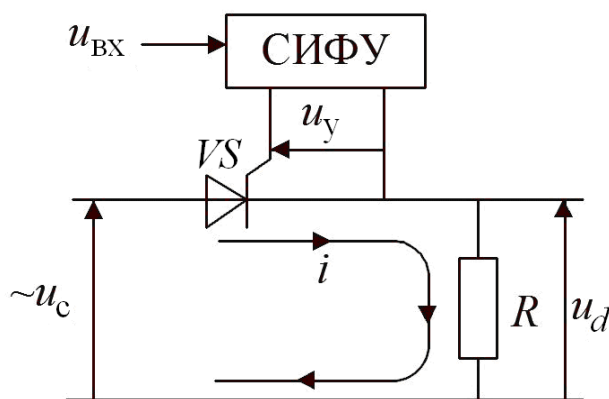


Рис. 3.20

Диаграммы, поясняющие работу схемы, приведены на рис. 3.21, а. На первой диаграмме приведена зависимость сетевого напряжения u_c от угла ν (здесь и далее $\nu = \omega t$, рад; $\omega = 2\pi f_c$ - угловая частота, рад/сек; f_c - частота сетевого напряжения, Гц; t - время, с). Напряжение u_c изменяется по синусоидальному закону с периодом 2π :

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

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

На второй диаграмме приведены управляющие импульсы u_y пря-

моугольной формы. Амплитуда и длительность импульсов выбирается 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 α (угол запаздывания)*. Величина угла регулирования зависит от входного сигнала СИФУ u_{BX} .

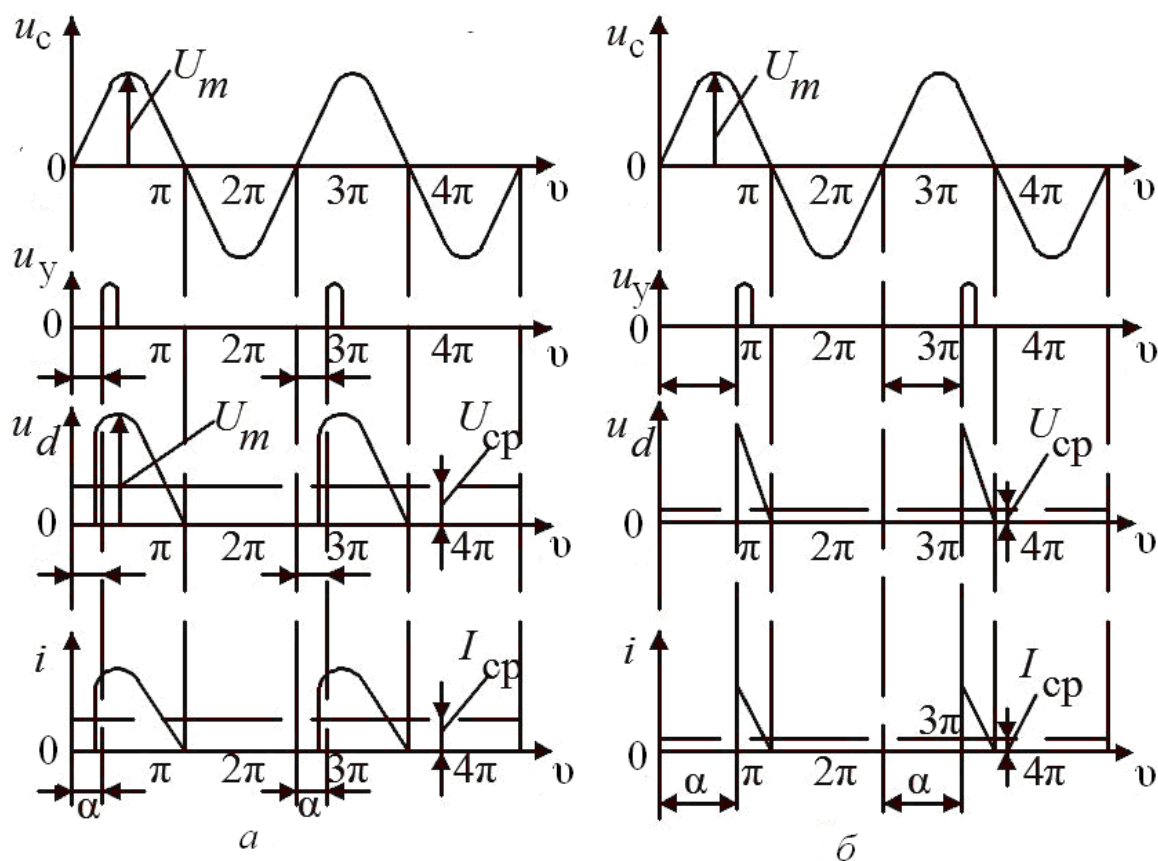


Рис. 3.21

На третьей и четвертой диаграммах приведены зависимости мгновенных значений напряжения на нагрузке - $u_d(\nu)$ и тока нагрузки - $i(\nu)$.

Рассмотрим работу схемы на отдельных интервалах.

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

При $\nu = \alpha$ 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 $\alpha \leq \nu < \pi$. На этом интервале тиристор открыт, напряжение на нагрузке практически равно сетевому напряжению - $u_d(\nu) \approx u_c(\nu)$, а ток нагрузки - $i(\nu) = u_d/R_H$.

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

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

На рис. 3.21, б приведены диаграммы для случая, когда угол регулирования α имеет большую величину по сравнению с рис. 3.21, а.

Как видно из приведенных на рис. 3.21 диаграмм, напряжение на нагрузке имеет вид положительных импульсов, частота которых равна частоте сетевого напряжения.

Мгновенное значение напряжения на нагрузке $u_d(\nu)$ равно сетевому напряжению $u_c(\nu)$ 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). Геометрически U_{CP} можно определить следующим образом. Построим прямоугольник шириной 2π , площадь которого равна площади фигуры, ограниченной кривой мгновенного напряжения на нагрузке u_d и осью абсцисс. Высота полученного прямоугольника будет равна среднему значению напряжения на нагрузке. Очевидно, что значение U_{CP} зависит от угла регулирования α . Величина среднего значения напряжения на нагрузке находится из выражения

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

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

Полученное выражение описывает зависимость среднего значения напряжения U_{CP} на нагрузке от угла регулирования α и представ-

ляет собой регулировочную характеристику $U_{\text{ср}}(\alpha)$. Из выражения видно, что при изменении угла α в пределах $0 \leq \alpha \leq \pi$ среднее значение напряжения на нагрузке $U_{\text{ср}}(\alpha)$ изменяется в пределах $0,45U_c \leq U_{\text{ср}} \leq 0$, т.е. уменьшается с увеличением угла регулирования. Последнее иллюстрируется значениями $U_{\text{ср}}$ на рис. 3.21.

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

$$I_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{ср}}}{R}.$$

3.6.2. ОДНОФАЗНАЯ СХЕМА УВ С НУЛЕВЫМ ДИОДОМ

Рассмотрим особенности работы УВ на обмотку возбуждения ДПТ НВ.

Характерными особенностями обмоток возбуждения двигателей постоянного тока являются большая (относительно якоря) индуктивность, небольшая потребляемая мощность и небольшой требуемый диапазон изменения тока возбуждения. Мощность, потребляемая обмоткой возбуждения, составляет десятые доли - единицы процента от номинальной мощности электродвигателя, а диапазон регулирования тока возбуждения не превышает 10. В связи с этим для регулирования тока возбуждения чаще всего применяются нереверсивные однофазные управляемые выпрямители. Большая постоянная времени обмотки возбуждения и малый диапазон регулирования тока возбуждения приводят к тому, что управляемые выпрямители работают в области непрерывных токов.

Описываемая ниже схема предназначена для регулирования тока возбуждения двигателя постоянного тока и, следовательно, для регулирования скорости его вращения вверх от номинальной скорости.

На рис. 3.22 приведена упрощенная принципиальная электрическая схема однофазного однополупериодного нереверсивного управляемого выпрямителя с нулевым диодом.

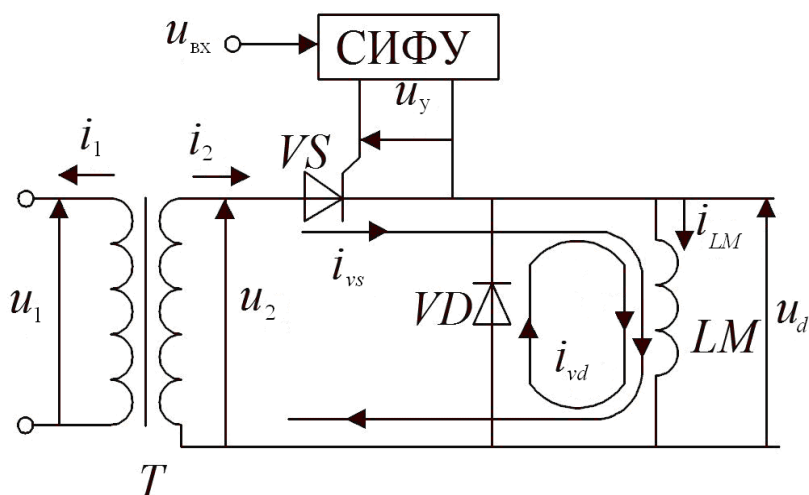


Рис. 3.22

Схема содержит силовой трансформатор T , тиристор VS , систему импульсно-фазового управления СИФУ, нулевой диод VD и обмотку возбуждения LM .

Трансформатор T служит для получения на вторичной обмотке требуемого действующего значения переменного напряжения, определяющего максимальное значение напряжения на обмотке возбуждения LM , а также для гальванической развязки между сетью и остальной частью схемы. Тиристор VS служит для выпрямления и регулирования среднего (за период) значения выпрямленного напряжения на обмотке возбуждения LM . СИФУ управляет работой тиристора VS . Нулевой диод VD предназначен для устранения отрицательных выбросов напряжения на обмотке возбуждения LM , что позволяет увеличить среднее значение выпрямленного напряжения и тока.

В этой схеме нагрузка (обмотка возбуждения) носит активно-индуктивный характер (RL - нагрузка). Индуктивность L является аккумулятором энергии. При подаче на индуктивность положительного импульса в индуктивности будет запасаться энергия, а ток через нее будет плавно возрастать. По окончании импульса энергия, запасенная в индуктивности, будет отдаваться, а ток при этом будет плавно

уменьшаться, не изменяя своего направления. В конечном итоге это приводит к уменьшению пульсаций тока.

Рассмотрим работу схемы на отдельных интервалах (рис. 3.23).

Интервал $0 \leq \nu < \alpha$. В исходном состоянии ($\nu=0$) тиристор закрыт. Тогда на интервале $0 \leq \nu < \alpha$ тиристор остается в закрытом состоянии, ток анода $i_{VS}(\nu)$ тиристора равен нулю, а обмотка возбуждения оказывается отключенной от вторичной обмотки трансформатора. Но ток, протекающий через обмотку возбуждения, не равен нулю. За счет энергии, накопленной индуктивностью обмотки возбуждения LM на предыдущем интервале ($\nu < 0$), ток обмотки возбуждения $i_{LM}(\nu)$ протекает в направлении, указанном на схеме, через диод VD . Благодаря току диод удерживается в открытом состоянии. При этом напряжение $u_{LM}(\nu)$ на обмотке возбуждения LM определяется прямым падением напряжения $u_{VD}(\nu)=0$ на диоде VD , а ток $i_{LM}(\nu)$ обмотки возбуждения уменьшается во времени по экспоненциальной зависимости.

Интервал $\alpha \leq \nu < \pi$. При $\nu=\alpha$ на управляющий электрод тиристора с СИФУ подается управляющий импульс, тиристор открывается, а напряжение на обмотке возбуждения u_d возрастает скачком от нуля до значения $u_2(\alpha)$. После снятия управляющего импульса тиристор удерживается в открытом состоянии, так как ток анода оказывается больше тока выключения. Под действием напряжения u_2 диод VD закрывается и не оказывает влияния на работу схемы.

На интервале $\alpha \leq \nu \leq \pi$ тиристор находится в открытом состоянии, напряжение на обмотке возбуждения $u_{LM}(\nu)$ равно напряжению $u_2(\nu)$ на вторичной обмотке трансформатора. К диоду VD приложено обратное напряжение, и он закрыт (ток $i_{VD}(\nu)$ диода равен нулю). Ток $i_{LM}(\nu)$ обмотки возбуждения LM возрастает во времени и протекает по цепи вторичная обмотка трансформатора - тиристор VS - обмотка возбуждения LM - вторичная обмотка трансформатора. На этом интервале в индуктивности обмотки возбуждения запасается энергия.

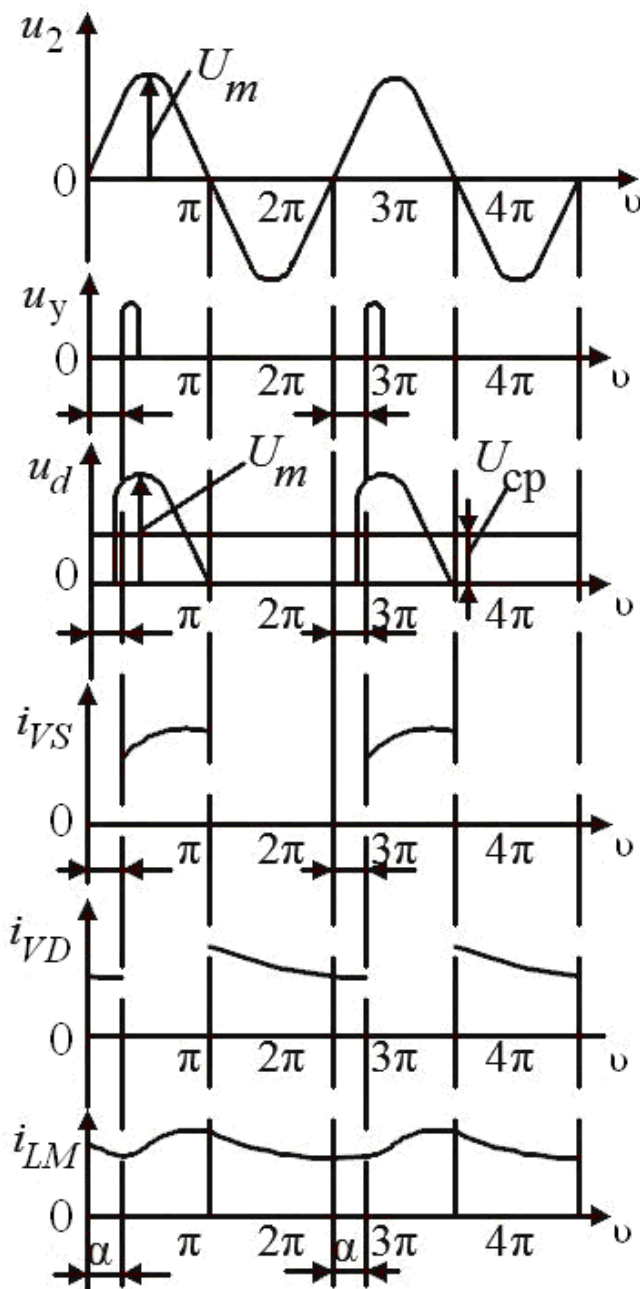


Рис. 3.23

При $u \leq \pi$ напряжение u_2 , прикладываемое к обмотке возбуждения LM и диоду VD , меняет свой знак на обратный и становится отрицательным. В результате этого открывается диод VD , а к аноду тиристора VS прикладывается обратное напряжение, и тиристор закрывается.

Интервал $\pi < u \leq 2\pi + \alpha$. На данном интервале тиристор VS закрыт, а диод VD удерживается в открытом состоянии. Напряжение $u_d(u)$ на обмотке возбуждения LM равно прямому падению напряжения u_{VD} на диоде VD , т.е. практически равно нулю. Напряжение $u_{VS}(u)$ на аноде тиристора равно напряжению $u_2(u)$ на вторичной обмотке трансфор-

матора T . Ток $i_{VS}(\nu)$ через закрытый тиристор VS равен нулю, а ток $i_{LM}(\nu)$ обмотки возбуждения LM под действием энергии, накопленной ее индуктивностью на интервале $\alpha \leq \nu \leq \pi$, протекает через диод и уменьшается по экспоненциальной зависимости.

На последующих интервалах $2\pi + \alpha \leq \nu \leq 3\pi$, $4\pi + \alpha \leq \nu \leq 5\pi$ и т.д. работа управляемого выпрямителя совпадает с описанной ранее работой на интервале $\alpha \leq \nu \leq \pi$, а на интервалах $3\pi \leq \nu \leq 4\pi + \alpha$, $5\pi \leq \nu \leq 6\pi + \alpha$ и т.д. - с работой на интервале $\pi \leq \nu \leq 2\pi + \alpha$.

Как видно из рис. 3.23, напряжение $u_d(\nu)$ на обмотке возбуждения LM имеет вид однополярных почти прямоугольных импульсов, частота которых равна частоте питающей сети. Величина напряжения $u_d(\nu)$ при открытом тиристоре VS равна напряжению $u_2(\nu)$ на вторичной обмотке трансформатора и равна нулю при закрытом тиристоре. Среднее за период (2π) значение напряжения U_{cp} (постоянная составляющая напряжения) на обмотке возбуждения LM пропорционально площади, ограниченной кривой напряжения и осью абсцисс, и, следовательно, зависит от угла регулирования α . Например, $U_{cp}(\alpha)$ максимально при $\alpha=0$ и равно нулю при $\alpha=\pi$. Таким образом, изменение напряжения U_{BX} на входе СИФУ приводит к изменению угла регулирования α и, следовательно, к изменению среднего за период напряжения U_{cp} на обмотке возбуждения LM .

Из рассмотренного несложно заметить, что с точки зрения функционального назначения в управляемом выпрямителе можно выделить два блока (рис. 3.24) - СИФУ и блок вентилей (БВ). В рассмотренных схемах БВ состоит из одного тиристора, в более сложных схемах тиристоры несколько.

На функциональной схеме СИФУ показывают в виде прямоугольника. На вход СИФУ поступает напряжение U_{BX} постоянного тока, что условно показано в верхней части блока. Выходной сигнал СИФУ представляет собой последовательность управляющих импульсов, причем эти импульсы сдвигаются по фазе в зависимости от U_{BX} (это условно показано в нижней части блока СИФУ). Для БВ входным сигналом являются импульсы СИФУ, а в качестве выходно-

го сигнала в системах электропривода рассматривают среднее значение выпрямленного напряжения $U_{\text{ср}}$.

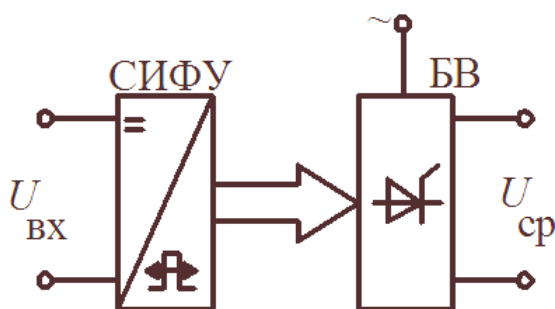


Рис. 3.24

Следует обратить внимание на следующее. Как установлено выше, с увеличением угла регулирования α значение $U_{\text{ср}}$ снижается. Такая обратная зависимость $U_{\text{ср}}(\alpha)$ весьма неудобна при управлении. В связи с этим СИФУ выполняют так, чтобы ее характеристика «вход - выход» обеспечивала обратную зависимость $\alpha(U_{\text{ВХ}})$: при возрастании $U_{\text{ВХ}}$ угол α уменьшается. В результате для УВ в целом удастся получить прямую связь между входным и выходным сигналами. Действительно, при возрастании входного сигнала $U_{\text{ВХ}}$ УВ угол α будет уменьшаться, а выходной сигнал $U_{\text{ср}}$ - увеличиваться.

3.6.3. ОДНОФАЗНАЯ ДВУХПОЛУПЕРИОДНАЯ СХЕМА УВ С НУЛЕВЫМ ВЫВОДОМ

Схема однофазного двухполупериодного тиристорного выпрямителя приведена на рис. 3.25. Нагрузкой на рис. 3.25, а является обмотка возбуждения LM ДТП. В схеме используется трансформатор T со средней точкой. Вторичные обмотки трансформатора T включены так, что их напряжения U_{21} , U_{22} сдвинуты на 180° (находится в противофазе). На управляющие электроды тиристоров $VS1$, $VS2$ подаются импульсы, сдвинутые друг относительно друга на 180° .

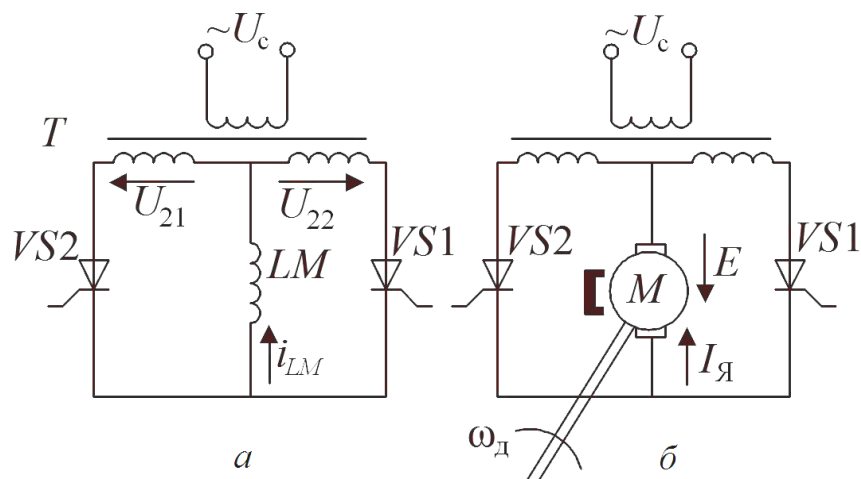


Рис. 3.25

На рис. 3.26 показаны диаграммы, соответствующие работе схемы на обмотку возбуждения (см. рис. 3.25, а) с углом $\alpha=30^\circ$. На первой диаграмме показаны напряжения U_{21} , U_{22} ; на второй - управляющие импульсы; на третьей - напряжение на нагрузке.

Работа схемы во многом аналогична предыдущей, поэтому опишем ее более кратко. На интервале $0 < v < \alpha$ ток в обмотке возбуждения поддерживается, как и в предыдущей схеме, за счет энергии, накопленной в индуктивности на предыдущем интервале.

При $v = \alpha$ на управляющий электрод тиристора $VS1$ от СИФУ (на схеме не показана) подается управляющий импульс, тиристор открывается, напряжение на обмотке возбуждения возрастает скачком до значения $U_{21}(\alpha)$. Ток в обмотке возбуждения начинает возрастать во времени и протекает от правой по схеме вторичной обмотки трансформатора через $VS1$ и LM . В индуктивности обмотки возбуждения запасается энергия.

На интервале $\pi/2 < v < \pi$ напряжение на нагрузке, равное U_{21} , начинает снижаться. При этом снижается и ток в обмотке возбуждения, а ЭДС самоиндукции меняет свой знак и действует согласно с напряжением U_{21} .

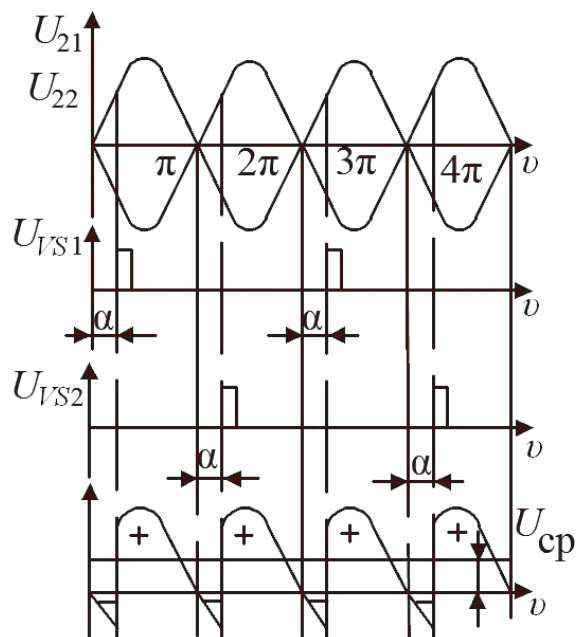


Рис. 3.26

На интервале $\pi < v < \pi + \alpha$ знак U_{21} изменится, однако тиристор $VS1$ остается в открытом состоянии за счет ЭДС самоиндукции, и цепь протекания тока останется прежней.

При $v = \pi + \alpha$ подается управляющий импульс на управляющий электрод тиристора $VS2$. В этот момент потенциал анода тиристора $VS2$ выше потенциала катода, и $VS2$ открывается. Напряжение на обмотке возбуждения скачком возрастает до значения $U_{22}(\pi + \alpha)$. При этом к катоду тиристора $VS1$ прикладывается положительный потенциал, и он закрывается. Ток начинает протекать от левой по схеме обмотки трансформатора через $VS2$ и LM . Далее процессы в схеме повторяются.

Обратим внимание, что кривая напряжения на обмотке возбуждения имеет как участки, расположенные выше оси абсцисс (+), так и участки, расположенные ниже этой оси (-). При $\alpha = 30^\circ$ площадь «положительных» участков больше площади «отрицательных» и, следовательно, среднее значение выпрямляемого напряжения U_{cp} больше нуля. Очевидно также, что если установить $\alpha = 0$, то «отрицательные» участки будут отсутствовать, и U_{cp} будет максимальным. Если же угол управления α увеличится, то площадь «отрицательных» участков будет возрастать, а U_{cp} снижаться. При угле управления $\alpha = 90^\circ$ (диаграммы на рис. 3.27) площадь «отрицательных» участков станет равной площади «положительных», а $U_{cp} = 0$.

Продолжая рассуждения, можно заметить, что при $\alpha > 90^\circ$ «отрицательные» площадки станут больше «положительных», и, соответственно, среднее значение выпрямленного напряжения поменяет свой знак - станет меньше нуля.

В рассматриваемой схеме такой режим возможен только гипотетически. Действительно, при отрицательном значении $U_{\text{ср}}$ среднее значение тока также должно стать отрицательным. Иными словами, направление протекания тока должно измениться, а это невозможно в силу односторонней проводимости вентиля.

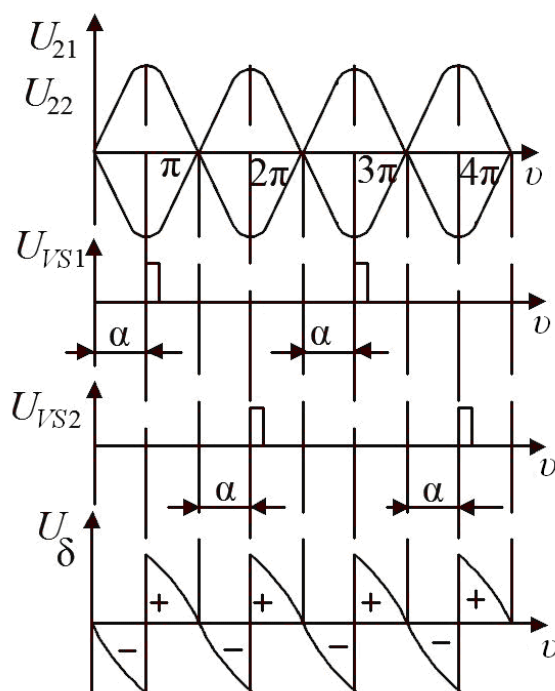


Рис. 3.27

Рассмотрим работу схемы на якорь двигателя (см. рис. 3.25, б). Обмотка якоря двигателя так же, как обмотка возбуждения, имеет индуктивность, поэтому процессы в схеме во многом аналогичны рассмотренным для рис. 3.25, а. Основное отличие заключается в том, что при работе ДПТ создает противоЭДС, направленную встречно выпрямленному напряжению. Если при работе на обмотку возбуждения среднее значение тока в ней определяется выражением

$$i_{LM} = \frac{U_{\text{ср}}}{R_{LM}},$$

где R_{LM} - сопротивление обмотки возбуждения, то при работе на якорь двигателя среднее значение тока определяется с учетом противо ЭДС

$$I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{ср}} - E}{R_{\text{я}}}, \quad (3.17)$$

где $R_{\text{я}}$ - сопротивление якорной цепи. При работе на якорь ДПТ и регулировании угла α так же, как в предыдущих схемах, будет изменяться среднее значение напряжения на выходе УВ и, соответственно, изменяться угловая скорость двигателя. Следует иметь в виду, что угловая скорость будет определяться именно средним значением выпрямленного напряжения, так как в силу инерционности двигатель практически не реагирует на мгновенные изменения напряжения на выходе УВ.

При углах $\alpha < 90^\circ$ энергия поступает из сети переменного тока к якорю и машина работает в двигательном режиме - преобразует электрическую энергию в механическую.

Такой режим работы УВ называют **выпрямительным**.

Если в рассматриваемой схеме увеличивать угол α от 0 до 90° , то $E_{\text{ср}}$ будет меняться от наибольшей до 0; соответственно и угловая скорость двигателя будет изменяться от наибольшей до нуля.

Если попытаться установить $\alpha > 90^\circ$, то напряжение $U_{\text{ср}}$ должно изменить свой знак и, соответственно, должно поменяться направление протекания тока $I_{\text{я}}$. Как уже отмечалось, ток через тиристоры в обратном направлении протекать не может, следовательно, в рассматриваемом случае работа с $\alpha > 90^\circ$ также невозможна.

Рассмотрим другую ситуацию. Предположим, что электропривод работает на грузоподъемный механизм. Пусть происходит подъем груза. Машина M при этом работает в двигательном режиме, УВ - в выпрямительном режиме.

Предположим далее, что груз нужно опустить. Для этого устанавливают угол $\alpha > 90^\circ$. Знак среднего значения напряжения $U_{\text{ср}}$ по сравнению с выпрямительным режимом поменяется на противополо-

ложный. Под действием момента, создаваемого грузом, двигатель начнет вращаться в противоположную сторону. Его противоЭДС поменяет свой знак. Если по абсолютному значению $|E| > |U_{\text{ср}}|$, то направление протекания тока останется прежним, а его значение будет определяться выражением

$$I_{\text{я}} = \frac{E - U_{\text{ср}}}{R_{\text{я}}}.$$

Таким образом, в рассматриваемой ситуации машина за счет момента, создаваемого грузом, работает в генераторном режиме, а электрическая энергия передается от якоря в цепь переменного тока. Говорят, что управляемый выпрямитель работает при этом в *инверторном режиме*.

Разумеется, в автоматизированном ЭП переход УВ в инверторный режим обеспечивается автоматически за счет работы соответствующих блоков системы. Приведенные здесь рассуждения лишь поясняют возможность работы УВ с $\alpha > 90^\circ$, т.е. работы в инверторном режиме.

3.6.4. ТРЕХФАЗНЫЕ СХЕМЫ УВ

Силовая часть трехфазной нулевой схемы УВ приведена на рис. 3.28. Трехфазный трансформатор TV 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° . Соответственно и управляющие импульсы, подаваемые на управляющие электроды тириستоров с выхода СИФУ, сдвинуты на 120° . 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 якорь двигателя поочередно подключа-

ется к трем различным фазам. Регулируя с помощью СИФУ угол α , можно, так же, как в однофазной схеме, изменять среднее значение напряжения на якоре двигателя.

Силовая часть трехфазной мостовой схемы УВ, приведенная на рис. 3.29, содержит 6 тиристоров $VS1 - VS6$. Особенностью этой схемы является то, что управляющие импульсы, подаваемые на тиристоры $VS4 - VS6$, сдвинуты на 180° по отношению к импульсам на тиристорах $VS1 - VS3$. 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° после основного управляющего импульса на каждый из тириستоров 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 напряжения на якоре двигателя, как и в предыдущих схемах, осуществляется изменением угла управления α .

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

Необходимо учитывать, что УВП, как потребители энергии, забирают из сети несинусоидальный ток и, следовательно, являются источниками тока высших гармоник.

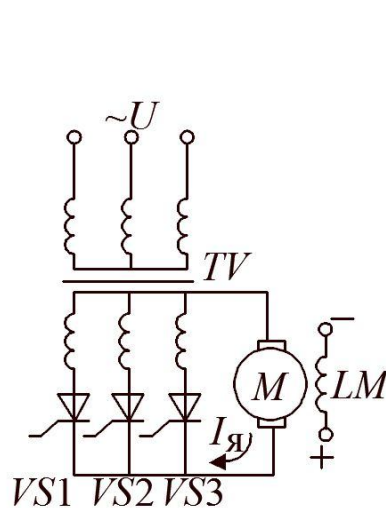


Рис. 3.28

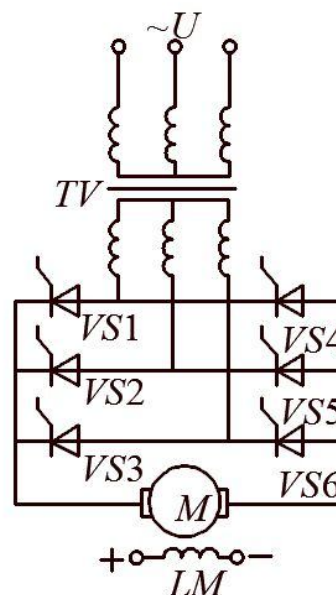


Рис. 3.29

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 электроприемников является коэффициент мощности, характеризующий сдвиг по фазе тока в цепи. В тиристорных преобразователях кривая тока отстает от кривой напряжения, причем с увеличением угла α фазовый сдвиг увеличивается. Иными словами, УВ потребляет из сети не только активную, но и реактивную мощность, которая увеличивается при возрастании угла α . Эти обстоятельства требуют принятия специальных мер по повышению коэффициента мощности.

3.6.5. 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. 3.30): комплект, условно обозначенный «Вперед» - В; комплект «Назад» - Н. При разделенном управлении в каждый момент времени работают вентили только одного комплекта.

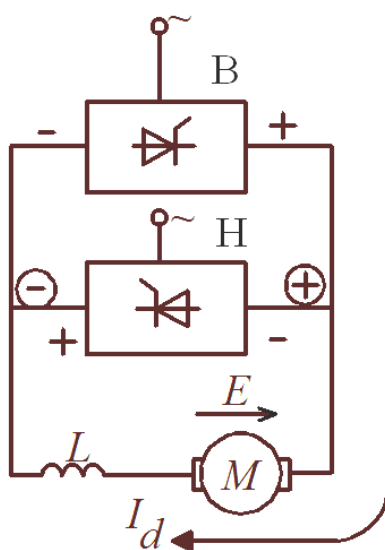


Рис. 3.30

Предположим, что в исходном состоянии работает комплект В. Полярность напряжения преобразователя и направления ЭДС двигателя E и тока I_d якоря показаны на рис. 3.30.

Если же включен комплект Н, то полярность напряжения на якоре будет противоположной, и двигатель будет вращаться в противоположную сторону.

В реверсивных приводах при снижении скорости и реверсе двигателя реализуется инверторный режим работы выпрямителя. Поясним это. 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 входе комплекта В начинает резко снижаться и соот-

ветственно уменьшается ток $I_{\text{я}}$. 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 $I_{\text{я}} = \frac{E - U_{\text{ср}}}{R_{\text{я}}}$ не превышал допустимого тока двигателя (тока отсечки). Так организуется режим генераторного торможения двигателя с отдачей энергии в сеть переменного тока (сравните с аналогичным режимом в системе Г-Д).

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 $I_{\text{я}} = \frac{E + U_{\text{ср}}}{R_{\text{я}}}$ будет недопустимо большим.

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 α 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 привода.

3.6.6. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УВ

При анализе *статических свойств УВ* их структурную схему удобно представить в виде двух последовательно включенных звеньев (см. рис. 3.24) - системы импульсно-фазового управления и блока вентилей. Входным сигналом СИФУ является напряжение управления U_y , которое преобразуется в угол отпирания тиристоров α . Величина угла отпирания тиристоров определяет среднее значение выпрямленного напряжения $U_{ср}$ на выходе блока вентилей.

Коэффициент передачи СИФУ представляет собой отношение приращения угла отпирания к приращению напряжения управления, $\frac{\text{эл.град}}{\text{В}}$:

$$k_{\text{сифу}} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta U_y}.$$

Коэффициент передачи блока вентилей есть отношение приращения среднего значения выпрямленного напряжения к приращению угла отпирания тиристоров, $\frac{\text{В}}{\text{эл.град}}$:

$$k_{\text{БВ}} = \frac{\Delta U_y}{\Delta \alpha}.$$

Общий **коэффициент усиления УВ** представляет собой отношение приращения среднего значения выпрямленного напряжения к приращению напряжения управления:

$$k_B = \frac{\Delta U_{ср}}{\Delta U_y} = k_{\text{сифу}} k_{\text{БВ}}.$$

Динамические свойства УВ описываются передаточной функцией

$$W_B(p) = \frac{k_B}{1 + T p} e^{-\tau p},$$

где $k_{у\text{в}}$ - коэффициент усиления; T - постоянная времени блока СИФУ; τ - среднестатистическое время запаздывания включения вентиля.

Звено запаздывания отражает дискретный характер работы преобразователя, так как после каждого периодического включения отпирающим импульсом очередного вентиля его невозможно выключить в течение оставшегося времени, пока силовое напряжение на аноде этого тиристора по отношению к катоду не понизится до нуля.

Время запаздывания

$$\tau = \frac{1}{2mf},$$

где $f=50$ Гц - частота сети; m - число полуволн выпрямленного напряжения за один период.

Величина коэффициента m определяется силовой схемой выпрямления. Однофазная однополупериодная схема имеет $m=1$; однофазная двухполупериодная - $m=2$; трехфазная с нулевой точкой - $m=3$; трехфазная мостовая - $m=6$ и т.д.

Фазовая частотная характеристика звена запаздывания $\phi(\omega) = -53,7\omega\tau$ в диапазоне частот $\omega < 1/(2\tau)$ с погрешностью, не превышающей 3° , совпадает с фазовой частотной характеристикой апериодического звена $\phi(\omega) = -\arctg\omega\tau$. Поэтому если частота среза системы автоматического управления $\omega_{ср} < 1/(2\tau)$, то передаточную функцию преобразователя можно приближенно представить передаточной функцией апериодического звена $W_{вп}(p) = \frac{k_{в}}{1 + T_{в}p}$ с постоянной времени $T_{в} = T + \tau$.

Для систем управления общепромышленного назначения с трехфазными и выше силовыми схемами выпрямления это условие, как правило, выполняется, так как их частота среза $\omega_{ср} \leq 100 \frac{1}{с}$, и уже при трехпульсном выпрямлении ($m=3$) величина

$$\frac{1}{2\tau} = \frac{1}{2 \cdot 0,0033} \approx 150 \frac{1}{с}.$$

При шестипульсном выпрямлении ($m=6$)

$$\frac{1}{\tau} \approx 300 \frac{1}{с}.$$

3.6.7. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ

Отметим основные особенности приводов, выполненных по схеме УВ - ДПТ НВ:

- тиристорный преобразователь имеет очень малую инерционность, что позволяет обеспечить высокое быстродействие электропривода;
- электропривод имеет высокую надежность, достаточно прост в обслуживании;
- тиристорный электропривод имеет высокий КПД (более 95%);
- малые габариты и масса, блочная компоновка привода позволяют сократить требуемые производственные площади, уменьшить капитальные затраты на установку.

В то же время тиристорным электроприводам свойственны следующие недостатки:

- значительные пульсации тока на выходе УВ увеличивают нагрев двигателя и ухудшают его коммутацию;
- при глубоком регулировании скорости тиристорный электропривод имеет низкий коэффициент мощности;
- перегрузочная способность тиристорного преобразователя ниже, чем генераторного;
- при работе тиристорного привода искажается форма кривой напряжения в сети переменного тока и возникают помехи в сети, действующие как на другие электроприемники, так и на сам тиристорный привод;
- в системе Г-Д преобразовательной установке свойственна естественная рекуперация энергии в сеть в генераторных режимах работы двигателя; в тиристорных преобразователях для обеспечения рекуперации необходимо применение специальных схем, в частности с двумя комплектами вентилях, что повышает сложность и стоимость электропривода.

3.7. СИСТЕМЫ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА ЯКОРЯ И УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ДПТ НВ

3.7.1. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

В рассмотренных выше схемах замкнутых систем ЭП для обеспечения требуемых характеристик используется отрицательная обратная связь по скорости двигателя. Токовая отсечка организуется с помощью дополнительного узла. Причем сигналы с датчика скорости и датчика тока якоря поступают на один усилитель (регулятор). Такой принцип построения системы, как правило, не позволяет получить максимально достижимого быстродействия системы. Кроме того, схема регулятора оказывается в большинстве случаев достаточно сложной, что вызывает дополнительные проблемы при наладке системы.

Современные АЭП выполняются в виде систем подчиненного регулирования (СПР) координат. Функциональная схема однозонной системы подчиненного регулирования тока якоря и угловой скорости ДПТ НВ приведена на рис. 3.31. В системе обеспечивается регулирование угловой скорости двигателя за счет изменения напряжения $U_{\text{я}}$ на якоре. Это напряжение регулируется с помощью управляемого выпрямителя, содержащего СИФУ и блок вентиля (БВ).

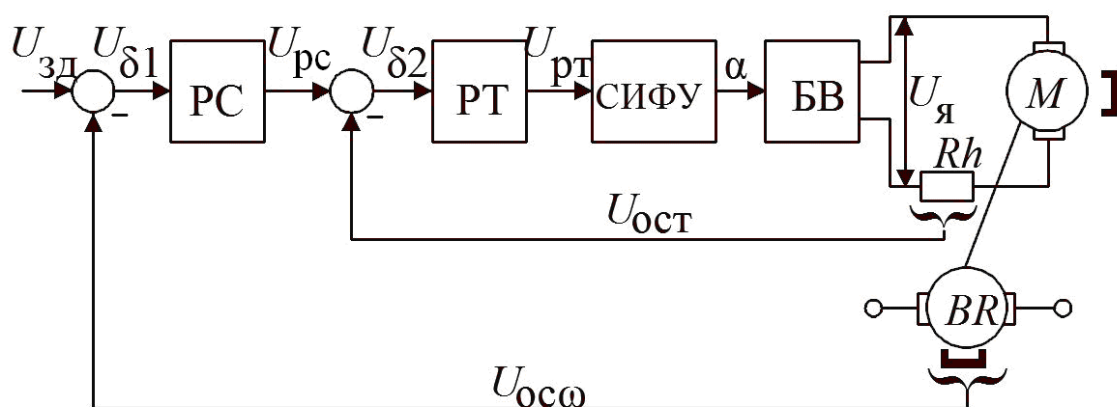


Рис. 3.31

Система содержит два замкнутых контура - внутренний токовый и внешний скоростной. Внутренний контур включает СИФУ, БВ, датчик тока якоря (шунт $R_{\text{я}}$) и регулятор тока РТ. Внешний контур охватывает

элементы внутреннего и дополнительно содержит якорь двигателя M , датчик скорости (тахогенератор BR) и регулятор скорости.

Поясним работу схемы. Начнем с внутреннего контура. Он выполнен в виде замкнутой системы с отрицательной обратной связью по току якоря. Входным (задающим) сигналом для этого контура является выходное напряжение U_{PC} регулятора скорости. На входе РТ осуществляется сравнение (вычитание) сигналов $U_{РТ}$ и сигнала $U_{ОСТ}$ обратной связи по току якоря. Сигнал ошибки на входе РТ

$$U_{\delta 2} = U_{РТ} - U_{ОСТ}.$$

При постоянном значении U_{PC} внутренний контур работает в режиме стабилизации тока якоря. Если, например, ток якоря начинает снижаться, то сигнал $U_{ОСТ}$ также уменьшается, а сигнал ошибки $U_{\delta 2}$ увеличивается. При этом увеличивается напряжение на выходе РТ и, как следствие, возрастает напряжение на якоре двигателя - ток якоря начинает возрастать, стремясь к заданному значению.

Рассмотрим работу внешнего скоростного контура. Сигнал на входе РС определяется соотношением

$$U_{\delta 1} = U_{ЗД} - U_{ОС\omega}.$$

Если ω_d по каким-либо причинам снижается, то напряжение $U_{ОС\omega}$ тахогенератора также уменьшается, а сигнал ошибки $U_{\delta 1}$ увеличивается. Это приводит к возрастанию напряжения U_{PC} на выходе РС, т.е. на вход токового контура начинает поступать большой сигнал задания. За счет работы внутреннего контура ток якоря увеличивается и соответственно ω_d растет, стремясь к заданному значению.

Из приведенных рассуждений несложно заметить, что в этой схеме задача регулирования тока якоря *подчинена* задаче регулирования ω_d . Отсюда название систем - подчиненного регулирования.

Аналогично протекают процессы при управлении скоростью. Так, чтобы увеличить ω_d , увеличивают напряжение задания $U_{ЗД}$. При этом $U_{\delta 1}$ и $U_{РТ}$ увеличиваются, внутренний контур обеспечивает возрастание тока якоря, и двигатель разгоняется до заданного значения скорости.

Упрощенная принципиальная схема СПР тока якоря и угловой скорости ДПТ НВ для нереверсивного ЭП приведена на рис. 3.32.

Регулятор тока в схеме выполнен на операционном усилителе $DA2$ в виде ПИ-регулятора. Использование ПИ-регулятора позволяет получить высокое быстродействие токового контура (пояснения см. ниже). На вход РТ через резисторы $R4$ и $R5$ поступает сигнал с выхода РС - U_{PC} и с выхода датчика тока (шунт Rh) - U_{OCT} .

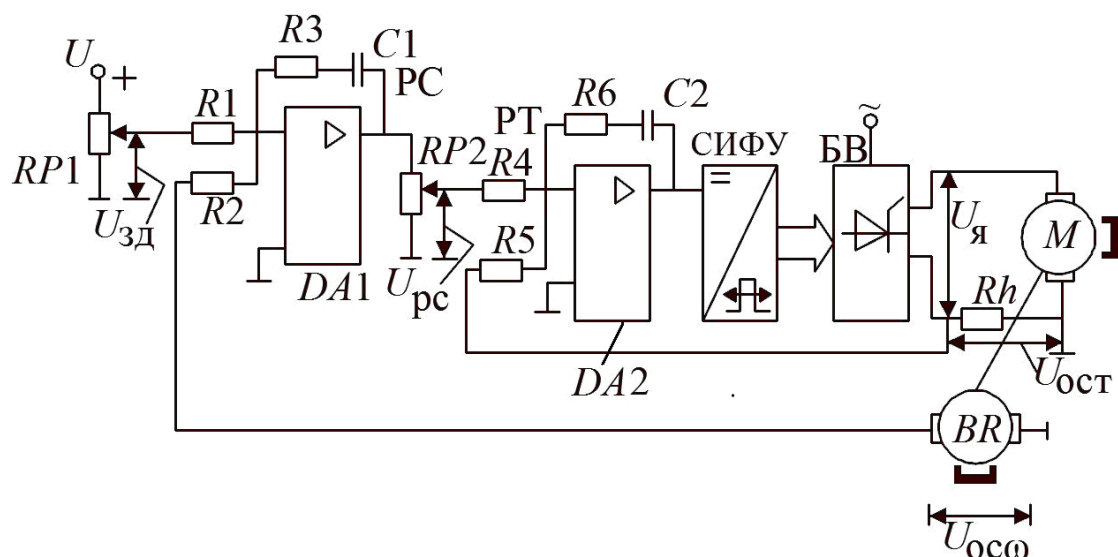


Рис. 3.32

Регулятор скорости выполнен на операционном усилителе $DA1$ в виде ПИ-регулятора. Использование ПИ-регулятора в скоростном контуре придает астатизм системе (см. пояснения ниже). В астатической системе при использовании идеального регулятора статическая ошибка в поддержании скорости сводится к нулю. На вход РС через $R1$ поступает сигнал $U_{3д}$ с датчика скорости (потенциометр $RP1$) и через $R2$ - сигнал отрицательной обратной связи $U_{Oс\omega}$ по скорости, снимаемый с тахогенератора. Для настройки значения тока отсечки в схеме предусмотрен потенциометр $RP2$. Максимальное значение напряжения на выходе РС определяется насыщением усилителя. На вход РТ подается часть выходного напряжения РС, снимаемого с делителя $RP2$. Перемещая движок $RP2$, например вниз, можно уменьшать максимальное значение сигнала U_{PC} . Этот сигнал является задающим для внутреннего токового контура, а его максимальное значение определяет максимальный ток якоря - ток отсечки.

3.7.2. СТАНДАРТНЫЕ НАСТРОЙКИ КОНТУРОВ СПР

При проектировании и наладке СПР электроприводов используются стандартные настройки контуров на **модульный оптимум (МО)** и **симметричный оптимум (СО)**.

При настройке системы передаточную функцию регулятора выбирают так, чтобы после его включения передаточная функция разомкнутой системы приняла вид

$$W_{\text{раз}}^{\text{МО}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(1 + T_{\mu}p)}, \quad (3.18)$$

а при настройке по второму условию -

$$W_{\text{раз}}^{\text{СО}}(p) = \frac{1 + 4T_{\mu}p}{8T_{\mu}^2p^2(1 + T_{\mu}p)}, \quad (3.19)$$

где T_{μ} - «малая» некомпенсируемая постоянная времени, в качестве которой принимается постоянная времени УВ.

Асимптотические ЛАХ и ЛФХ разомкнутой системы L_{p1} и φ_{p1} системы, настроенной на МО, и L_{p2} и φ_{p2} системы, настроенной на СО, приведены на рис. 3.33.

Логарифмические амплитудные характеристики двух систем совпадают, начиная с частоты $\omega_c = \frac{1}{T_{\mu}}$, и имеют одинаковую частоту среза $\omega_{\text{ср}} = 1/2T_{\mu}$.

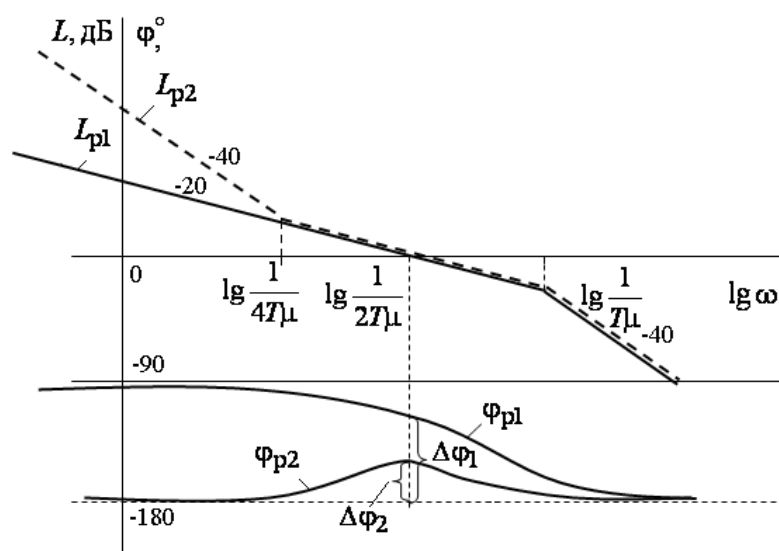


Рис. 3.33

Запас устойчивости по фазе у системы, настроенной по условиям МО,

$$\Delta\varphi_1 = \pi + \left(-\frac{\pi}{2} - \arctg \omega_{\text{ср}} T_{\mu} \right) = \frac{\pi}{2} - \arctg 0,5 = 63,5^{\circ}$$

намного превышает запас по фазе системы, настроенной по условиям СО, $\Delta\varphi_2 = \pi + (-\pi - \arctg \omega_{\text{ср}} T_{\mu} + \arctg 4\omega_{\text{ср}} T_{\mu}) = \arctg 0,5 + \arctg 2 = 36,9^{\circ}$, поэтому следует ожидать большего перерегулирования у систем, настроенных на СО.

Передаточные функции замкнутых систем, синтезированных по условиям МО и СО, имеют вид

$$W_3^{\text{МО}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1}, \quad (3.20)$$

$$W_3^{\text{СО}}(p) = \frac{1 + 4T_{\mu} p}{(2T_{\mu} p + 1)(4T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1)}. \quad (3.21)$$

Графики переходных процессов по управляющему воздействию в системах, настроенных на МО и СО, приведены на рис. 3.34.

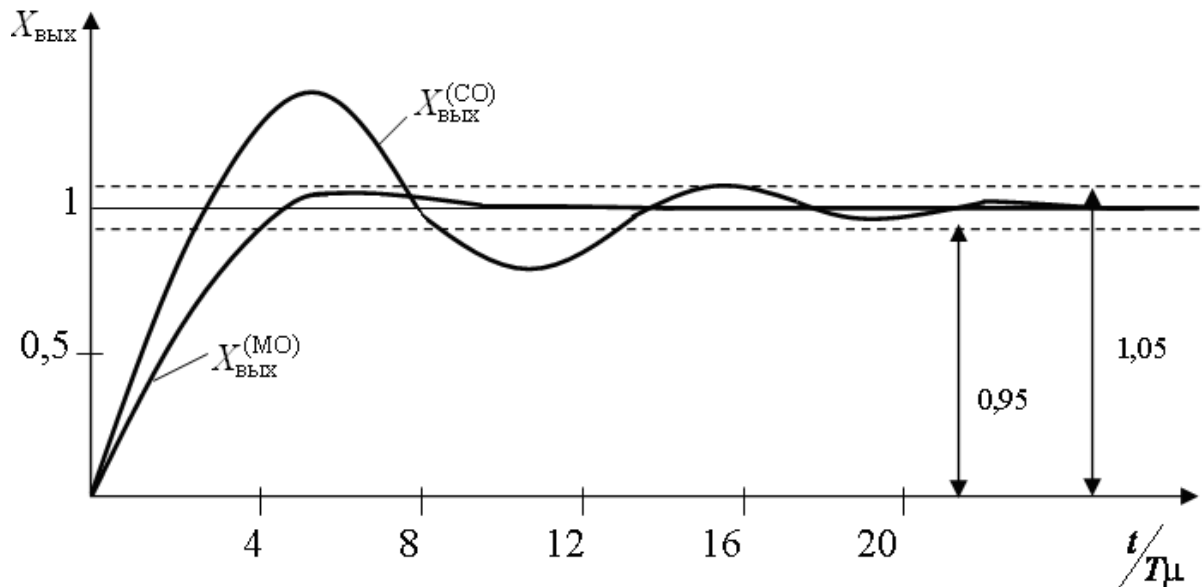


Рис. 3.34

Переходный процесс в системе, настроенной по условиям МО, имеет перерегулирование $\sigma = 4,3\%$ и время регулирования для 5%-ной зоны допустимых отклонений $t_{\text{пу}} = 4,1T_{\mu}$.

Переходный процесс в системе, настроенной по условиям СО, имеет большее перерегулирование $\sigma = 43,5\%$ и время регулирования $t_{пу} = 12,5T_{\mu}$. При необходимости перерегулирование в такой системе можно понизить за счет включения на её входе сглаживающего фильтра или задатчика интенсивности с передаточной функцией

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{1 + 4T_{\mu}p}.$$

При установке фильтра перерегулирование в системе удастся снизить до $\sigma=8\%$.

Для систем электропривода, работающих в режиме стабилизации скорости, важнейшими являются показатели качества переходного процесса по возмущающему воздействию, в качестве которого рассматривается момент (статический ток) сопротивления механизма.

Переходные характеристики СПР - графики изменения скорости при единичном скачкообразном возрастании момента - приведены на рис. 3.35. Они построены для отклонения скорости от установившегося значения, т.е. под $X_{вых}$ в данном случае следует понимать отклонение скорости $\Delta\omega$.

Из анализа переходных характеристик следует, что в системе, настроенной по условиям СО, отклонение скорости с течением времени стремится к нулю. Иными словами, статическая ошибка при такой настройке равна нулю. В системе, настроенной по условиям МО, возникает установившееся отклонение скорости, т.е. такая система имеет статическую ошибку. Можно показать [7], что ее величина определяется выражением

$$X_{вых}^{МО}(\infty) = -\frac{4T_{\mu}}{T_{м}} \Delta\omega_{раз},$$

где $\Delta\omega_{раз}$ - статическая ошибка разомкнутой системы; $T_{м}$ - электромеханическая постоянная двигателя.

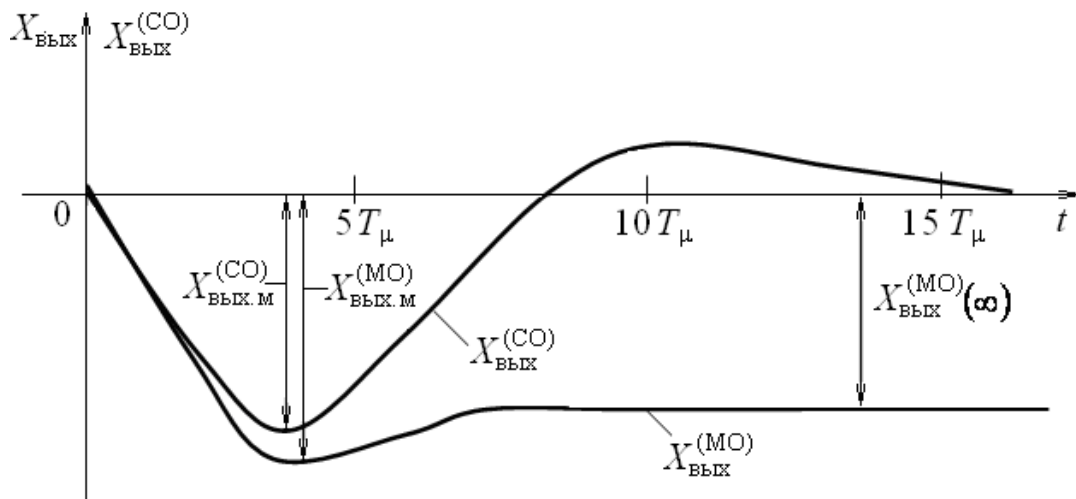


Рис. 3.35

Следовательно, при $T_{\mu} > 4T_M$ статическая ошибка в СПР превышает величину статической ошибки разомкнутой системы, что во многих случаях является неприемлемым.

Таким образом, переходный процесс по задающему воздействию в системе, настроенной по условиям МО, близок к оптимальному, а переходный процесс по возмущающему воздействию, из-за большой величины статической ошибки, является неудовлетворительным. У системы, настроенной на СО, переходный процесс по задающему воздействию имеет худшие, по сравнению с ТО, показатели качества (большие значения σ и $t_{\text{пу}}$), а по возмущающему воздействию протекает достаточно быстро и с нулевой статической ошибкой.

3.7.3. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Синтез систем подчиненного регулирования начинается с разбиения объекта управления на элементарные динамические звенья, содержащие не более двух больших постоянных времени. Затем по числу выделенных звеньев включают регуляторы, которые образуют с соответствующими звеньями замкнутые контуры. Расчет параметров регуляторов начинают с внутреннего контура и заканчивают внешним.

Применительно к СПР электропривода, как показано выше, внутренним контуром является контур регулирования тока якоря, а внешним - контур регулирования угловой скорости двигателя. Рассмотрим мето-

дику синтеза регуляторов тока и скорости, считая, что питание якоря двигателя осуществляется от тиристорного (управляемого вентильного) преобразователя. Для расчетов используем структурную схему системы подчиненного регулирования, приведенную на рис. 3.36.

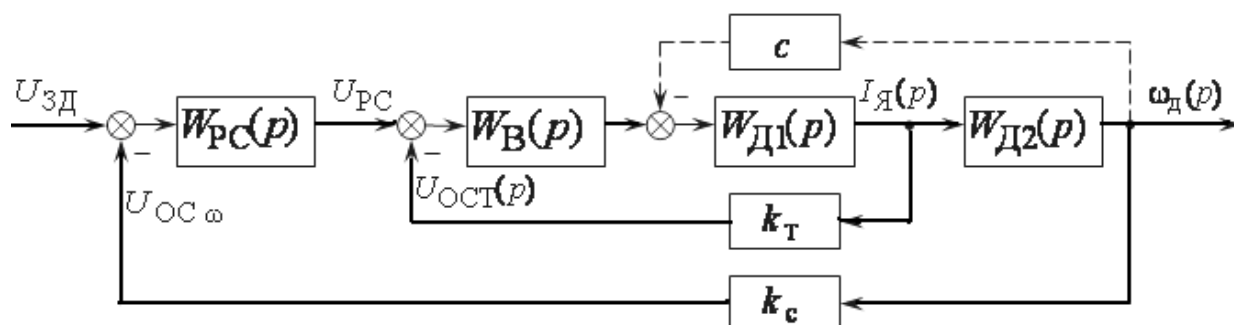


Рис. 3. 36

Динамические свойства вентильного преобразователя опишем в соответствии с изложенным выше передаточной функцией апериодического звена

$$W_B(p) = \frac{k_B}{1 + T_B p}.$$

Причем постоянную времени вентильного преобразователя примем за «малую» некомпенсируемую постоянную времени токового контура:

$$T_{\mu m} = T_B.$$

Датчики обратной связи по току и угловой скорости двигателя рассматриваются как безынерционные звенья с коэффициентами передачи k_T и k_c .

В соответствии с принципом построения системы электродвигатель представлен двумя типовыми звеньями:

$$W_{д1}(p) = \frac{1}{R_{\text{я}}(1 + T_{\text{э}} p)}; \quad W_{д2}(p) = \frac{k_{\text{д}} R_{\text{я}}}{T_{\text{м}} p}.$$

В расчетах СПР часто пренебрегают действием внутренней отрицательной обратной связи (ООС) по ЭДС двигателя (на рисунке она показана пунктиром). Погрешность при этом определяется соотношением некомпенсированной постоянной времени скоростного кон-

тура $T_{\mu c}$ и электромеханической постоянной времени T_M и будет тем меньше, чем меньше отношение $T_{\mu c}/(T_{\mu c}+T_M)$

Расчет СПР начинается с контура регулирования тока, который, как правило, настраивают по модульному оптимуму. Передаточная функция регулятора тока $W_{\text{рт}}(p)$ выбирается из условия равенства результирующей передаточной функции разомкнутого оптимизируемого контура желаемой передаточной функции (3.18):

$$W_{\text{рт}}(p) \frac{k_T k_B}{R_{\text{я}}(1 + T_{\mu \text{т}} p)(1 + T_{\text{э}} p)} = \frac{1}{2T_{\mu \text{т}} p(1 + T_{\mu \text{т}} p)}.$$

Из последнего соотношения следует

$$W_{\text{рт}}(p) = \frac{1 + T_{\text{э}} p}{T_{\text{ит}} p},$$

где $T_{\text{ит}} = \frac{2k_T k_B T_{\mu \text{т}}}{R_{\text{я}}}.$

Передаточная функция замкнутого контура регулирования тока якоря

$$W_{\text{зт}}(p) = \frac{1}{k_T (2T_{\mu \text{т}}^2 p^2 + 2T_{\mu \text{т}} p + 1)}.$$

При рассмотрении контура регулирования угловой скорости (рис. 3.37) оперируют с упрощенной передаточной функцией $W_{\text{зт}}(p)$, в знаменателе которой пренебрегают слагаемым, содержащим p^2 . Передаточная функция регулятора скорости $W_{\text{рс}}(p)$, как и в случае контура регулирования тока якоря, находится из условия равенства результирующей передаточной функции разомкнутого оптимизируемого контура скорости желаемой передаточной функции (1) или (4):

$$\frac{k_c k_d R_{\text{я}} W_{\text{рс}}(p)}{k_T T_M p(1 + T_{\mu c} p)} = W_{\text{жр}}(p),$$

где некомпенсируемая постоянная скоростного контура принимается $T_{\mu c} = 2T_{\mu \text{т}}.$

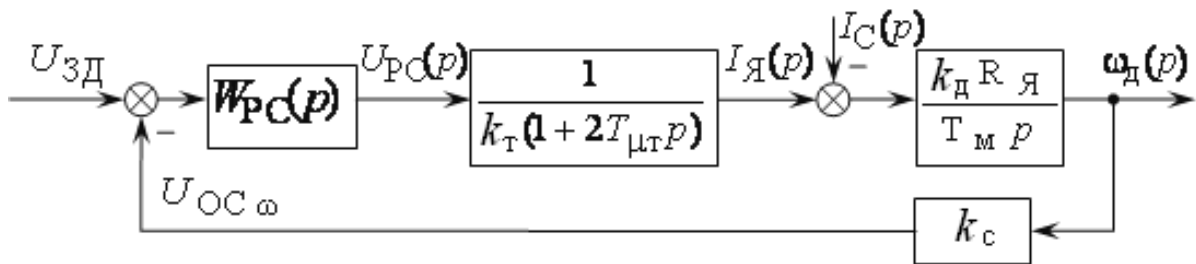


Рис. 3.37

При настройке на МО передаточная функция $W_{pc}(p)$ совпадает с передаточной функцией П-регулятора:

$$k_{pc} = \frac{k_T T_M}{2k_c k_D R_{Я} T_{\mu c}}. \quad (3.22)$$

При настройке контура по СО передаточная функция $W_{pc}(p)$ совпадает с передаточной функцией ПИ-регулятора:

$$W_{pc}(p) = \frac{1 + 4T_{\mu c}p}{T_{ис}p} = k_{pc} + \frac{1}{T_{ис}p}, \quad (3.23)$$

где $T_{ис} = \frac{8T_{\mu c}^2 k_c k_D R_{Я}}{k_T T_M}.$

Еще раз отметим, что настройку скоростного контура на МО используют, когда не требуется высокой точности стабилизации скорости. В тех же случаях, когда главным является обеспечение малой статической ошибки, используют настройку на СО, хотя качество переходного процесса по управляющему воздействию при такой настройке ухудшается.

4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО И СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

4.1. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДПТ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ (ПВ)

Схема подключения ДПТ ПВ приведена на рис. 4.1. В отличие от ДПТ независимого возбуждения здесь обмотка возбуждения LM включена последовательно с якорем и через нее протекает ток якоря $I_{\text{я}}$.

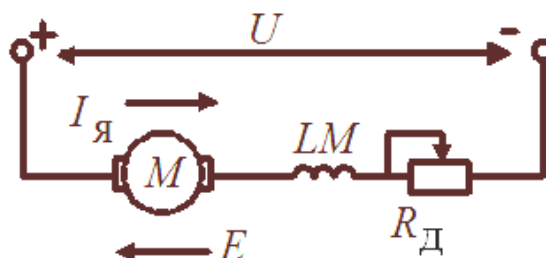


Рис. 4.1

Исходные выражения для электромеханической, механической характеристик и момента ДПТ ПВ можно записать в том же виде, что и для ДПТ независимого возбуждения:

$$\omega_{\text{д}} = \frac{U}{c\Phi} - \frac{I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{c\Phi}; \quad \omega_{\text{д}} = \frac{U}{c\Phi} - \frac{M(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{c^2\Phi^2}, \quad (4.1)$$

где $M = c\Phi I_{\text{я}}$.

В отличие от ДПТ НВ в этих выражениях сопротивление $R_{\text{я}}$ включает в себя и сопротивление обмотки возбуждения. Второе, наиболее важное, отличие заключается в том, что магнитный поток Φ является функцией тока якоря. Зависимость магнитного потока Φ от тока не является аналитической кривой (рис. 4.2), что не позволяет получить аналитические выражения для электромеханической и механической характеристик ДПТ ПВ. Приведенные уравнения позволяют провести лишь качественный анализ.

Естественная электромеханическая и механическая характеристики двигателя показаны на рис. 4.2, 4.3 (кривые 1). Очевидно, что при $I_{\text{я}}=0$ магнитный поток также равен нулю, и угловая скорость за счет первого слагаемого в выражениях (4.1) стремится к бесконечности (как говорят, двигатель идет «вразнос»), т.е. режим холостого хода для ДПТ ПВ является недопустимым.

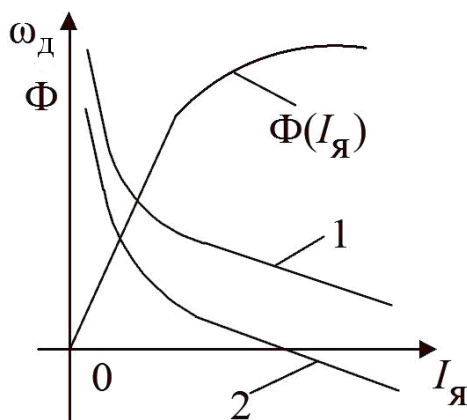


Рис. 4.2

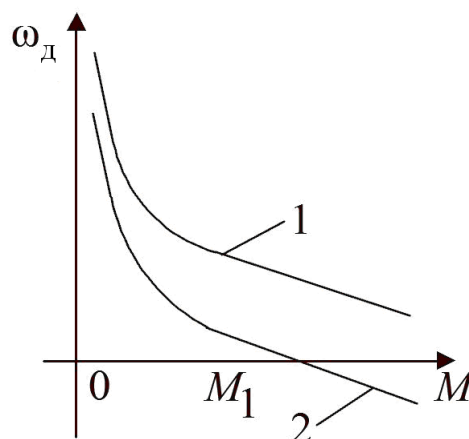


Рис. 4.3

При возрастании тока якоря магнитный поток Φ вначале растет примерно пропорционально току якоря, а скорость резко снижается (крутопадающий участок на характеристиках).

При больших токах двигатель работает в зоне, близкой к насыщению, поэтому его магнитный поток здесь мало меняется при изменении тока, и характеристика становится более жесткой, приближаясь по виду к характеристике ДПТ НВ.

На практике для расчетов используют так называемые универсальные характеристики ДПТ ПВ, которые приводятся в каталогах.

4.2. СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ДПТ ПВ

Для ДПТ ПВ, как и для ДПТ НВ, возможны три основных способа регулирования скорости:

- введением добавочных сопротивлений в цепь якоря;
- изменением подводимого напряжения;
- изменением потока возбуждения.

Регулирование угловой скорости введением добавочных сопротивлений является простейшим способом регулирования и широко используется в подъемных и транспортных механизмах. Как следует из уравнений (4.1), при увеличении добавочного сопротивления R_d второе слагаемое в этих выражениях увеличивается, т.е. увеличивается падение скорости от нагрузки. Соответственно электромеханическая и механическая характеристики в области больших токов становятся более крутопадающими (кривые 2 на рис. 4.2, рис. 4.3 - характеристики с R_d). Введение добавочных сопротивлений в цепь якоря ДПТ ПВ позволяет, как и для ДПТ НВ, регулировать скорость в относительно небольшом диапазоне и ограничить ток якоря при пуске. Обычно величину добавочных сопротивлений изменяют ступенями с помощью релейно-контакторной аппаратуры.

Основные недостатки такого регулирования - значительные потери энергии в добавочном сопротивлении, небольшой диапазон регулирования, ступенчатость регулирования.

Регулирование угловой скорости 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 (4.1), 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.

Регулирование угловой скорости ослаблением потока возбуждения позволяет, как и для ДПТ НВ, получить скорости выше основной.

Действительно, как следует из уравнений (4.1), уменьшение потока Φ 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:

- двигатель имеет низкую скорость при больших нагрузках и высокую - при малых, тем самым обеспечивается естественное регулирование скорости движения при изменении сопротивления перемещению;

- 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 двигателей последовательного возбуждения $M \sim I^2$. А так как при пуске двигателя $I = (1,5-2,0)I_N$, то двигатели последовательного возбуждения развивают значительно больший пусковой момент по сравнению с ДПТ НВ;

- 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.

4.3. ТОРМОЗНЫЕ РЕЖИМЫ ДПТ ПВ

Для ДПТ ПВ возможны два тормозных режима - торможение противовключением и динамическое торможение.

При торможении *противовключением* в цепь якоря вводится добавочное сопротивление для ограничения тока якоря. Механические характеристики при этом являются продолжением характеристик двигательного режима в области отрицательной угловой скорости (см. рис. 4.3). Такой режим торможения, как и для ДПТ НВ, может возникать, когда момент на валу двигателя превышает значение M_1 (см. рис. 4.3).

Динамическое торможение ДПТ ПВ может осуществляться двумя способами - с самовозбуждением и с независимым возбуждением. По первому способу якорь и обмотка возбуждения отключаются от сети и замыкаются на добавочное сопротивление (рис. 4.4). При этом обмотку возбуждения или якорь переключают так, чтобы направление тока в обмотке возбуждения не изменилось. Если этого не сделать, то произойдет размагничивание машины.

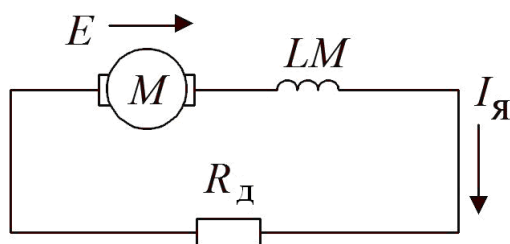


Рис. 4.4

При использовании второго способа - динамического торможения с независимым возбуждением - обмотку якоря замыкают на добавочное сопротивление, а на обмотку возбуждения подают напряжение от источника. Схема включения при этом аналогична схеме динамического торможения ДПТ НВ, аналогичны и получаемые тормозные характеристики.

Оба рассмотренных тормозных режима ДПТ ПВ малоэкономичны, так как энергия теряется на добавочных сопротивлениях.

В транспортных средствах очень важно обеспечить отдачу (рекуперацию) электроэнергии в сеть, например при движении на спуске. Однако, как уже отмечалось, генераторное торможение ДПТ ПВ невозможно. Чтобы решить эту проблему, в электротяге используют переключение обмотки возбуждения ДПТ с последовательного на независимое. Для этого отключают обмотку возбуждения от якоря и подают на нее через добавочное сопротивление напряжение сети. В результате машина работает с независимым возбуждением. Генераторное торможение такой машины рассмотрено выше.

4.4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ДПТ СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ (СВ)

Схема подключения ДПТ СВ приведена на рис. 4.5. Машина имеет две обмотки возбуждения - последовательную $LM1$ и независимую $LM2$.

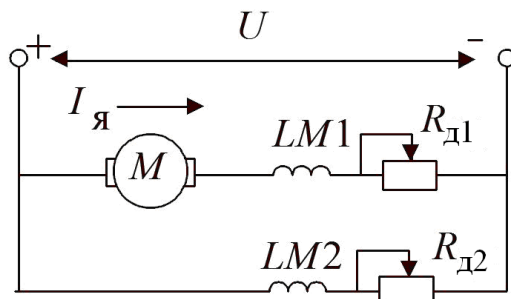


Рис. 4.5

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

$$\omega_d = \frac{U}{c\Phi} - \frac{I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{c\Phi}; \quad \omega_d = \frac{U}{c\Phi} - \frac{M(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{c^2\Phi^2}. \quad (4.2)$$

Причем здесь магнитный поток определяется как сумма магнитных потоков Φ_1 - обмотки $LM1$ и Φ_2 - $LM2$:

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

Для ДПТ СВ, в отличие от ДПТ ПВ, скорость идеального холостого хода имеет конечное значение и определяется потоком Φ_2 :

$$\omega_d = \frac{U}{c\Phi_2}.$$

Механическая характеристика двигателя смешанного возбуждения (кривая 3 на рис. 4.6) занимает промежуточное положение между характеристикой ДПТ НВ (кривая 1) и характеристикой ДПТ ПВ (кривая 2). Скорость ДПТ СВ при малых нагрузках изменяется значительно. При больших же нагрузках характеристика достаточно жесткая и близка к линейной, как у ДПТ НВ.

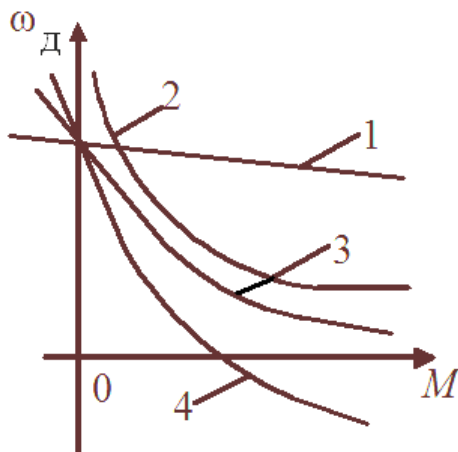


Рис. 4.6

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

- генераторное торможение;
- динамическое торможение;
- противовключением.

Генераторное торможение соответствует участку характеристики при скорости, большей ω_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 ω_0 $LM1$ обычно шунтируют, и машина работает как ДПТ НВ.

Для **динамического торможения** якорь двигателя замыкают на добавочное сопротивление, а $LM1$ отключают, чтобы избежать размагничивания. В результате машина работает как ДПТ НВ и имеет такие же тормозные характеристики.

При **торможении противовключением** в цепь якоря вводят добавочное сопротивление, ограничивающее ток якоря. Характеристика при этом становится более мягкой (кривая 4 на рис. 4.6). Машина переходит в режим противовключения при отрицательных значениях скорости.

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

- изменением подводимого напряжения;
- введением добавочного сопротивления в цепь якоря;
- изменением потока последовательной обмотки возбуждения.

Кроме того, для ДПТ СВ появляется дополнительная возможность регулирования скорости изменением 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 потоком обмотки независимого возбуждения.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

Тема 1. Общие сведения об электроприводе

1. Что понимают под ЭП?
2. Перечислите основные элементы ЭП.
3. Приведите примеры электродвигательных устройств, используемых в ЭП.
4. Приведите примеры рабочих машин, приводимых в движение ЭП.
5. Для чего служит механическое передаточное устройство в ЭП?
6. Для чего служит силовое преобразовательное устройство в ЭП?
7. Вал электродвигателя соединен с рабочей машиной через редуктор. Движение исполнительного органа рабочей машины - вращательное. **Известны:** момент статического сопротивления на валу исполнительного органа $M_{ио}=22$ Нм; передаточное отношение редуктора $i_p=10$; КПД редуктора $\eta=0,9$. **Рассчитайте** момент сопротивления, приведенный к валу двигателя.
8. Вал электродвигателя соединен с рабочей машиной через редуктор. Движение исполнительного органа рабочей машины - поступательное. **Известны:** сила сопротивления на исполнительном органе $F_{ио}=200$ Н; радиус приведения кинематической схемы $r=10$; КПД редуктора $\eta=0,9$. **Рассчитайте** момент сопротивления, приведенный к валу двигателя.
9. Вал электродвигателя соединен с рабочей машиной через редуктор. Движение исполнительного органа рабочей машины - враща-

тельное. **Известны:** момент инерции исполнительного органа $J_{ио}=0,25 \text{ кгм}^2$; момент инерции двигателя $J_{д}=0,05 \text{ кгм}^2$; передаточное отношение редуктора $i_p=10$; КПД редуктора $\eta=0,9$. **Рассчитайте** момент инерции, приведенный к валу двигателя (инерционностью элементов редуктора при расчете пренебречь).

10. Вал электродвигателя соединен с рабочей машиной через редуктор. Движение исполнительного органа рабочей машины - поступательное.

Известны: масса перемещаемых частей исполнительного органа $m=200 \text{ кг}$; момент инерции двигателя $J_{д}=0,06 \text{ кгм}^2$; радиус приведения кинематической схемы $\rho=10$. **Рассчитайте** момент инерции, приведенный к валу двигателя (инерционностью элементов редуктора при расчете пренебречь).

11. Что понимают под механической характеристикой рабочей машины?

12. Что понимают под механической характеристикой электродвигателя?

13. Приведите примеры механических характеристик рабочих машин.

14. Приведите примеры механических характеристик электродвигателей.

15. Запишите уравнение движения ЭП. Расшифруйте входящие в него переменные.

16. Как будет изменяться частота вращения ЭП, если момент сопротивления механизма больше момента двигателя?

17. Как будет изменяться частота вращения ЭП, если момент сопротивления механизма меньше момента двигателя?

18. Что понимают под статической устойчивостью ЭП?

Тема 2. Характеристики двигателей постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ)

1. Напишите уравнение электромеханической характеристики ДПТ НВ, расшифруйте входящие в него величины.

2. Напишите уравнение механической характеристики ДПТ НВ, расшифруйте входящие в него величины.
3. Напишите уравнение для естественной электромеханической характеристики ДПТ НВ, расшифруйте входящие в него величины.
4. Напишите уравнение для естественной механической характеристики ДПТ НВ, расшифруйте входящие в него величины.
5. Начертите естественную электромеханическую характеристику ДПТ НВ.
6. Начертите естественную механическую характеристику ДПТ НВ.
7. **Известны** номинальные данные ДПТ НВ: $U_{\text{НОМ}}=220\text{В}$; $I_{\text{НОМ}}=20\text{ А}$; $n_{\text{НОМ}}=2200\text{об/мин}$; $R_{\text{я}}=0,5\text{ Ом}$. **Рассчитайте** коэффициент передачи двигателя. Найдите частоту вращения двигателя при идеальном холостом ходе и падение скорости при номинальной нагрузке.
8. Напишите уравнение электромеханической характеристики ДПТ НВ при введении добавочного сопротивления в цепь якоря, расшифруйте входящие в него величины.
9. Напишите уравнение механической характеристики ДПТ НВ при введении добавочного сопротивления в цепь якоря, расшифруйте входящие в него величины.
10. **Известны** номинальные данные ДПТ НВ: $U_{\text{НОМ}}=110\text{В}$; $I_{\text{НОМ}}=10\text{ А}$; $R_{\text{я}}=1,2\text{ Ом}$; $n_{\text{НОМ}}=2200\text{об/мин}$. В цепь якоря включено добавочное сопротивление $R_{\text{доб}}=5\text{ Ом}$.
Рассчитайте коэффициент передачи двигателя. Найдите частоту вращения двигателя при идеальном холостом ходе и падение скорости при номинальной нагрузке.
11. Начертите естественную электромеханическую характеристику ДПТ НВ и характеристики при введении добавочных сопротивлений в цепь якоря.
12. Начертите естественную механическую характеристику ДПТ НВ и характеристики при введении добавочных сопротивлений в цепь якоря.
13. Начертите схему подключения ДПТ НВ при регулировании скорости введением добавочных сопротивлений в цепь якоря.

14. С какой целью в цепь якоря ДПТ НВ вводят добавочные сопротивления?
15. **Известны** номинальные данные ДПТ НВ: $U_{\text{НОМ}}=110\text{В}$; $I_{\text{НОМ}}=10\text{ А}$; $R_{\text{я}}=1,2\text{ Ом}$; $n_{\text{НОМ}}=2200\text{об/мин}$. **Рассчитайте** величину добавочного сопротивления, которое нужно ввести в цепь якоря, чтобы ограничить начальное значение пускового тока на уровне $2I_{\text{НОМ}}$.
16. Поясните, как можно регулировать скорость ДПТ НВ введением добавочных сопротивлений в цепь якоря. Ответ проиллюстрируйте соответствующими механическими характеристиками.
17. Начертите схему пуска и пусковую диаграмму ДПТ НВ при введении добавочных сопротивлений в цепь якоря.
18. Начертите схему подключения ДПТ НВ с электромагнитным возбуждением при регулировании угловой скорости изменением напряжения на якоре.
19. Начертите электромеханические характеристики ДПТ НВ при регулировании скорости изменением напряжения на якоре.
20. Напишите уравнение механической и электромеханической характеристик ДПТ НВ при регулировании скорости изменением напряжения на якоре.
21. ДПТ НВ работает на холостом ходу, частота вращения двигателя равна 2000 об/мин, напряжение на якоре номинальное. Какой будет частота вращения, если напряжение на якоре уменьшить в два раза?
22. **Известны** номинальные данные ДПТ НВ: $U_{\text{НОМ}}=220\text{В}$; $I_{\text{НОМ}}=16\text{ А}$; $R_{\text{я}}=0,2\text{ Ом}$; $n_{\text{НОМ}}=2200\text{об/мин}$. **Рассчитайте** и постройте естественную электромеханическую характеристику и характеристику при напряжении на якоре $U_{\text{я}}=0,2 U_{\text{НОМ}}$.
23. **Известны** номинальные данные ДПТ НВ: $U_{\text{НОМ}}=220\text{В}$; $I_{\text{НОМ}}=16\text{ А}$; $R_{\text{я}}=0,2\text{ Ом}$; $n_{\text{НОМ}}=2200\text{об/мин}$; $P_{\text{НОМ}}=4,4\text{ кВт}$. **Рассчитайте** и постройте естественную механическую характеристику и характеристику при напряжении на якоре $U_{\text{я}}=0,2 U_{\text{НОМ}}$.
24. Частота вращения ДПТ НВ регулируется изменением напряжения на якоре. Каким при этом будет длительно допустимый момент двигателя?

25. Какой диапазон регулирования можно получить при регулировании скорости ДПТ НВ изменением напряжения на якоре?

26. Начертите схему подключения ДПТ НВ при регулировании скорости ослаблением потока возбуждения.

27. Как изменяют поток возбуждения ДПТ НВ при регулировании скорости (уменьшают или увеличивают)? Как при этом меняется скорость холостого хода двигателя?

28. ДПТ НВ работает при номинальном потоке возбуждения и номинальном напряжении на якоре. Как изменится скорость холостого хода, если поток возбуждения уменьшить в 2 раза?

29. Падение скорости ДПТ НВ при номинальном токе якоря, номинальном потоке возбуждения и номинальном напряжении на якоре составляет 30 об/мин. Каким будет падение скорости при номинальном токе якоря, если поток возбуждения ослабить в 2 раза?

30. Начертите электромеханические характеристики ДПТ НВ при регулировании скорости ослаблением потока возбуждения.

31. Начертите механические характеристики ДПТ НВ при регулировании скорости ослаблением потока возбуждения. Покажите линию ограничения длительно допустимого момента двигателя.

32. Начертите естественную электромеханическую характеристику ДПТ НВ и характеристику при ослаблении потока возбуждения в 2 раза.

33. Начертите естественную механическую характеристику ДПТ НВ и характеристику при ослаблении потока возбуждения в 2 раза.

34. Как изменяются длительно допустимый момент и мощность ДПТ НВ при регулировании скорости изменением потока возбуждения?

35. Чем ограничивается диапазон регулирования скорости ДПТ НВ ослаблением потока возбуждения?

36. Начертите диаграммы изменения длительно допустимого момента и мощности ДПТ НВ при регулировании скорости изменением напряжения на якоре ослаблением потока возбуждения.

37. За счет чего изменяют частоту вращения ДПТ НВ при двухзонном регулировании?

38. Перечислите основные тормозные режимы ДПТ НВ.
39. Начертите естественную электромеханическую характеристику ДПТ НВ, покажите на ней участок генераторного торможения.
40. Начертите естественную электромеханическую характеристику ДПТ НВ и характеристику торможения противовключением.
41. Для чего при торможении противовключением ДПТ НВ в цепь якоря вводят добавочное сопротивление?
42. Начертите схему подключения ДПТ НВ при динамическом торможении.
43. Начертите электромеханические характеристики ДПТ НВ при динамическом торможении с различными значениями добавочного сопротивления в цепи якоря.
44. Какой из известных тормозных режимов ДПТ НВ энергетически наиболее экономичен? Почему?

Тема 3. Автоматическое управление угловой скоростью и током якоря ДПТ НВ в замкнутых системах электропривода

1. Начертите упрощенную схему системы ЭП с отрицательной обратной связью по скорости.
2. Начертите упрощенную схему системы ЭП с отрицательной обратной связью по скорости и узлом токовой отсечки.
3. С какой целью используют отрицательную обратную связь по скорости в системах ЭП?
4. Какую функцию выполняет тахогенератор в замкнутой системе с отрицательной обратной связью по скорости?
5. С какой целью используют токовую отсечку в системах ЭП? Что служит датчиком тока якоря?
6. Электропривод выполнен с отрицательной обратной связью по скорости и токовой отсечкой. Регулирование скорости осуществляется изменением напряжения на якоре. Начертите электромеханические характеристики ЭП, отметьте на них характерные участки.
7. Напишите уравнение, устанавливающее связь между статической ошибкой разомкнутой и замкнутой по скорости систем ЭП.

8. Напишите уравнение для статической ошибки системы ЭП с отрицательной обратной связью по напряжению.
9. В каких случаях целесообразно использовать системы ЭП с отрицательной обратной связью по напряжению на якоре?
10. С какой целью в замкнутые системы ЭП включают регуляторы?
11. Перечислите основные типы регуляторов, используемые в системах ЭП.
12. Начертите схему и переходную характеристику П - регулятора.
13. Начертите схему и переходную характеристику И - регулятора.
14. Начертите схему и переходную характеристику ПИ - регулятора.
15. Начертите схему и переходную характеристику ПИД - регулятора.
16. Начертите упрощенную схему системы «Г – Д» с обратной связью по току и токовой отсечкой.
17. За счет чего регулируется скорость двигателя в системе «Г – Д»?
18. Начертите электромеханические характеристики при регулировании скорости двигателя в системе «Г – Д» с обратной связью по скорости и токовой отсечкой.
19. За счет чего достигается процесс стабилизации скорости в системе «Г – Д»?
20. За счет чего ограничивается ток якоря двигателя в пусковых режимах системы «Г – Д»?
21. Как протекает процесс торможения двигателя в системе «Г – Д» при снижении напряжения на якоре?
22. Укажите основные недостатки системы электропривода, выполненной по схеме «Г – Д».
23. Укажите основные элементы тиристорного преобразователя и поясните их назначение.
24. Начертите диаграммы тока и напряжения для тиристорного преобразователя, выполненного по однопульсной схеме, при работе на R -нагрузку.
25. Начертите диаграммы тока и напряжения для тиристорного преобразователя, выполненного по однопульсной схеме, при работе на $R-L$ нагрузку.

26. Начертите диаграммы тока и напряжения для тиристорного преобразователя, выполненного по однофазной мостовой схеме, при работе на $R-L$ нагрузку.

27. Начертите диаграммы тока и напряжения для тиристорного преобразователя, выполненного по однофазной схеме с нулевой точкой, при работе на R нагрузку.

28. Напишите уравнение для тока якоря при работе управляемого вентильного преобразователя в выпрямительном режиме на якорь двигателя постоянного тока.

29. Начертите диаграммы тока и напряжения для тиристорного преобразователя, выполненного по однофазной схеме с нулевой точкой, при работе в инверторном режиме.

30. Напишите уравнение для тока якоря при работе управляемого вентильного преобразователя в инверторном режиме на якорь двигателя постоянного тока.

31. Начертите упрощенную схему реверсивного электропривода с управляемым вентильным преобразователем.

32. Поясните, при каких условиях возможен инверторный режим работы управляемого вентильного преобразователя.

33. Укажите основные достоинства и недостатки электроприводов с управляемыми выпрямителями.

34. С какой целью в системы регулирования вводят регуляторы с интегральной составляющей?

35. Какие контуры содержит система подчиненного регулирования ДПТ НВ?

36. С чем связано название системы *подчиненного* регулирования?

37. За счет чего достигается ограничение тока якоря в системах подчиненного регулирования ДПТ НВ?

38. Какие стандартные настройки используют для контура тока якоря и контура скорости в системах подчиненного регулирования ДПТ НВ?

39. Какой тип регулятора используют в контуре регулирования тока якоря в системах подчиненного регулирования ДПТ НВ?

40. Какие типы регуляторов используют в контуре регулирования скорости в системах подчиненного регулирования ДПТ НВ?

41. Чем отличаются переходные процессы по возмущению в СПР при настройке скоростного контура на технический и симметричный оптимум?

42. При каких условиях целесообразно настраивать контур скорости СПР на симметричный оптимум?

43. При каких условиях целесообразно настраивать контур скорости СПР на технический оптимум?

Тема 4. Механические характеристики и регулирование скорости ДПТ последовательного и смешанного возбуждения

1. Начертите схему подключения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

2. Напишите уравнение для электромеханической характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

3. Начертите естественную электромеханическую характеристику двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

4. Начертите электромеханическую характеристику двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при введении добавочных сопротивлений в цепь якоря.

5. Перечислите возможные тормозные режимы двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

6. Начертите схему подключения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при динамическом торможении.

7. Начертите схему подключения двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.

8. Напишите уравнение для электромеханической характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.

9. Начертите естественную электромеханическую характеристику двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.

10. Начертите электромеханическую характеристику двигателя постоянного тока смешанного возбуждения при введении добавочных сопротивлений в цепь якоря.

11. Перечислите возможные тормозные режимы двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии даны общие понятия об электроприводе, рассмотрены способы регулирования скорости, тормозные режимы машин постоянного тока, принципы построения систем автоматического управления двигателями постоянного тока независимого возбуждения.

Рассмотренные вопросы не исчерпывают всего многообразия применяемых и перспективных электромеханических преобразователей и электроприводов.

В настоящее время перспективным регулируемым приводом для многих механизмов является электропривод с асинхронным двигателем с частотным регулированием скорости. Асинхронный двигатель по своим эксплуатационным свойствам, массогабаритным показателям значительно превосходит двигатель постоянного тока и имеет более низкую стоимость. Однако необходимость выпрямителей и достаточно сложных преобразователей частоты в значительной мере ослабляет эффект снижения стоимости и массогабаритных показателей регулируемого электропривода с асинхронными двигателями.

Электроприводы с машинами переменного тока будут рассмотрены во второй части учебного пособия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильинский, Н.Ф. Основы электропривода/ Н.Ф. Ильинский. - М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 224 с.
2. Онищенко, Г.Б. Электрический привод/ Г.Б. Онищенко. - М.: РАСХН, 2003. – 320 с.
3. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода/ М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. М.: Энергоиздат, 1981. - 576 с.
4. Зимин, Е.Н. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями / Е.Н. Зимин, В.Л. Кацевич, С.К. Козырев - М.: Энергоиздат, 1981. – 192 с.
5. Ключев, В.И. Теория электропривода/ В.И. Ключев. - М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
6. Абакумов, А.М. Электрический привод. Электроприводы постоянного тока: учеб. пособ./ А.М. Абакумов; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2004. – 94 с.
7. Рапопорт, Э.Я. Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока: конспект лекций / Э.Я. Рапопорт. - Куйбышев: КПТИ, 1985. – 56 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	3
1. Общие сведения об электроприводе	6
1.1. Понятие электропривода	6
1.2. Приведение моментов и сил сопротивления, инерционных масс и моментов инерции	9
1.3. Механические характеристики электродвигателей и производственных механизмов	13
1.4. Уравнение движения электропривода. Статическая устойчивость электропривода	14
1.5. Диапазон регулирования скорости. Статические ошибки	17
2. Механические характеристики и способы регулирования скорости двигателей постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения (НВ)	20
2.1. Электромеханические и механические характеристики ДПТ НВ	20
2.2. Регулирование угловой скорости ДПТ НВ введением добавочных сопротивлений в цепь якоря	24
2.3. Регулирование угловой скорости ДПТ НВ изменением напряжения на якоре	28
2.4. Регулирование угловой скорости ДПТ изменением магнитного потока	30
2.5. Тормозные режимы ДПТ НВ	33
2.6. Примеры расчета статических характеристик ДПТ НВ	36
2.7. Динамические свойства электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением	47
3. Автоматическое управление угловой скоростью и током якоря ДПТ НВ в замкнутых системах электропривода	51
3.1. Регулирование угловой скорости в системе УП-ДПТ НВ с отрицательной обратной связью по скорости и отсечкой по току якоря	51
3.2. Уравнение статики системы УП-ДПТ НВ с отрицательной обратной связью по угловой скорости	56
3.3. Регулирование угловой скорости в системе УП-ДПТ НВ с отрицательной обратной связью по напряжению	60
3.4. Регуляторы в системах ЭП	62
3.5. Регулирование угловой скорости в системе генератор-двигатель (Г-Д) с обратной связью по скорости и токовой отсечкой	69
3.6. Регулирование угловой скорости в системе управляемый выпрямитель - двигатель постоянного тока независимого возбуждения (УВ - ДПТ НВ)	72
3.7. Системы подчиненного регулирования тока якоря и угловой скорости ДПТ НВ	95

4. Механические характеристики и способы регулирования скорости двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения	105
4.1. Электромеханические и механические характеристики ДПТ последовательного возбуждения (ПВ)	105
4.2. Способы регулирования угловой скорости ДПТ ПВ	106
4.3. Тормозные режимы ДПТ ПВ	108
4.4. Механические характеристики и регулирование скорости ДТП смешанного возбуждения (СВ).....	110
Вопросы для самопроверки	112
Заключение	121
Список литературы	121

Учебное издание

*АБАКУМОВ Александр Михайлович,
ТУЛУПОВ Павел Владимирович,
ЧАБАНОВ Юрий Александрович*

Электрический привод

Часть 1
Электроприводы
постоянного тока

Редактор *С.И. Костерина*
Компьютерная верстка *И.О. Миняева*
Выпускающий редактор *Н.В. Беганова*

Подп. в печать 06.10.10.
Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Усл. п. л. 7,21. Уч.-изд. л. 7,18.
Тираж 75 экз. Рег. №. 178/10

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии
Самарского государственного технического университета
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус №8