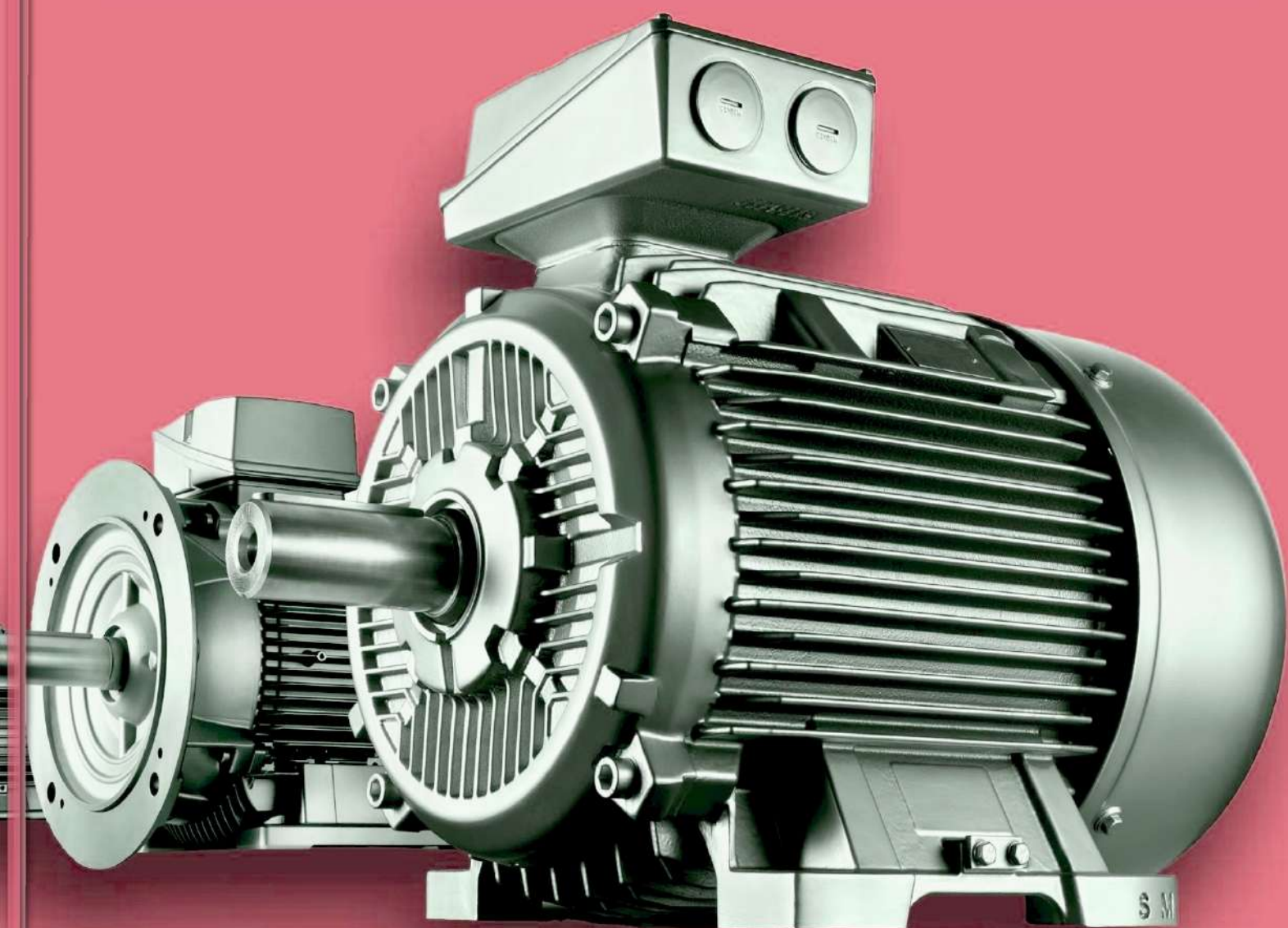


Учебное пособие

А.М.Макаров, А.С.Сергеев, Е.Г.Копылов
Ю.П.Сердобинцев

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



А.М. МАКАРОВ, А.С. СЕРГЕЕВ,
Е.Г. КРЫЛОВ, Ю.П. СЕРДОБИНЦЕВ

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



Учебное пособие

*для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по направлению подготовки
«Автоматизация технологических процессов и производств».*



Волгоград
2016

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности Российского государственного университета нефти и газа им. И. М. Губкина, зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. *А. В. Егоров*;

профессор кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления» Московского государственного технологического университета «СТАНКИН», д-р техн. наук, проф. *Т. Г. Гришина*

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Макаров, А. М.

Системы управления автоматизированным электроприводом переменного тока : учеб. пособие / А. М. Макаров, А. С. Сергеев, Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 192 с.

ISBN 978-5-9948-2076-6

Рассмотрены вопросы механики электропривода переменного тока, описаны способы управления асинхронным электродвигателем. Раскрываются некоторые особенности разомкнутого и замкнутого автоматизированного управления электроприводом переменного тока. Особое внимание уделено современным и перспективным способам управления, рассмотрен способ частотного регулирования скорости в системах «преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель». Рассмотрены особенности применения автоматизированного электропривода в типовых производственных механизмах, например, в металлообрабатывающем оборудовании, транспортно-складских системах, манипуляторах промышленных роботов, буровых установках и др.

Предназначено для студентов всех форм обучения, направления подготовки : 27.03.04 «Управление в технических системах» и 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств».

Ил. 78. Табл. 7. Библиогр. : 31 назв.

ISBN 978-5-9948-2076-6

© Волгоградский государственный
технический университет, 2016

© А. М. Макаров, А. С. Сергеев,
Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев, 2016

Оглавление

Введение.....	5
ГЛАВА 1. Механика автоматизированного электропривода	8
1.1. Расчетные схемы механической части электропривода.....	8
1.2. Уравнение механического движения	11
1.3. Механические характеристики электропривода и рабочей машины.....	13
1.4. Основные расчетные параметры и схемы включения асинхронных электродвигателей.....	17
1.5. Перечень контрольных вопросов к главе 1	20
ГЛАВА 2. Способы управления асинхронным электродвигателем.....	22
2.1. Регулирование скорости	22
2.1.1. Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей путем изменения напряжения	22
2.1.2. Импульсное регулирование скорости асинхронного двигателя.....	29
2.1.3. Частотное регулирование скорости асинхронного двигателя	35
2.2. Регулирование момента и тока	38
2.3. Перспективные способы управления электроприводом	45
2.4. Перечень контрольных вопросов к главе 2	56
ГЛАВА 3. Разомкнутые системы управления электроприводом	58
3.1. Управление пуском электродвигателей	60
3.2. Торможение асинхронного двигателя.....	62
3.3. Аварийная защита и блокировки АД	70
3.4. Схемы управления реверсом двигателей.....	76
3.5. Схема управления при зависимом пуске двигателей	77
3.6. Схема управления асинхронным двигателем в функции времени.....	78
3.7. Перечень контрольных вопросов к главе 3	79
ГЛАВА 4. Замкнутые системы управления электродвигателем	81
4.1. Элементы и устройства замкнутых систем управления.....	81
электроприводом	81
4.1.1. Классификация элементов АЭП	81
4.1.2. Регуляторы	82
4.1.3. Датчики координат АЭП	89
4.1.4. Задающие элементы	97
4.2. Системы управления параллельного действия	100
4.3. Системы управления асинхронным электродвигателем последовательного действия.....	103
4.4. Перечень контрольных вопросов к главе 4	110

ГЛАВА 5. Частотное управление асинхронным двигателем.....	112
5.1. Методы управления	113
5.2. Построение силовой части	116
5.3. Построение системы управления преобразователей частоты	120
5.4. Перечень контрольных вопросов к главе 5	129
ГЛАВА 6. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов.....	131
6.1. Металлообрабатывающее оборудование	131
6.2. Транспортные и подъемно-транспортные устройства	139
6.3. Буровая техника.....	147
6.4. Системы вентиляции и кондиционирования производственных помещений	151
6.5. Манипуляторы промышленных роботов	154
6.6. Перечень контрольных вопросов к главе 6	157
ГЛАВА 7. Моделирование автоматизированного электропривода переменного тока в <i>MATLAB Simulink</i>	159
7.1. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по данным каталога	160
7.2. Исследование модели асинхронного двигателя в <i>MATLAB Simulink</i>	163
7.3. Мягкие частотный пуск и остановка асинхронного двигателя	170
7.4. Частотно-токовый электропривод с векторным управлением	174
7.5. Перечень контрольных вопросов к главе 7.....	186
Список использованной литературы	188

Введение

Во многих отраслях промышленности производительность технологического оборудования в значительной степени определяется уровнем его автоматизации, основным звеном которой является электропривод. Прогресс во многих отраслях науки и техники (машиностроение, микроэлектроника, транспорт, космическая техника, добыча и переработка полезных ископаемых и т. д.) все более подчеркивает его важнейшую роль.

Большинство людей редко используют понятие «электропривод», хотя сталкиваются с этим понятием ежедневно: комфортное движение в электропоезде, лифте, автомобиле, использование многочисленных бытовых приборов (пылесос, миксер, кондиционер, вентилятор, кухонный комбайн, автоматическая стиральная машина) и т. д.

Автоматизированный электропривод чаще всего не рассматривается как отдельное устройство, он является важным звеном иерархической структуры автоматизации. Наиболее ярко сущность автоматизированного электропривода проявляется в электросталеплавильных установках и металлорежущих станках с числовым программным управлением, робототехнических комплексах и автоматических линиях. Понимание устройства и работы электропривода – это прежде всего понимание физических процессов, происходящих в нем, умение сопоставить современные технические решения в области микро- и силовой электроники, а также современного программного обеспечения. Это необходимо всем, чья деятельность непосредственно связана с проектированием, изготовлением и эксплуатацией установок, в которых используется автоматизированный электропривод и системы управления им.

В настоящее время на смену регулируемому электроприводу постоянного тока пришел регулируемый электропривод переменного тока, прежде всего на базе асинхронных короткозамкнутых двигателей. Асинхрон-

ные двигатели являются самыми распространенными электрическими машинами, но до недавнего времени они применялись в основном в нерегулируемых электроприводах для вращения механизмов, работающих с постоянной скоростью: вентиляторов, насосов, компрессоров, конвейеров.

В последние годы в связи с появлением новых поколений транзисторов и тиристоров, а также относительно недорогих микропроцессоров высокого быстродействия выпуск и эксплуатация автоматизированных электроприводов переменного тока на базе асинхронных электродвигателей стали экономически целесообразными. Это объясняется также и тем, что технология производства асинхронных двигателей в настоящее время практически полностью автоматизирована.

Электрические машины переменного тока обладают некоторыми преимуществами. В них отсутствуют ограничения по предельной мощности, а питание обмотки статора может производиться от сети с напряжением в десятки киловольт. Отсутствие щеточно-коллекторного узла значительно сокращает эксплуатационные затраты на обслуживание электродвигателей.

В представленном учебном пособии уделено внимание электроприводам переменного тока и системам управления ими, включающим наиболее перспективные способы регулирования основных параметров электропривода.

В последнее время частотно-регулируемый электропривод переменного тока стал главным типом регулируемого электропривода, серийно выпускаемого ведущими отечественными и зарубежными электротехническими компаниями.

Дисциплина «Автоматизированный электропривод» входит в вариативную часть профессионального цикла рабочих учебных планов подготовки бакалавров по направлениям 27.03.04 «Управление в технических системах» и 15.03.04 «Автоматизация технологических

процессов и производств».

В учебном пособии приведены общие теоретические положения, касающиеся механики автоматизированного электропривода, а также наиболее распространенные и перспективные способы управления им. Рассмотрены разомкнутые (релейно-контактные) системы управления пуском и торможением электропривода, основные виды его защиты и блокировки, а также замкнутые системы управления последовательного и параллельного действия.

В отдельную главу выделено векторное частотное управление асинхронным двигателем как наиболее перспективное и часто используемое в современной промышленности.

В пособии рассмотрены автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов (станков, промышленных роботов, буровых установок, систем вентиляции и кондиционирования производственных помещений и др.), а также основы моделирования автоматизированного электропривода переменного тока на ЭВМ с использованием пакетов прикладных инженерных программ.

ГЛАВА 1. МЕХАНИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

1.1. Расчетные схемы механической части электропривода

Элементы, образующие механическую часть электропривода (ЭП), связаны между собой и с исполнительным органом рабочей машины, они оказывают друг на друга соответствующее воздействие. Поэтому при анализе механического движения какого-либо элемента необходимо учитывать влияние на него других элементов, образующих кинематическую схему ЭП. Это достигается пересчетом по определенным правилам сил, моментов, масс и моментов инерции к элементу, движение которого рассматривается. Такие операции в теории ЭП получили название *операции приведения*. Пересчитанные переменные и параметры называют *приведенными*.

Операцию приведения можно выполнять относительно любого элемента, движение которого подлежит анализу. Обычно в качестве такого элемента выбирают двигатель, являющийся источником механического движения, или исполнительный орган рабочей машины.

В результате выполнения операции приведения получают расчетные схемы механической части ЭП, позволяющие легче осуществить анализ механического движения.

Приведение масс и моментов инерции элементов, их упругости, сил и моментов, на них действующих, а также зазоров и люфтов осуществляется на основе закона сохранения энергии.

Приведение моментов инерции и масс вала двигателя вращательного движения осуществляется по формулам:

- при вращательном движении k -го элемента:

$$J_{\text{прк}} = \frac{J_k}{i_k^2};$$

- при поступательном движении i -го элемента:

$$J_{\text{при}} = m_i \rho_i^2,$$

где J_k – момент инерции k -го элемента; m_i – масса i -го элемента; i_k – передаточное число кинематической цепи между k -м элементом и элементом приведения, $i_k = \omega / \omega_k$ (ω, ω_k – соответственно угловые скорости вращения элемента приведения и k -го элемента); ρ_i – радиус приведения кинематической цепи между i -м элементом и элементом приведения, $\rho_i = v_i / \omega$ (v_i – скорость поступательного движения i -го элемента).

Если приведение осуществляется к валу двигателя, то далее определяется общий момент инерции как сумма момента инерции ротора двигателя и приведенных значений моментов инерции и масс элементов механической части ЭП и исполнительного органа рабочей машины.

Приведение моментов и сил осуществляется для определения механической нагрузки двигателя, создаваемой исполнительным органом рабочей машины при выполнении им технологической операции, а также элементами механической передачи за счет действия сил трения. Нагрузка двигателя, обусловленная усилиями сопротивления (трения) элементов механической передачи, обычно учитывается с помощью их КПД.

Приведение сил и моментов нагрузки, создаваемых исполнительным органом рабочих машин, к валу двигателя вращательного движения осуществляется по формулам:

- при потоке энергии от двигателя к исполнительному органу рабочей машины:

$$M_c = \frac{M_{\text{ио}}}{\eta_{\text{мп}} i_{\text{мп}}}; \quad F_c = \frac{F_{\text{ио}} \rho_{\text{мп}}}{\eta_{\text{мп}}};$$

- при потоке энергии от исполнительного органа рабочей машины к двигателю:

$$M_c = \frac{M_{\text{ио}} \eta_{\text{мп}}}{i_{\text{мп}}}; \quad F_c = F_{\text{ио}} \rho_{\text{мп}} \eta_{\text{мп}};$$

где $M_{\text{ио}}, F_{\text{ио}}$ – момент и сила, действующие на исполнительный орган рабочей машины; M_c, F_c – приведенные к валу двигателя значения момента и

силы; $\eta_{мп}$ – кпд механической передачи между исполнительным органом рабочей машины и валом двигателя; $i_{мп}$, $\rho_{мп}$ – соответственно передаточное число и радиус приведения механической передачи между исполнительным органом и валом двигателя.

Получаемый момент на валу двигателя называется *моментом нагрузки, моментом сопротивления*, или *статическим моментом*. По тем же принципам осуществляется операция приведения в случае использования двигателя поступательного движения.

Одномассовая расчетная схема получается после выполнения операции приведения, когда все механические элементы ЭП и исполнительный орган рабочей машины принимаются абсолютно жесткими, а зазоры в кинематической схеме не учитываются. Для наиболее распространенного случая, когда элементом приведения является ротор двигателя вращательного движения, одномассовая расчетная схема представлена на рис. 1.1, где M , M_c – момент двигателя и приведенный момент нагрузки; J – общий момент инерции, определяемый суммой момента инерции двигателя и приведенных к его валу моментов инерции и масс элементов механической части ЭП и исполнительного органа рабочей машины, $J=(J_d+\Sigma J_{пр})$; ω – угловая скорость вращения вала двигателя.

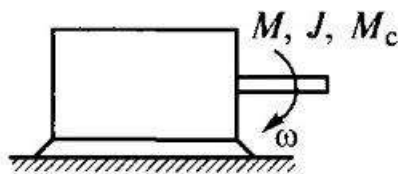


Рис. 1.1. Одномассовая расчетная схема замещения

В общем случае моменты двигателя M и нагрузки M_c могут иметь как положительные, так и отрицательные знаки. Уравнение движения для одномассовой схемы имеет вид:

$$\pm M \pm M_c = \frac{Jd\omega}{dt}.$$

Одно из направлений движения (обычно по часовой стрелке) принимается положительным. Тогда моменты, направленные по движению, имеют знак, совпадающий со знаком скорости, а моменты, направленные против движения, – противоположный знаку скорости.

Когда двигатель создает движущий момент, а исполнительный орган рабочей машины – момент сопротивления движению, уравнение движения принимает следующий вид:

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

Левая часть этого уравнения, представляющая собой разность моментов двигателя и нагрузки и определяющая вместе с моментом инерции J ускорение или замедление движения $d\omega/dt$, получила название *динамического момента*

$$M - M_c = M_{\text{дин}}.$$

Таким образом, операция приведения позволяет перейти от реальных схем механической части ЭП и исполнительного органа рабочей машины к расчетной (эквивалентной) схеме, основой которой является двигатель (элемент приведения) со своей скоростью, а остальные элементы реальных схем представлены приведенными моментом нагрузки (сопротивления) M_c и своими моментами инерции.

1.2. Уравнение механического движения

В механическом движении участвует подвижная часть электродвигателя (ротор), элементы механической передачи и исполнительный орган рабочей машины. Движение любого элемента механической части ЭП или исполнительного органа рабочей машины подчиняется известным законам механики. Поступательное и вращательное движение описывается следующими уравнениями:

$$\sum F = \frac{mdv}{dt} + \frac{vdm}{dt},$$

$$\sum M = \frac{Jd\omega}{dt} + \frac{\omega dJ}{dt},$$

где $\sum F$ и $\sum M$ – совокупность сил и моментов, действующих на элемент; m и J – масса и момент инерции элемента; ω и v – угловая и линейная скорости движения элемента; t – время.

Уравнения движения являются дифференциальными, так как содержат производные скорости, массы и момента инерции. Если масса и момент инерции элементов при движении не изменяются, то их производные в уравнениях равны нулю, тогда уравнения имеют вид:

$$\sum F = \frac{mdv}{dt} = ma,$$

$$\sum M = \frac{Jd\omega}{dt} = J\varepsilon,$$

где a и ε – ускорения при поступательном и вращательном движениях, $a = dv/dt$, $\varepsilon = d\omega/dt$.

Уравнения отражают закон механики: ускорение движения элемента (материального тела) пропорционально алгебраической сумме действующих на него сил (моментов) и обратно пропорционально его массе (моменту инерции).

Из этих уравнений следует условие движения с постоянной скоростью. Элемент будет двигаться с неизменной скоростью (или находиться в состоянии покоя), если сумма сил или моментов, к нему приложенных, будет равна нулю. Такое движение называют *установившимся*. Условия используются для определения параметров установившегося механического движения.

При $\sum F > 0$ или $\sum M > 0$ элемент будет двигаться с ускорением, а при $\sum F < 0$ или $\sum M < 0$ – с замедлением. Такие процессы носят название *неустановившихся* или *переходных*. Зависимости изменения скорости эле-

мента во времени (графики переходных процессов) $v(t)$ или $\omega(t)$ получают путем решения (интегрирования) уравнений при известных действующих суммах сил $\sum F$ или моментов $\sum M$, массе m или моменте инерции J , а также начальных значениях скорости.

1.3. Механические характеристики электропривода и рабочей машины

Для расчетной одномассовой схемы (см. рис. 1.1) установившееся механическое движение электропривода будет определяться равенством моментов двигателя и нагрузки, т. е. условием $M = M_c$. Проверка выполнения этого условия может производиться аналитически или с помощью механических характеристик двигателя и исполнительного органа.

Механической характеристикой двигателя называется зависимость его скорости от развиваемого момента $f = \omega (M)$ (двигатель вращательного движения) или усилия $f = v (F)$ (двигатель поступательного движения). Различают естественную и искусственную механические характеристики двигателей.

Естественная характеристика двигателя (может быть только одна для данного двигателя) соответствует основной (паспортной) схеме его включения и номинальным параметрам питающего напряжения. Естественные механические характеристики различных двигателей вращательного движения приведены на рис. 1.2, а. На естественной характеристике располагается точка номинального (паспортного) режима работы двигателя с координатами $\omega_{ном}$, $M_{ном}$.

Если включение двигателя происходит не по основной схеме или в его электрические цепи включены какие-либо дополнительные электротехнические элементы (резисторы, реакторы, конденсаторы), или двигатель питается напряжением с неноминальными параметрами, то его харак-

теристика называется *искусственными*. Таких характеристик у двигателя может быть сколько угодно. Поскольку эти характеристики получают в целях регулирования переменных (координат) двигателя: тока, момента, скорости, положения, то они иногда называются *регулируемыми*.

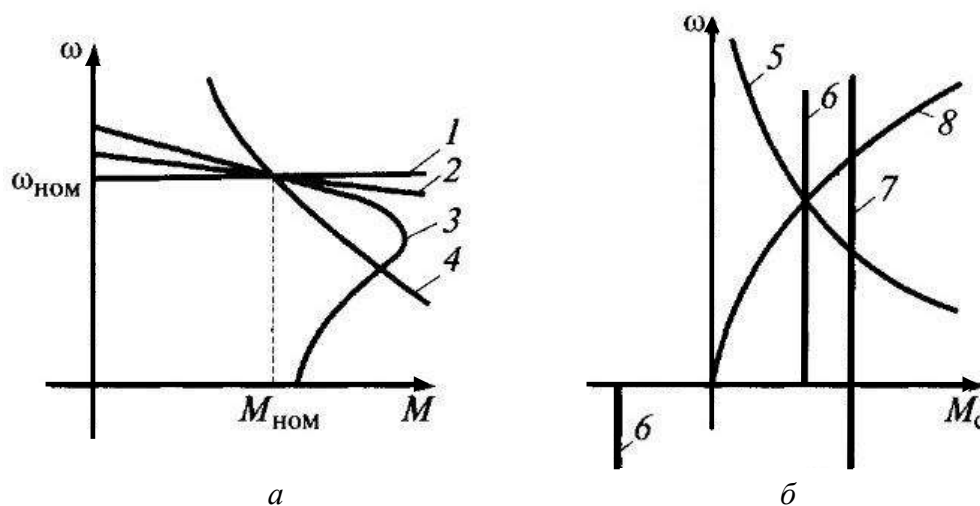


Рис. 1.2. Механические характеристики:

а – двигателей: 1 – синхронного; 2 – постоянного тока с независимым возбуждением;

3 – асинхронного; 4 – постоянного тока с последовательным возбуждением;

б – исполнительных органов рабочих машин: 5 – механизма главного движения металлообрабатывающего станка; 6 – транспортера, механизма подачи станков; 7 – подъемного механизма; 8 – центробежных насосов, вентиляторов и компрессоров

Механической характеристикой исполнительного органа рабочей машины или производственного механизма называется зависимость скорости от возникающего при его движении усилия или момента, т. е. $f = \omega_{ио}(M_{ио})$ при вращательном движении исполнительного органа и $f = v_{ио}(F_{ио})$ при его поступательном движении. В результате выполнения операции приведения к валу двигателя эти характеристики преобразуются в зависимость вида $f = \omega(M_c)$, где ω – скорость двигателя, а M_c – приведенный к его валу момент нагрузки (сопротивления). Механические характеристики исполнительных органов некоторых рабочих машин приведены на рис. 1.2, б. Следует отметить, что реальные механические характеристики исполнительных органов сложны и обычно представляют собой сочетание показанных на рис. 1.2, б зависимостей.

По характеру действия моменты нагрузки M_c подразделяются на активные и реактивные. *Активный* момент имеет постоянное, не зависящее от скорости направление своего действия (характеристика 7 на рис. 1.2, б). Такие моменты создаются потенциальными силами, к которым относятся сила притяжения Земли, силы упругой деформации и т. д.

Реактивный момент, характеристика которого соответствует зависимости б на рис. 1.2, б, создается в основном силами трения, он всегда противодействует движению и поэтому изменяет свой знак с изменением направления скорости движения.

Количественно механические характеристики двигателя и исполнительных органов оцениваются *жесткостью*:

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} \approx \frac{\Delta M}{\Delta \omega}.$$

Используя этот показатель, можно оценивать характеристику 1 синхронного двигателя (рис. 1.2) как абсолютно жесткую ($\beta=\infty$), характеристику асинхронного двигателя 3 – как имеющую переменную положительную и отрицательную жесткости, характеристику грузоподъемных механизмов 7 – как имеющую нулевую жесткость ($\beta=0$) и т. д.

Понятие механических характеристик позволяет найти параметры установившегося режима двигателя. Для этого в одном и том же квадранте совмещаются механические характеристики двигателя Д и исполнительного органа ИО, как это показано на рис. 1.3. Точки 1 и 2 пересечения этих характеристик, когда моменты двигателя и исполнительного органа равны, будут соответствовать установившемуся движению со скоростями соответственно $\omega_{уст1}$ и $\omega_{уст2}$ и моментом $M_{уст}=M_c$.

Аналитический способ для такой проверки применяется в тех случаях, когда механические характеристики двигателя и нагрузки заданы в виде уравнений. Тогда совместное решение этих двух уравнений при условии $M=M_c$ дает искомое значение $\omega_{уст}$. Подстановка этого значения скорости в

любое из двух уравнений механических характеристик позволяет получить значение установившегося момента.

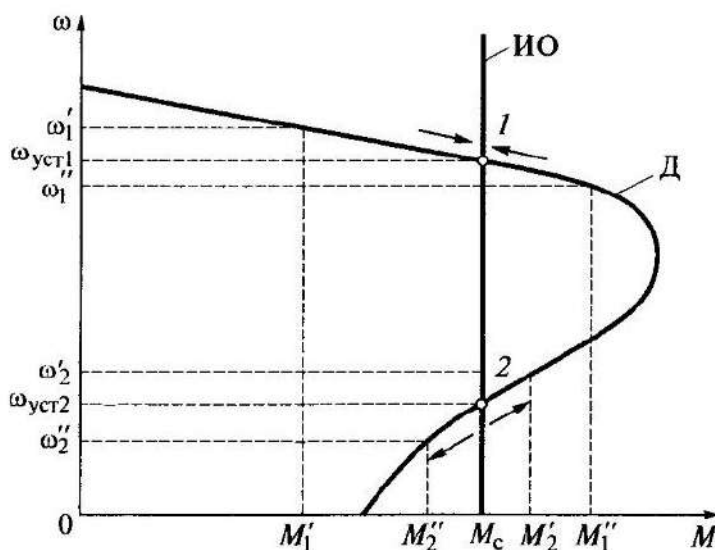


Рис. 1.3. Поиск параметров установившегося движения двигателя

Видом механических характеристик двигателя и исполнительных органов определяется *устойчивость установившегося движения*. Под устойчивостью понимается свойство системы «двигатель – исполнительный орган» поддерживать движение с установившейся скоростью при возможных небольших отклонениях от нее.

Рассмотрим способ определения устойчивости движения с помощью механических характеристик (рис. 1.3).

Предположим, что по какой-то причине скорость ЭП повысилась до уровня ω_1' . Выясним, что будет происходить со скоростью, если вызвавшая ее изменение причина исчезнет. Из характеристик двигателя и исполнительного органа видно, что при скорости ω_1' момент нагрузки M_c больше момента двигателя M_1' , т. е. $M_1' < M_c$. Тогда в системе «двигатель – исполнительный орган» будет действовать отрицательный динамический момент. Начнется процесс торможения ($d\omega/dt < 0$), который закончится при скорости $\omega_{уст1}$.

Рассмотрим теперь положение, при котором кратковременное возмущение вызвало снижение скорости до уровня $\omega_1'' < \omega_{уст1}$. В этом случае $M_1'' > M_c$ и под действием уже положительного динамического момента скорость начнет возрастать, пока не достигнет уровня $\omega_{уст1}$. Таким образом, в системе поддерживается движение со скоростью $\omega_{уст1}$, т. е. оно является устойчивым.

Подобный анализ для точки 2 показывает, что при возможных отклонениях скорости от значения $\omega_{уст2}$ возврата к этой скорости после снятия возмущения не происходит. Таким образом, движение со скоростью $\omega_{уст2}$ является неустойчивым.

Проверка на устойчивость движения может быть выполнена также аналитически с использованием понятия жесткости характеристик. Движение будет устойчиво при выполнении условия:

$$\beta - \beta_c < 0 \text{ или } \beta < \beta_c,$$

где β и β_c – жесткости механических характеристик двигателя и исполнительного органа.

1.4. Основные расчетные параметры и схемы включения асинхронных электродвигателей

Наиболее распространенными типами электроприводов являются электроприводы с короткозамкнутыми асинхронными двигателями. Для нерегулируемых электроприводов характерен пуск электродвигателя прямым включением в сеть с помощью контактной аппаратуры без промежуточных преобразователей электрической энергии.

Стандартная схема силовых цепей включения короткозамкнутого асинхронного двигателя с помощью контактов магнитного пускателя приведена на рис. 1.4.

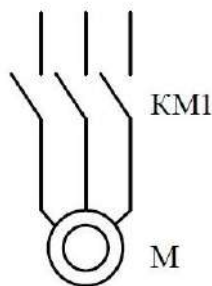


Рис. 1.4. Схема включения короткозамкнутого асинхронного двигателя

Для расчета характеристик АД пользуются его математической моделью, которая в общем случае представляется различными схемами замещения. Наиболее простой и удобной для инженерных расчетов асинхронного двигателя является Т-образная схема замещения (рис. 1.5).

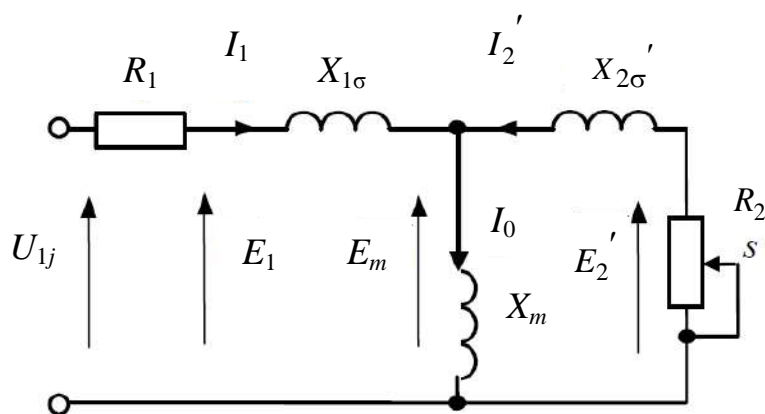


Рис. 1.5. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

В схеме приняты следующие обозначения:

U_{1j} – фазное напряжение обмотки статора;

R_1 – активное сопротивление обмотки статора;

$X_{1\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;

I_1 – ток обмотки статора;

E_1 – ЭДС обмотки статора;

R_2' – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора;

$X_{2\sigma}'$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора;

$s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ – скольжение;

$\omega_0 = 2\pi f_1 / z_p$ – синхронная угловая скорость;

ω – угловая скорость асинхронного двигателя;

z_p – число пар полюсов;

f_1 – значение частоты напряжения переменного тока, подводимого к обмотке статора;

E_m – ЭДС от главного магнитного потока машины;

E_2' – ЭДС обмотки ротора, приведенная к обмотке статора.

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие данной схеме замещения:

$$\bar{U}_{1j} - \bar{E}_m - j \cdot X_{1\sigma} \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 = 0;$$

$$\bar{E}_m + j \cdot X_{2\sigma}' \cdot \bar{I}_2' + R_2' \cdot \bar{I}_2' / s = 0;$$

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2' - \bar{I}_0 = 0.$$

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений, удовлетворяющая системе уравнений, изображена на рис. 1.6.

Ток ротора I_2' , приведенный к обмотке статора асинхронного двигателя, определяется зависимостью, получаемой непосредственно из схемы замещения АД:

$$I_2' = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + X_{\text{кн}}^2}},$$

где $X_{\text{кн}} = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Уравнение $I_2' = f(s)$ называется *электромеханической характеристикой асинхронного двигателя*.

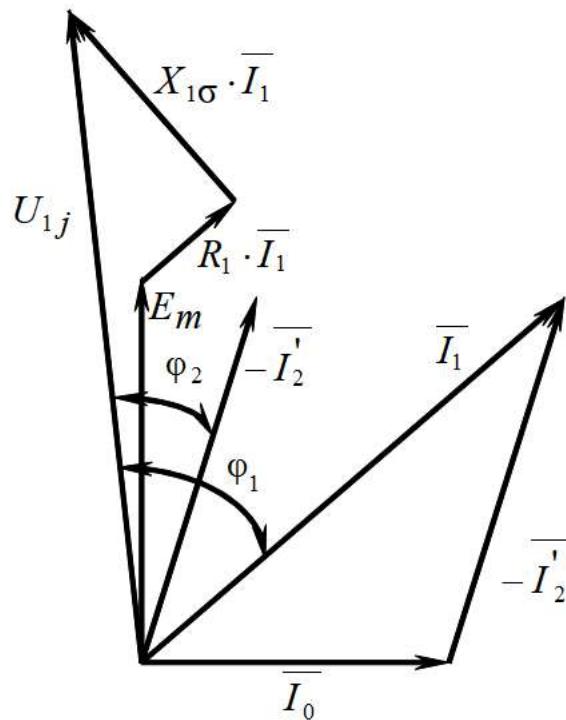


Рис. 1.6. Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений

1.5. Перечень контрольных вопросов к главе 1

1. Что такое автоматизированный электропривод?
2. Для чего выполняются операции приведения сил, моментов, масс и моментов инерции в теории электропривода?
3. Как получить одномассовую расчетную схему электропривода?
4. Какими уравнениями описывается поступательное и вращательное движение электропривода?
5. Что такое статический крутящий момент?
6. Что такое критический крутящий момент?
7. Чем характеризуется реактивный момент нагрузки?
8. Какие уравнения относятся к уравнениям механического движения?
9. Что такое механическая характеристика двигателя?
10. Что такое электромеханическая характеристика двигателя?
11. Что такое жесткость механической характеристики?

12. В чем состоит принципиальное отличие электромеханических характеристик асинхронного электродвигателя и электродвигателя постоянного тока?

13. Чем отличаются искусственные механические характеристики от естественных?

14. Что такое механическая характеристика исполнительного органа или рабочей машины?

15. Как определить устойчивость установившегося движения электропривода?

16. Для чего пользуются математическими моделями и схемами замещения электродвигателя?

17. Как выглядит схема замещения асинхронного электродвигателя?

18. Каким образом составляются векторные диаграммы токов, ЭДС и напряжений при рассмотрении схемы замещения?

19. Что такое скольжение асинхронного электродвигателя?

20. Что такое синхронная угловая скорость электродвигателя и как она определяется?

ГЛАВА 2. СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

2.1. Регулирование скорости

2.1.1. Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей путем изменения напряжения

Для регулирования скорости асинхронного двигателя путем изменения напряжения используются относительно простые технические средства. С этой целью между сетью переменного тока со стандартным напряжением $U_c = \text{const}$ (рис. 2.1) и двигателем устанавливается регулятор напряжения (РН), напряжение на выходе которого $U_s = \text{var}$ регулируется путем подачи некоторого сигнала управления U_y . В качестве РН могут быть использованы различные устройства – магнитные усилители, автотрансформаторы, тиристорные регуляторы напряжения (ТРН). ТРН получили в настоящее время наибольшее распространение из-за хороших массогабаритных показателей и высокого кпд.

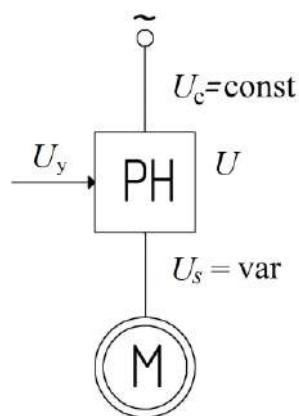


Рис. 2.1. Функциональная схема привода с АД и регулятором напряжения

ТРН разделяются на симметричные и несимметричные. При *симметричном ТРН* в каждой фазе АД (рис. 2.2, а) устанавливается пара встречно-параллельно включенных тиристоров ($VS1...VS6$) или один симмистор, управляемые от СИФУ. Здесь используется такой же принцип

управления, который применяется в вентильном приводе постоянного тока, а именно: изменение момента отпирания тиристоров относительно нулевой точки. При $\alpha = 0$ (рис. 2.2, б) тиристоры полностью открыты и к АД прикладывается напряжение сети. При $\alpha = \alpha_1 > 0$ к АД прикладывается напряжение U_s , состоящее из участков синусоиды положительной и отрицательной полярности. Упрощенная форма такого напряжения приведена на рис. 2.2, б, там же показано напряжение первой гармоники этого напряжения U_1 .

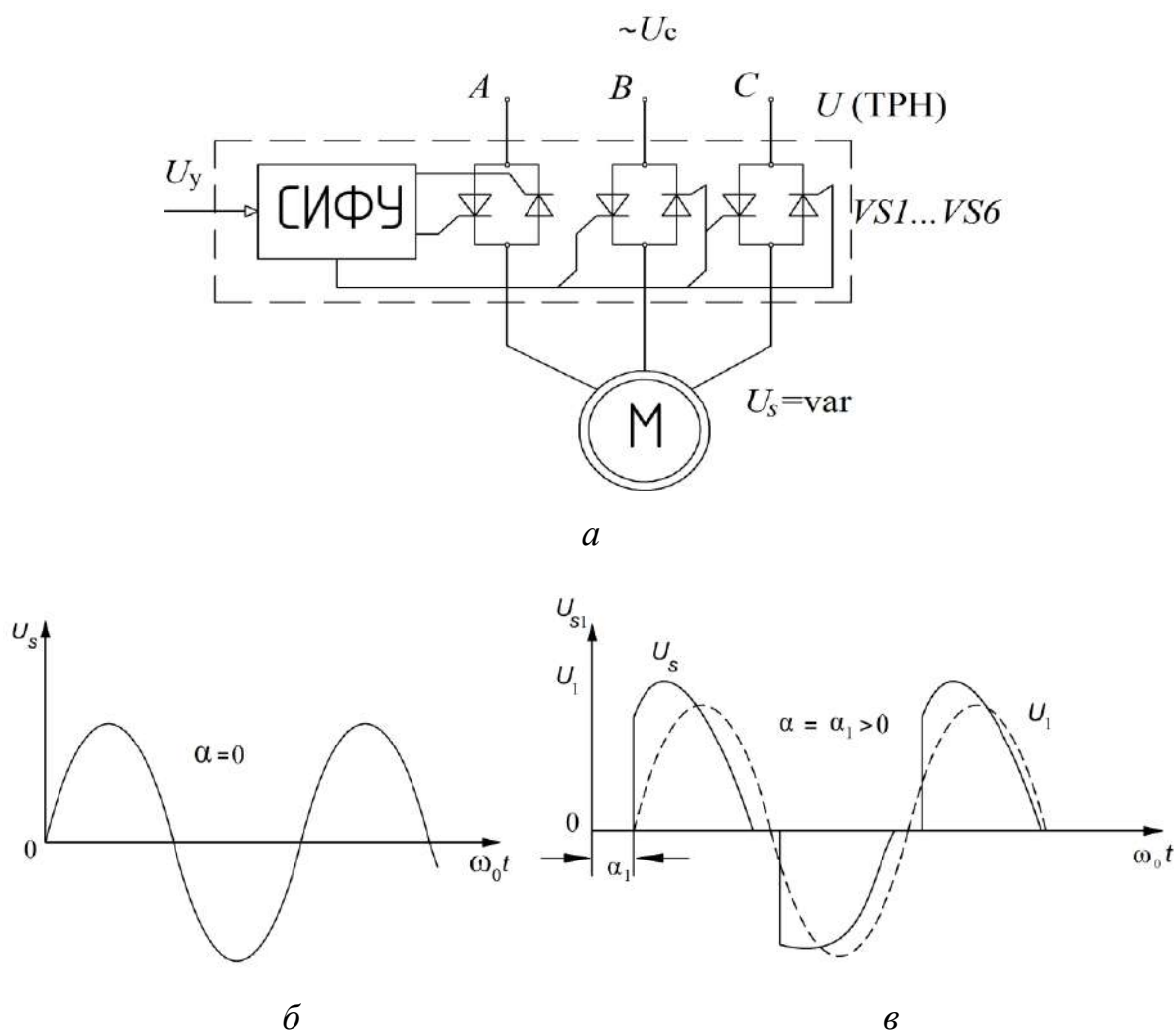


Рис. 2.2. Схема тиристорного регулятора напряжения (а) и форма напряжения на статоре АД при различных значениях угла регулирования (б, в)

Существуют другие схемы ТРН при симметричном управлении и соединении нагрузки в треугольник (рис. 2.3, а).

При *несимметричных ТРН* пара тиристоров включается в одну или две фазы (рис. 2.3, б); вместо одного тиристора может использоваться диод.

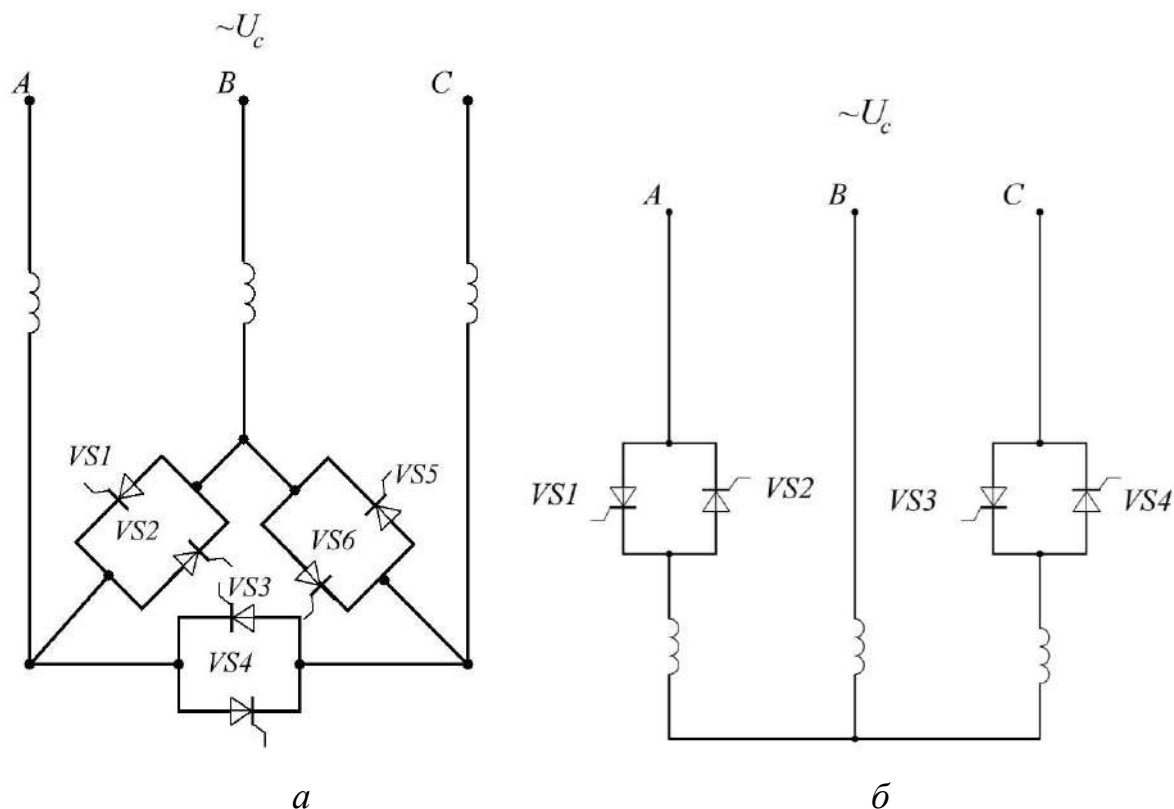


Рис. 2.3. Схемы тиристорных регуляторов напряжения:

а – при симметричном управлении и соединении обмоток в треугольник;

б – при несимметричном управлении

При несимметричном управлении требуется меньше тиристоров, но в большей мере искажается синусоида. Несинусоидальное напряжение U_s вида, показанного на рис. 2.2, в, создает дополнительные трудности (повышенные тепловые и магнитные потери, пульсации момента двигателя, что является следствием токов высших гармоник). Эти факторы, как правило, учитываются приближенно; все расчеты при пониженном напряжении проводятся лишь по первой гармонике. Снижение напряжения с помощью ТРН приводит к уменьшению критического момента M_k , который пропорционален его квадрату.

Скорость идеального холостого хода $\omega_0 = 2\pi f_c / Z_n$ остается неизменной. Критическое скольжение s_k также не зависит от напряжения. Искусственные механические характеристики, приведенные на рис. 2.4, показывают, что при постоянстве момента нагрузки $M_{c1} = \text{const}$ и нормальных значениях $s_k = 0,1 \dots 0,2$, характерных для электродвигателей общепромышленного применения, диапазон регулирования невелик (отношение скоростей в точках 1 и 2).

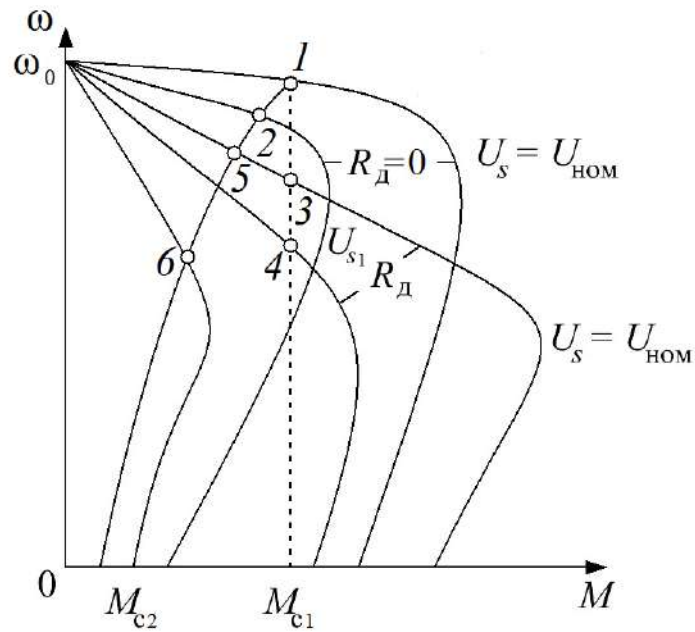


Рис. 2.4. Механические характеристики АД при регулировании напряжением

Следует также учитывать энергетическое ограничение, согласно которому растут потери в роторе двигателя. Номинальные потери:

$$\Delta P_{2_{ном}} = P_{\Sigma} - P_{2_{ном}} = M_{ном} (\omega_0 - \omega_{ном}) = M_{ном} \omega_0 s_{ном}.$$

Приравняв их к текущим потерям $\Delta P_2 = M_{ном} \omega_0 s_{ном}$, можно получить границу допустимой по нагреву области искусственных характеристик в продолжительном режиме:

$$M_{с.доп} = M_{ном} s_{ном} / s.$$

Из рис. 2.4 следует, что область, ограниченная штриховой линией M_{c1} , невелика, это сужает применение рассматриваемого способа регулирования на практике при $M_{c1} = \text{const}$. Существуют механизмы, которые имеют зависимость $M_{c2}(s)$, схожую с границей области, допустимой по нагреву. К ним относятся вентиляторы, для которых целесообразно применение электропривода с ТРН. Уменьшение потерь в роторе двигателя (но не в приводе в целом) может быть получено применением ТРН, питающего АД с фазным ротором при включенных в цепь ротора сопротивлениях R_d . Это увеличивает значение s_x , и диапазон регулирования увеличивается (точки 3 и 4), особенно для механизмов с вентиляторной нагрузкой (точки 5 и 6), что показано на рис. 2.4. Характеристики при пониженном напряжении U_{s1} (рис. 2.4) имеют низкую жесткость. По этой причине возможные колебания момента нагрузки M_{c1} , часто имеющие место на практике, приводят к резким изменениям скорости, что в большинстве случаев недопустимо.

Рассмотрим это на примере механических характеристик (рис. 2.5), полученных при различных значениях угла регулирования α . При нагрузке M_{c1} рабочая точка отмечена цифрой 1 (угол регулирования α_2).

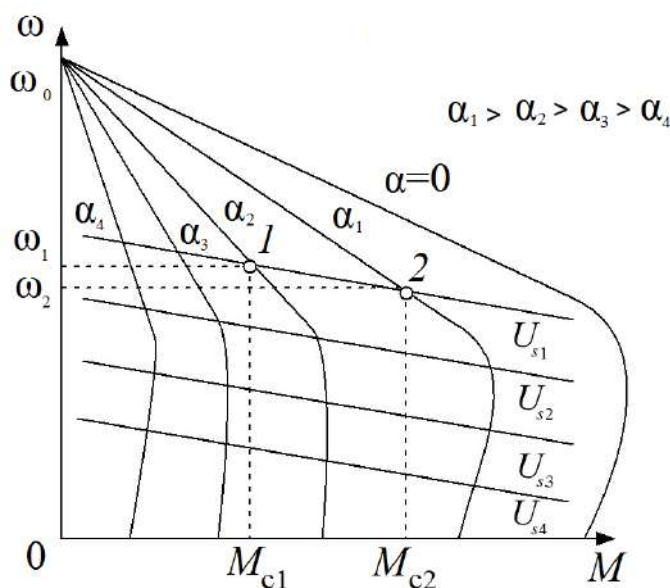


Рис. 2.5. Механические характеристики АД с регулятором напряжения в замкнутой системе

Предположим, что момент нагрузки увеличился до M_{c2} . При неизменном значении $\alpha = \alpha_2 = \text{const}$ функционирование электропривода невозможно и двигатель остановится, поскольку $M_{c2} > M_k$ при данном угле регулирования. В то же время уменьшение угла до значения α_1 позволит сохранить электропривод в работоспособном состоянии; при этом скорость вращения соответствует ω_2 благодаря увеличению момента двигателя.

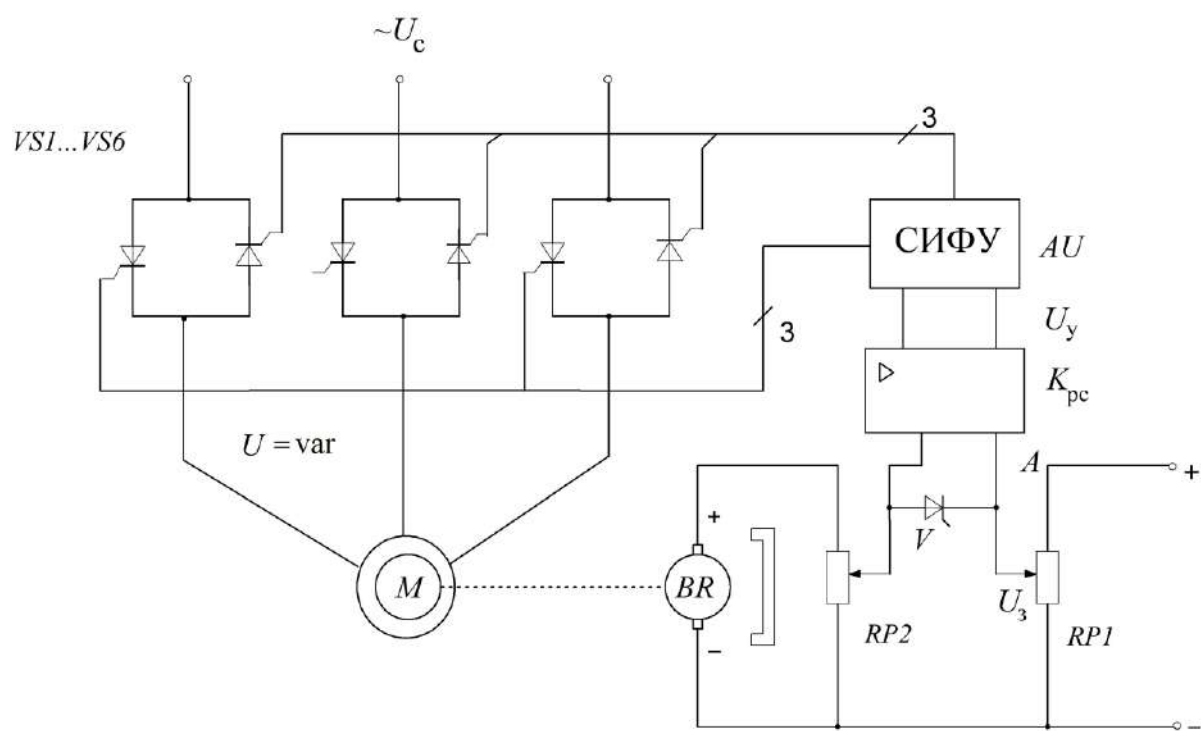
Отсюда вытекает необходимость регулирования угла α при изменении момента M_c нагрузки. Такое регулирование трудно осуществить оператору, наблюдающему за работой установки. Гораздо эффективнее с этой задачей справится замкнутая по скорости система автоматизированного электропривода, принципиальная схема которой представлена на рис. 2.6, а. Управляющие электроды тиристоров $VS1 \dots VS6$ ТРН подсоединены к выходам СИФУ, задачей которой является сдвиг управляющих импульсов в зависимости от величины управляющих сигналов U_y и их распределение по тиристорам.

Сигнал управления определяется из условия:

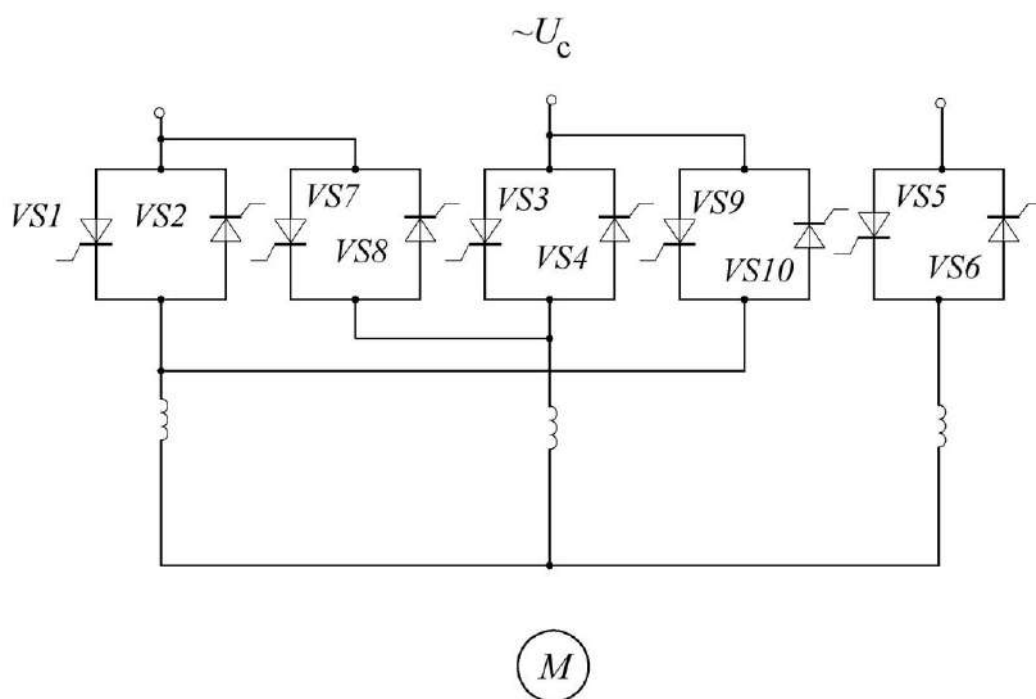
$$U_y = (U_3 - K_{oc}\omega)K_{pc}, \quad (2.1)$$

где U_3 – напряжение задания; K_{oc} – коэффициент пропорциональности в цепи обратной связи по скорости; K_{pc} – коэффициент усиления промежуточного усилителя (регулятора скорости).

Задающее напряжение U_3 снимается с потенциометра $RP1$. Согласно выражению (2.1), всякое изменение скорости АД, например, при изменении нагрузки, вызывает изменение U_y (при $U_3 = \text{const}$), угол α также изменяется, и АД переходит на работу на другой характеристике. Совокупность точек на линии 1–2 образует искусственную механическую характеристику (рис. 2.5). При различных значениях напряжения задания $U_{31} \dots U_{34}$ имеют относительно высокую жесткость и перегрузочную способность и позволяют получать достаточно большой диапазон регулирования скорости.



a



б

Рис. 2.6. Функциональная схема замкнутой системы электропривода с АД и ТРН (*a*) и включение тиристоров для реверсивного управления (*б*)

Кроме регулирования скорости АД включение еще двух пар тиристоров, как показано на рис. 2.6, б, позволяет осуществлять реверс двигателя. Эта схема аналогична контакторному управлению, когда один контакт заменяется парой встречно-параллельно соединенных тиристоров.

Используя тиристоры ТРН, можно обеспечить динамическое торможение АД подачей постоянного (импульсного) тока. Приведем несколько вариантов схем включения (рис. 2.6, б): отпираются тиристоры VS_2 , VS_3 и VS_5 в схеме нереверсивного управления; тиристоры VS_1 , VS_4 , VS_8 и VS_9 образуют двухполупериодную схему выпрямления, и обмотки двух фаз соединяются последовательно. Силу выпрямленного тока (среднее значение) можно регулировать с помощью угла α .

Представленные схемы ТРН показывают возможность пуска АД с плавным регулированием напряжения, реверса, торможения, скорости в диапазоне до десяти достаточно простыми средствами. К достоинствам данного метода управления следует отнести также его простоту, надежность и удобство управления. Вместе с тем такая система электропривода имеет и серьезный недостаток, заключающийся в больших потерях энергии при снижении скорости, что уменьшает КПД электропривода в целом. Этот недостаток не является существенным, если работа на пониженной скорости непродолжительна (например при останове электропривода). Второй серьезный недостаток – искажение напряжения и появление токов высших гармоник в питающей сети, что может негативно отразиться на других потребителях.

2.1.2. Импульсное регулирование скорости асинхронного двигателя

Импульсное регулирование скорости АД стало возможным благодаря совершенствованию характеристик силовых полупроводниковых приборов, главным образом, тиристоров. Его суть заключается в дискретном

(импульсном) изменении параметров АД или питающей сети, при котором возникают периодические колебания момента АД. В установившемся режиме среднее значение момента двигателя равно статическому моменту.

При импульсном регулировании в цепи статора может быть использована схема с ТРН, приведенная на рис. 2.2. Однако режим работы тиристоров здесь предполагается иным: они должны открываться и запираются все одновременно. Это возможно лишь в том случае, если время включенного (выключенного) состояния превышает период напряжения питающей сети. Такой способ отличается крайне низкими энергетическими показателями и тяжелыми условиями работы тиристоров и поэтому не нашел применения в промышленности.

Чаще всего импульсное регулирование применяется в электроприводах с АД с фазным ротором при регулировании в цепи ротора. С этой целью может быть использована схема (рис. 2.7), которая позволяет либо включить добавочное сопротивление $R_{доб}$ в цепь ротора, либо замкнуть ротор накоротко.

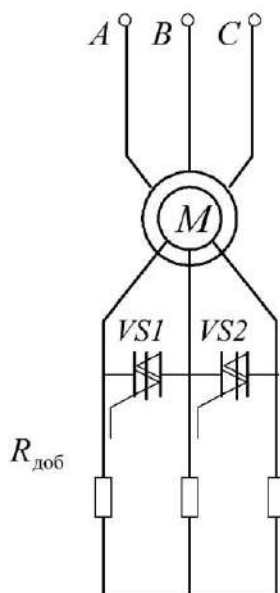


Рис.2.7. Схема импульсного регулятора скорости АД на симмисторах
в цепи ротора

В приведенной схеме для этой цели используются симмисторы VS1, VS2. При достаточно большой частоте коммутации симмисторов $f_{\text{ком}}$ можно считать, что в цепь ротора включено некоторое добавочное эквивалентное сопротивление $R_{\text{эkv}}$, значение которого изменяется от нуля до $R_{\text{доб}}$, при изменении скважности включения симмисторов $\tau = t_{\text{вкл}}/T_0$ от 1 до 0. Здесь $t_{\text{вкл}}$ — длительность замкнутого состояния симмисторов; $T_0 = 1/f_{\text{ком}}$ — период коммутации. В этом случае: $R_{\text{эkv}} = R_{\text{доб}}(1 - \tau)$.

Частота коммутации $f_{\text{ком}}$ в данной схеме не может превышать частоту тока в роторе. Такое управление приводит к большим пульсациям момента. Кроме того, включаться симмисторы могут только в момент перехода напряжения через ноль, т. е. с довольно низкой частотой. По этим причинам большее применение нашла схема, приведенная на рис. 2.8, а, где резистор $R_{\text{доб}}$ и дроссель L_d включаются в цепь выпрямленного тока ротора, полученного с помощью выпрямителя на диодах VD1...VD6. Шунтирование резистора осуществляется тиристорным коммутатором ТК, состоящим из основного тиристора VS1, коммутирующего тиристора VS2, коммутирующего конденсатора $C_{\text{ком}}$ и дросселя $L_{\text{ком}}$ и диода VD7.

Для повышения жесткости механических характеристик и увеличения диапазона регулирования применяется замкнутая система, в которой управление тиристорами VS1 и VS2 осуществляется в функции выпрямленного тока ротора i_d и скорости двигателя. Указанные сигналы поступают в суммирующее устройство СУ: для управления тиристорами служит релейный элемент РЭ. Датчиком тока является шунт RS. При запертых тиристорах VS1 и VS2 и включении двигателя в цепь ротора включено сопротивление $R_{\text{доб}}$ и выпрямленный ток i_d нарастает по экспоненте (из-за влияния индуктивности сглаживающего дросселя L_d) до значения i_{d1} (рис. 2.8, б). Для нормального функционирования коммутатора предварительно должна быть подготовлена коммутирующая цепь. С этой целью при включении АД отпирается тиристор VS2 и конденсатор $C_{\text{ком}}$ заряжается от вы-

Процесс заряда не оказывает влияния на работу АД из-за его кратковременности. При отпирании $VS1$ управляющим импульсом U_1 от РЭ ток i_d в роторной цепи ограничивается лишь сопротивлением обмотки ротора, сопротивлением дросселя $R_{др}$ и шунта $R_{ш}$, что может привести к его нарастанию по экспоненте до некоторого значения i_{d0} .

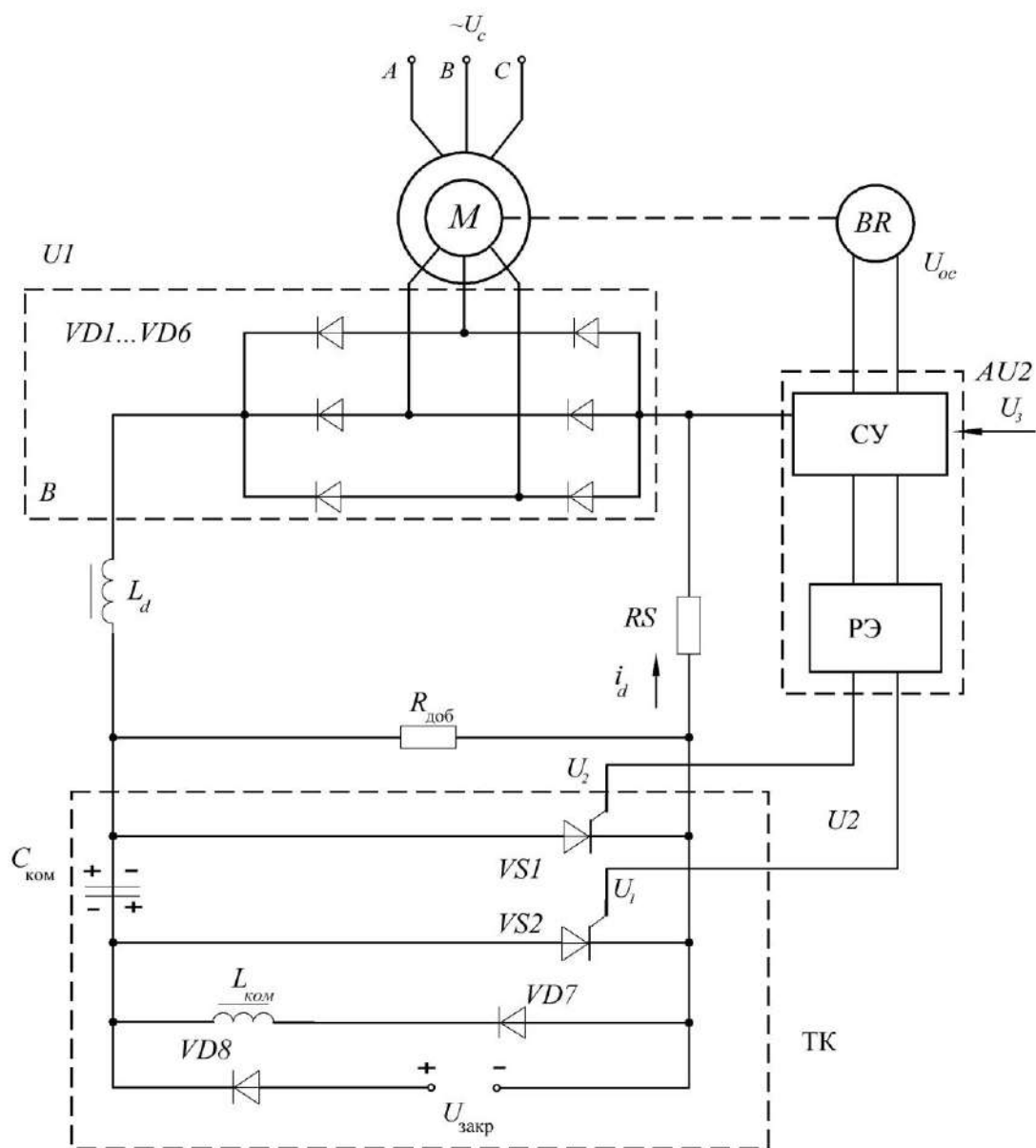


Рис. 2.8. Импульсное регулирование в цепи ротора АД:
а – электрическая схема; *б* – временные диаграммы работы регулятора;
в – механические характеристики в замкнутой системе
 (окончание на стр. 33)

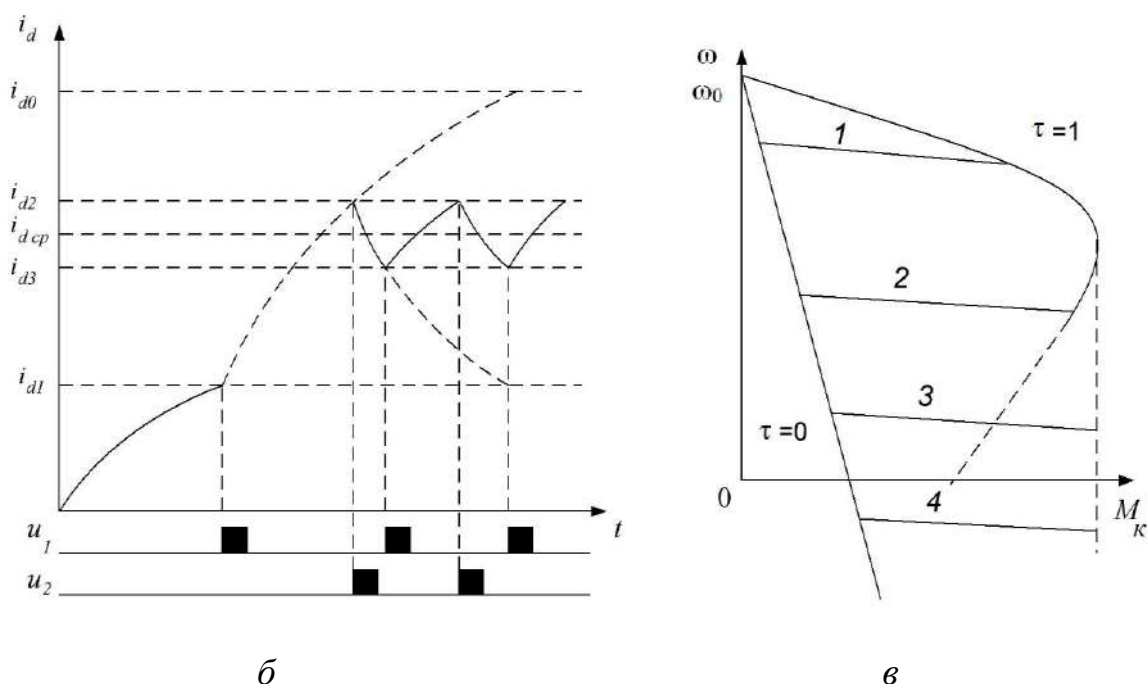


Рис. 2.8. Окончание

Одновременно с отпиранием $VS1$ происходит разряд коммутирующего конденсатора $C_{\text{ком}}^+ - VS1 - VD7 - L_{\text{ком}} - C_{\text{ком}}^-$. Параметры этой цепи подбираются таким образом, что разряд имеет колебательный характер, в результате чего конденсатор $C_{\text{ком}}$ приобретает «+» на нижней обкладке (показано справа на рис. 2.8, а). На этом колебательный процесс заканчивается благодаря запирающим свойствам диода $VD7$ при запертом тиристоре $VS2$.

При достижении током ротора значения i_{d2} (рис. 2.8, б), что контролируется шунтом RS , релейный элемент вырабатывает импульс на $VS2$, который открывается, и положительный заряд конденсатора $C_{\text{ком}}$ прикладывается к катоду тиристора $VS1$, который запирается. Начинается процесс перезаряда конденсатора $C_{\text{ком}}$ по той же цепи $B^+ - L_d - C_{\text{ком}} - VS2 - RS - B^-$, в результате чего на верхней обкладке $C_{\text{ком}}$ вновь появляется «+», а тиристор $VS2$ запирается. В этом процессе в течение некоторого времени поло-

жительный потенциал прикладывается к катоду $VS1$, обеспечивая тем самым восстановление его запирающих свойств (20...80 мкс в зависимости от типа тиристора). Запирание тиристора $VS1$ означает, что в цепь ротора вновь вводится сопротивление $R_{доб}$ и ток уменьшается по экспоненте до значения i_{d3} , при котором РЭ снова подает импульс u_1 на $VS1$. Управляющие импульсы u_1 и u_2 , подаваемые на тиристоры $VS1$ и $VS2$ соответственно, показаны на рис. 2.8, б. Далее работа схемы повторяется. Эквивалентное сопротивление роторной цепи зависит от скважности τ . Регулируя скважность τ изменением момента подачи импульса на $VS2$, можно регулировать среднее значение тока $i_{d\text{ ср}}$ ротора, а следовательно, и его момента. Механические характеристики такого электропривода (рис. 2.8, в) располагаются в зоне, ограниченной значениями $\tau = 1$ и $\tau = 0$.

Значение эквивалентного добавочного сопротивления $R_{доб. экв}$ находится следующим образом:

$$R_{доб. экв} = R_{доб}(1 - \tau) + R_{др} + R_{ш},$$

где $R_{др}$, $R_{ш}$ – активное сопротивление соответственно сглаживающего дросселя L_d и шунта RS .

Для получения жестких характеристик 1, 2, 3 (рис. 2.8, в) применяется обратная связь по скорости. В этом случае сигнал $U_{ос}$ суммируется с сигналом по току, вызывая изменение границы срабатывания РЭ. Например, увеличение скорости вызывает срабатывание РЭ при меньшем токе в якорной цепи.

При продолжительном включении $VS1$ конденсатор $C_{ком}$ может не сохранить достаточный для коммутации заряд. Решением является использование дополнительного источника $U_{зар}$ и диода $VD8$ для поддержания напряжения на $C_{ком}$ на нужном уровне.

Основная область применения рассмотренного электропривода – механизмы подъема, передвижения и поворота крановых установок.

2.1.3. Частотное регулирование скорости асинхронного двигателя

Частотный способ регулирования скорости АД является наиболее экономичным, современным и перспективным. Его суть заключается в регулировании синхронной скорости за счет изменения частоты питания статора АД.

Экономичность частотного регулирования скорости объясняется тем, что при регулировании частоты не происходит увеличения скольжения, как например, при реостатном регулировании.

Полное использование электрической машины, в том числе АД, имеет место, если она работает с номинальным магнитным потоком. В свою очередь номинальный поток определяется геометрическими размерами и физическими свойствами магнитной цепи.

Магнитный поток Φ двигателя создается током намагничивающего контура I_0 , который пропорционален ЭДС E_s :

$$E_s = 4,44\Phi \cdot f_s W_s K_{об} , \quad (2.2)$$

где f_s – частота напряжения статора; W_s – число витков обмотки; $K_{об}$ – обмоточный коэффициент.

Обозначив в формуле (2.2) $K_e = 4,44W_s K_{об}$, запишем:

$$E_s = \Phi f_s K_e ,$$

откуда следует соотношение:

$$\Phi \sim E_s / f_s = \text{const} , \quad (2.3)$$

которое говорит о том, что для полного использования двигателя наряду с изменением частоты питания f_s необходимо пропорционально ей изменять E_s . ЭДС является внутренним параметром АД, воздействовать же на двигатель можно лишь напряжением.

При управлении ставится задача сохранения перегрузочной способности двигателя M^* , которая определяется отношением критического мо-

мента M_k к моменту нагрузки M_c . Отсюда следует, что для любой частоты должно соблюдаться пропорциональное ей изменение напряжения.

Для пояснения законов частотного регулирования необходимо учитывать, что момент нагрузки M_c также может изменяться в зависимости от скорости вращения.

При условии $M_k/M_c = M^* = \text{const}$ для любых значений ω_{01} и ω_{02} должно соблюдаться соотношение:

$$\frac{U_{s1}^2}{\omega_{01}^2 M_{c1}} = \frac{U_{s2}^2}{\omega_{02}^2 M_{c2}} = \frac{U_{s\text{ном}}^2}{\omega_{0\text{ном}}^2 M_{\text{ном}}},$$

где M_{c1} , M_{c2} – моменты нагрузки при синхронных скоростях АД ω_{01} и ω_{02} соответственно. Отсюда следует предложенный академиком М. П. Костенко в 1925 г. основной закон изменения напряжения при частотном способе регулирования скорости АД:

$$\gamma = \alpha \sqrt{\mu}, \quad (2.4)$$

где $\gamma = U_s / U_{s\text{ном}}$ – относительное напряжение; $\alpha = \omega_0 / \omega_{0\text{ном}} = f_s / f_{s\text{ном}}$ – относительная частота; $\mu = M_c / M_{\text{ном}}$ – относительный момент, показывающий изменение статического момента при регулировании скорости.

Выражение (2.4) является универсальным, и с его помощью могут быть получены частные случаи.

При постоянстве момента нагрузки $M_c = \text{const}$ по формуле (2.3) получим:

$$\gamma = \alpha,$$

т. е. напряжение на статоре двигателя должно меняться пропорционально его частоте.

Для вентиляторного момента нагрузки соотношение (2.4) имеет вид $\gamma = \alpha^2$. Если момент нагрузки изменяется обратно пропорционально скорости, то имеет место зависимость $\gamma = \sqrt{\alpha}$.

Механические характеристики АД при регулировании по закону (2.3) и, следовательно, при $M_k = \text{const}$, которые могут быть получены при

регулировании вниз от номинальной частоты $\alpha < 1$, показаны на рис. 2.9. При частотах, близких к номинальной, они практически совпадают с характеристиками при пропорциональном управлении $\gamma = \alpha$.

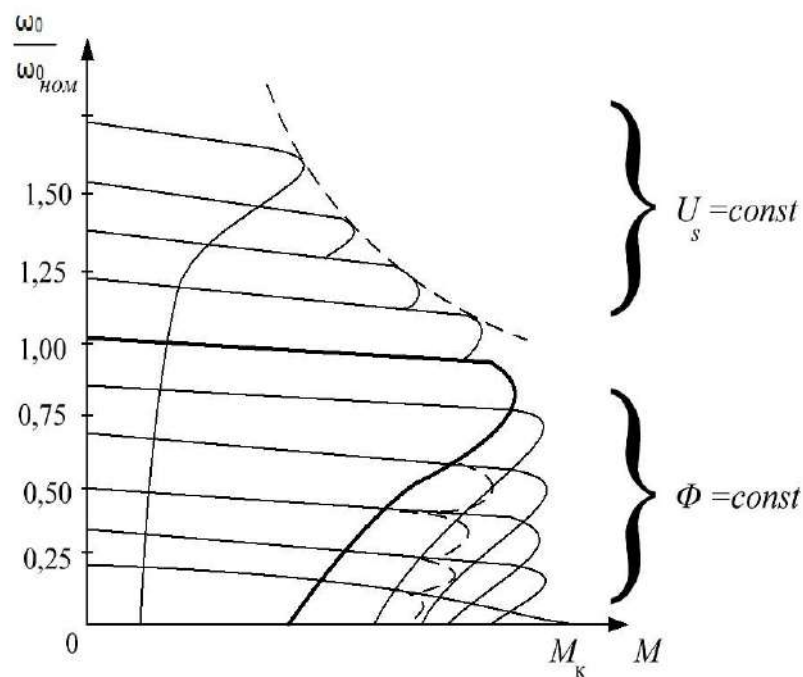


Рис.2.9. Механические характеристики АД при частотном управлении

Укрупненная схема электропривода с частотным регулированием скорости представлена на рис. 2.10. Главным элементом этой схемы является преобразователь частоты ПЧ, осуществляющий, как было показано, регулирование частоты и напряжения по одному из законов. Задачей ПЧ является преобразование напряжения сети, подаваемого на АД. По информационному каналу на ПЧ подается сигнал управления U_y . Согласно сложившейся терминологии, такие электроприводы называют *частотными*. Они различаются типами ПЧ, способами формирования напряжения и видами обратных связей. Для получения совершенных характеристик частотного электропривода применяют замкнутые системы.

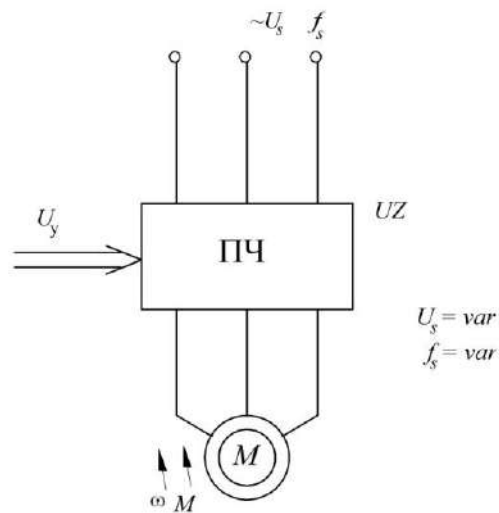


Рис. 2.10. Укрупненная функциональная схема электропривода с частотным регулированием

2.2. Регулирование момента и тока

Блок-схема системы автоматического регулирования электроприводом переменного тока с разрывным управлением представлена на рис. 2.11. Подобные системы получили название «системы с прямым управлением моментом» (Direct Self-Control), сокращенно – DTC.

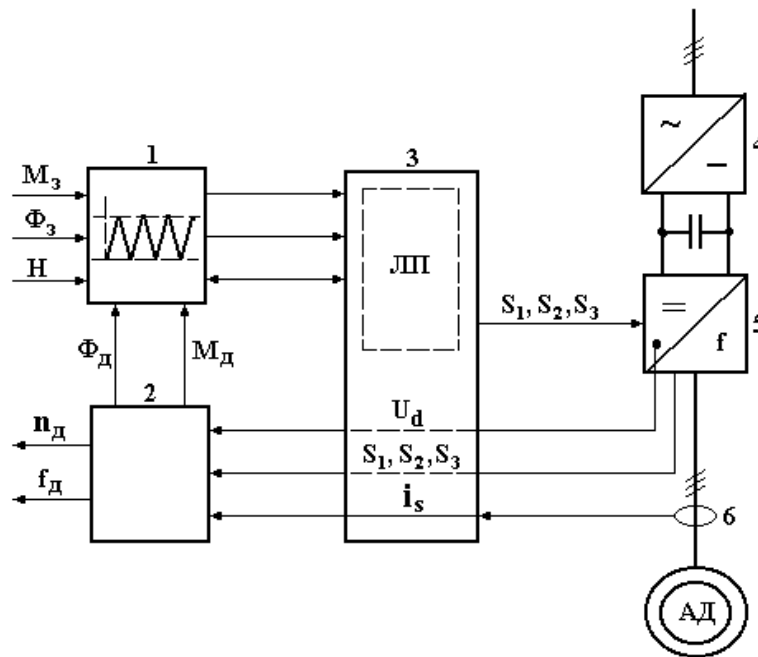


Рис. 2.11. Блок-схема «прямого управления моментом»

В подобных системах электропривод отрабатывает стопроцентный скачок задания момента за (1 – 2) мс, обеспечивает точное регулирование момента при низких частотах, включая и нулевую скорость; точность поддержания скорости равна 10 % скольжения АД без использования датчика скорости и равна 0,01 % с использованием датчика скорости.

На схеме обозначено:

1 – устройство прямого гистерезисного управления моментом и потоком;

2 – модель двигателя (расчет параметров и реальных величин переменных АД);

3 – аппаратные средства реализации оптимальной логики переключений;

4 – силовой выпрямитель;

5 – автономный инвертор напряжения;

6 – датчики тока статора двигателя;

M_3, Φ_3 – задание момента и потока;

n_d, f_d, M_d, Φ_d – действительные величины, соответственно, скорости, частоты, момента и потока;

U_d – входное напряжение автономного инвертора;

S_1, S_2, S_3 – состояние ключей инвертора;

i_s – токи статора АД;

H – ограничение порогов гистерезиса.

Основные элементы блок-схемы:

1. Блок быстродействующих микропроцессоров (DSP). В блоке осуществляется регулирование в скользящем режиме вектора Ψ_s потокосцепления статора и момента M двигателя по значениям вводимых в него заданных и действительных величин.

2. Модель АД, в которой через каждые 25 мкс осуществляется вычисление потока статора и момента по введенной информации: токам двух фаз статора АД, напряжению цепи постоянного тока и положению «ключей» АИН. В этом блоке производится вычисление скорости АД и частоты выходного тока АИН. Модель АД формирует сигналы обратных связей по регулируемым параметрам.

3. Быстродействующий логический автомат, переключающий «ключи» автономного инвертора в функции «оптимизации» вектора выходного напряжения АИН по предельным отклонениям момента и потока статора, определяемым соответствующими настройками петли гистерезиса.

Таким образом, организация ШИМ-управления осуществляется в функции заданных переменных электромагнитного состояния АД. В такой структуре объединяется задача ШИМ-управления и САУ моментом.

Все устройства, показанные на рис.2.11, реализуются микропроцессорными средствами. С учетом динамических характеристик звена регулирования момента ДТС регулятор скорости в общем случае должен синтезироваться как ПИД-регулятор, чем достигается высокое быстродействие по контуру скорости и статическая точность регулирования.

Быстродействие асинхронного электропривода можно повысить, используя гистерезисные регуляторы момента и модуля потокосцепления, в которых на каждом шаге вычислений сравниваются заданные значения с вычисленными и полученные логические сигналы выдаются на блок выбора оптимального вектора напряжения. Наиболее сложной задачей, затрудняющей разработку систем ДТС, является получение текущих значений потокосцепления, момента и частоты вращения ротора при отсутствии датчиков на валу двигателя.

Функциональная схема системы ДТС показана на рис. 2.12.

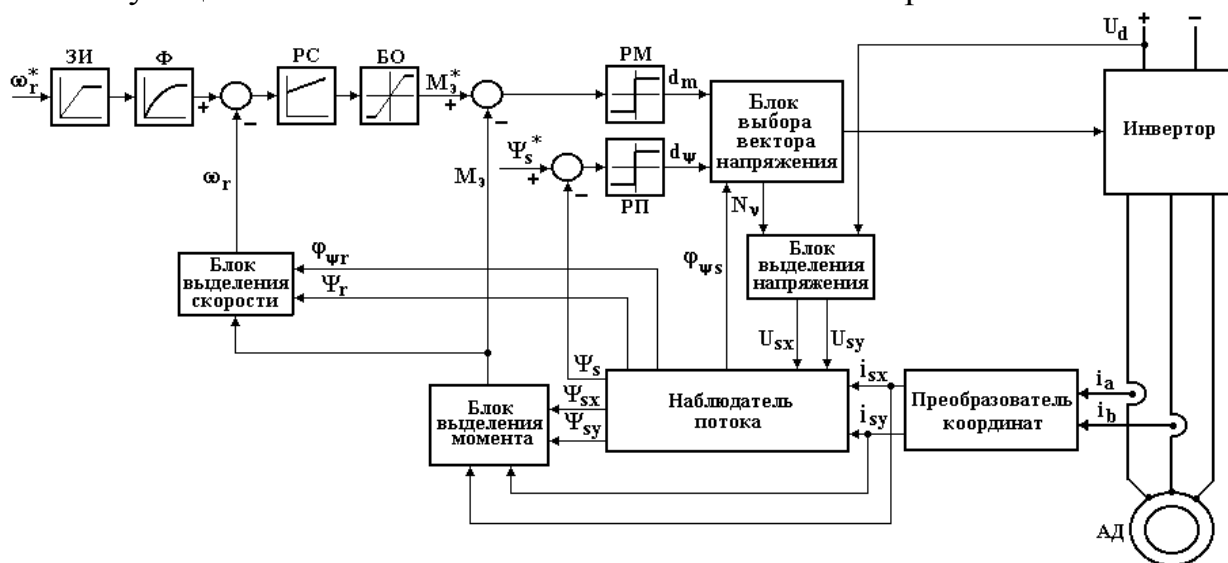


Рис. 2.12. Функциональная схема системы ДТС

Задание частоты вращения ротора подается на вход задатчика интенсивности, который обеспечивает постоянство ускорения при разгоне. Как и в классической системе векторного управления, при синтезе контура регулирования скорости на выходе регулятора оказывается целесообразной установка апериодического фильтра первого порядка. Вместо ПИД-регулятора в контуре скорости без существенной погрешности может быть использован ПИ-регулятор. В регуляторе скорости сравниваются заданное значение частоты вращения ротора с расчетным текущим значением, и формируется задание на электромагнитный момент. На выходе регулятора скорости устанавливается звено ограничения величины электромагнитного момента.

В релейных регуляторах момента и потокосцепления сравниваются заданные значения регулируемых величин с их значениями, оцененными с помощью наблюдателя, и формируются логические сигналы для блока выбора вектора напряжения, который и управляет ключевыми элементами инвертора. Управление ключами ведется с учетом текущего угла потока статора $\varphi_{\psi s}$. Для достижения желаемого значения частоты коммутации ключей характеристики релейных регуляторов потокосцепления и момента должны содержать гистерезисный допуск, регулируемый в зависимости от текущей частоты вращения магнитного поля.

Самая простая структурная схема динамической модели управления асинхронным электроприводом с системой DTC приведена на рис. 2.13. В этой модели использован ПИ-регулятор скорости и релейные регуляторы потокосцепления ротора и электромагнитного момента двигателя без гистерезисного допуска.

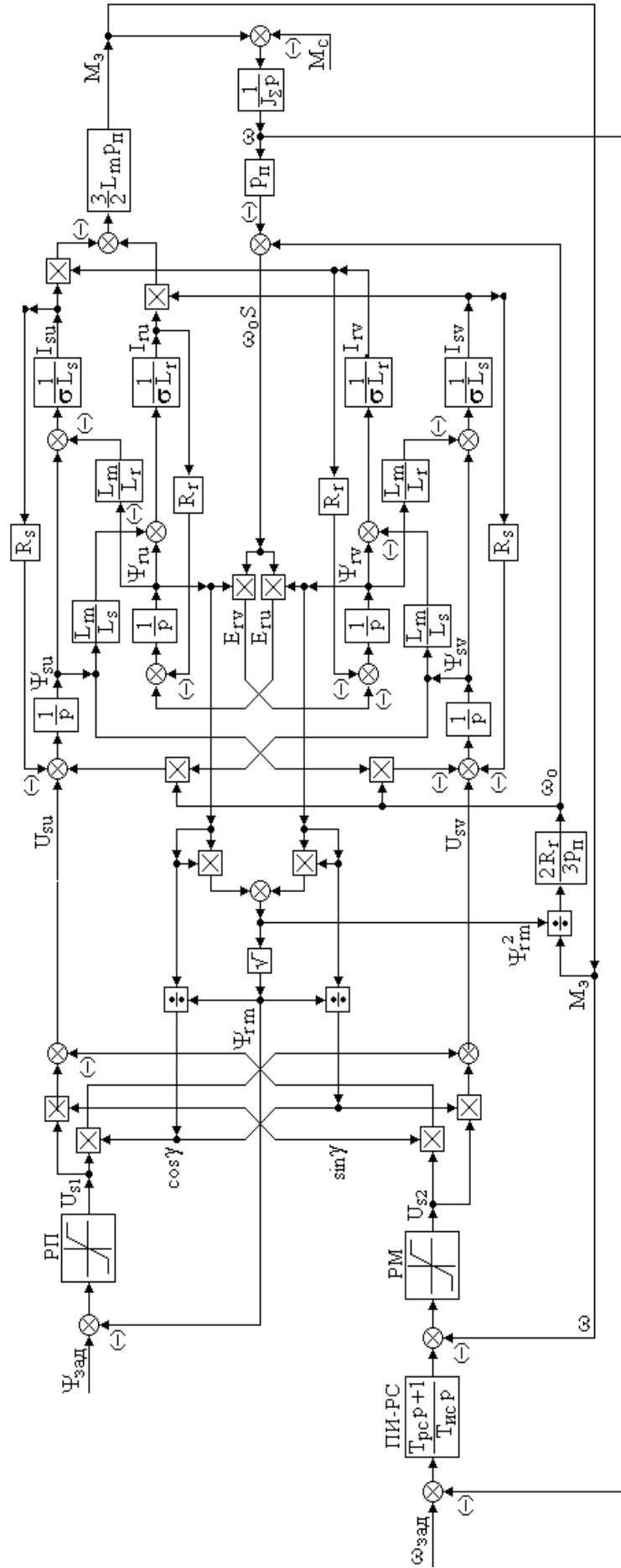


Рис. 2.13. Структурная схема динамической модели системы DTC в осях ($u - v$)

На рис. 2.14 показаны расчетные зависимости электромагнитного момента, скорости, напряжения статора и потокоцепления ротора при пуске двигателя до номинальной частоты вращения.

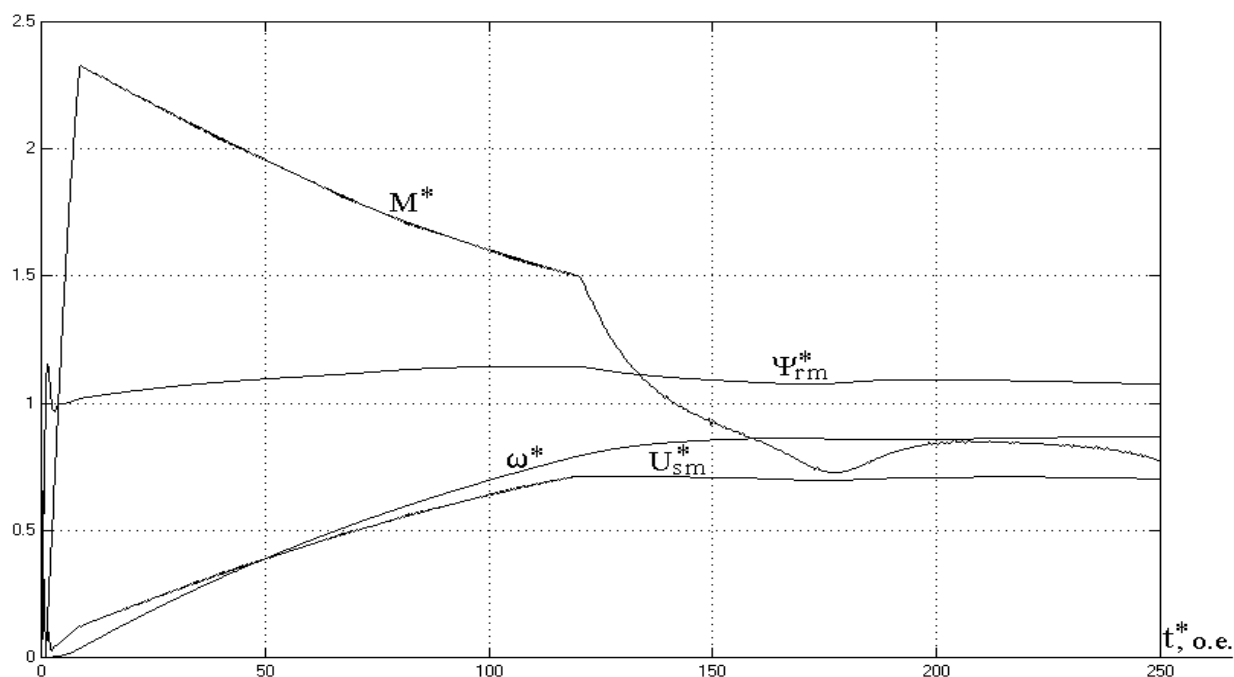


Рис. 2.14. Расчетные переходные процессы в асинхронном электроприводе с системой DTC при пуске двигателя

Моделирование подтверждает высокую эффективность системы DTC при работе во всем диапазоне частот вращения магнитного поля, включая нулевую. Однако при моделировании в систему не вводились ошибки измерения токов статора и ротора двигателя, как это имеет место в реальных системах DTC. Для подтверждения работоспособности и высокого качества регулирования системы DTC во всех возможных режимах работы электропривода на рис. 2.15 приведены расчетные переходные процессы при реверсе электропривода с полной скорости в направлении «вперед» на полную скорость в направлении «назад».

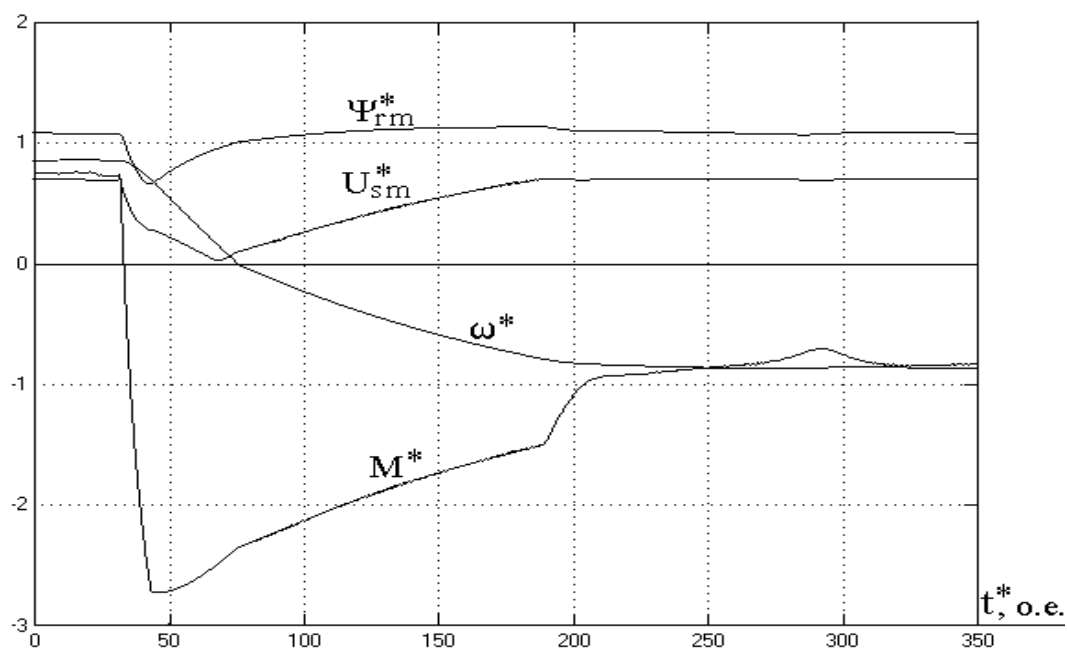


Рис. 2.15. Расчетные переходные процессы в асинхронном электроприводе с системой DTC при реверсе двигателя

Полученные расчетные переходные процессы близки к экспериментальным осциллограммам. В указанных источниках период дискретности контуров регулирования потокосцепления и электромагнитного момента двигателя был выбран равным 25 мкс, а контура регулирования скорости – 1 мс.

Основным недостатком систем DTC является то, что удовлетворительное качество переходных процессов обеспечивается только в том случае, если погрешность оценки R_s не превышает 5 %.

Для определения коэффициентов ПИ-регулятора скорости в системе DTC используется настройка на скорейшее затухание переходных процессов. Желаемое быстродействие системы задается постоянной времени фильтра вычислителя скорости. Таким образом, быстродействие ограничивается уровнем помех измерения тока.

Таким образом, системы DTC позволяют обеспечить:

- время отработки ступенчатого задания на номинальный момент от 0,6 на нулевой скорости до 7 мс на номинальной скорости;

– минимальное время отработки ступенчатого задания скорости 0,05 с при условии синтеза ПИ-регулятора скорости для системы прямого управления моментом DTC, выполненного в соответствии с приведенной выше методикой.

2.3. Перспективные способы управления электроприводом

Большинство новых алгоритмов управления асинхронным электроприводом переменного тока представляет собой дальнейшее развитие и совершенствование классического алгоритма и реализуются на основе общей теории автоматического управления. Однако поставленная задача может быть решена и нетрадиционными методами. Одним из таких решений является алгоритм управления электроприводом переменного тока с применением методов нечеткой логики.

Нечеткая логика (FUZZY-логика), возникла как наиболее удобный способ построения систем управления сложными технологическими процессами. Ведущее место в мире по количеству разработок в области нечеткого управления принадлежит Японии, хотя в настоящее время в Европе и США предпринимаются активные попытки сократить отставание.

Наиболее важным приложением теории нечетких множеств являются контроллеры нечеткой логики. Их функционирование немного отличается от работы обычных контроллеров. Здесь для описания системы вместо дифференциальных уравнений используются знания экспертов. Эти знания могут быть выражены естественным образом с помощью лингвистических переменных, которые описываются нечеткими множествами. Решением контроллера нечеткой логики является нечеткое множество.

Системы с нечетким управлением рекомендуются:

– для управления очень сложными процессами, когда не существует строгого математического описания и простой математической модели;

- для нелинейных систем очень высокого порядка;
- в тех случаях, когда должна производиться обработка лингвистически сформулированных экспертных знаний.

Применение нечеткого управления не рекомендуется для решения в следующих случаях:

- если приемлемый результат может быть получен с использованием классической теории автоматического управления;
- если существует формализованная и адекватная математическая модель рассматриваемой системы;
- если поставленная задача вообще неразрешима.

Анализ математической модели асинхронного электропривода показывает, что, несмотря на то, что система имеет математическое описание и может быть разрешена методами классической теории автоматического управления, есть основания обратиться к нечеткому управлению при рассмотрении подобных систем.

При создании системы векторного управления асинхронным электроприводом встает ряд проблем, разрешение которых классическими методами затруднительно. К ним следует отнести:

- большой объем вычислений, который необходимо выполнять в реальном масштабе времени;
- присутствие в системе постоянной ошибки из-за неточности измерения наблюдаемых параметров и, как следствие, ошибки вычислений наблюдаемых параметров;
- накопление ошибки в процессе работы, что влечет за собой необходимость выполнения корректирующих операций, а следовательно, дальнейший рост объема вычислений.

Если к этому добавить неоднозначность требований к механической части многих систем электропривода, то обращение к нечеткому управле-

нию в данном случае становится не только оправданным, но и вполне актуальным.

Нечеткая экспертная система использует для вывода решения вместо Булевой логики совокупность нечетких функций принадлежности и правил. Большинство инструментальных средств, работающих с нечеткими экспертными системами, позволяет применять в правиле несколько заключений. Совокупность правил в нечеткой экспертной системе известна как база знаний. В общем случае вывод решения происходит за четыре этапа:

1. С помощью функций принадлежности, определенных на входных переменных, вычисляются их фактические значения, и определяется степень уверенности для каждой предпосылки правила.

2. С использованием процедуры вывода вычисляется значение истинности для предпосылки каждого правила.

3. Используя композицию, все нечеткие подмножества, назначенные для каждой выходной переменной, объединяют вместе и формируется единственное нечеткое подмножество значений для каждой выводимой переменной. При использовании композиции MAX объединенное выходное нечеткое подмножество значений создается путем нахождения максимума из всех нечетких подмножеств.

4. Процесс точной интерпретации, который используется для преобразования нечеткого набора значений выводимых переменных к точным значениям.

Структурно FUZZY-регулятор состоит из трех элементов, выполняющих последовательно следующие операции:

- фаззифицирование;
- фаззи-логическое преобразование;
- дефаззифицирование.

Под фаззифицирование понимается превращение наблюдаемых (то есть, измеренных) четких значений переменных в категории нечеткой ло-

гики. Нечеткое множество и его функция принадлежности μ представляются в виде лингвистического множества или так называемого терм-множества. Функция принадлежности μ в FUZZY-логике строго определяет нечеткое множество. Она отражает информацию о степени принадлежности, то есть степени приближения к некоторому значению. Значениями лингвистической переменной являются термы (то есть слова обычного языка). Причем эти слова (термы) определяют качество или величину всех элементов терм-множества. Таким образом, функция принадлежности μ отображает лингвистическую переменную, то есть терм-множество.

Функция принадлежности μ может быть линеаризована и, что особенно важно, линеаризация при операциях с нечеткими множествами практически не приводит к потере информации.

Для лингвистического описания регулируемых величин применяются линейные треугольные функции принадлежности, которые симметричны относительно нулевой точки. В простейшем случае можно ограничиться четырьмя лингвистическими термами. Это позволяет построить FUZZY-регулятор с минимальным количеством вычислительных операций. В структуре регулятора при этом присутствуют следующие термы:

- «ошибка большая отрицательная»;
- «ошибка малая отрицательная»;
- «ошибка малая положительная»;
- «ошибка большая положительная».

При этом принятое количество лингвистических термов достаточно для того, чтобы поддерживать систему в устойчивом состоянии (то есть при ошибке регулирования, равной нулю). В системе нечеткого векторного управления асинхронным двигателем параллельно с электроприводом должна работать его математическая модель. Сначала по наблюдаемым координатам (фазным напряжениям U_A , U_B , U_C и фазным токам i_A , i_B , i_C) вычисляются эквивалентные составляющие вектора напряжения $U_{s\alpha}$ и $U_{s\beta}$ и

вектора тока $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ в неподвижной относительно статора двигателя системе координат $(\alpha - \beta)$. Затем вычисляются составляющие вектора потокосцепления статора $\Psi_{s\alpha}$ и $\Psi_{s\beta}$ по уравнению:

$$\Psi_s = \int (U_s - i_s R_s) dt,$$

а затем составляющие вектора потокосцепления ротора $\Psi_{r\alpha}$ и $\Psi_{r\beta}$ по уравнению:

$$\Psi_r = \frac{L_r}{L_m} (\Psi_s - \sigma L_s i_s).$$

Вычисление модуля вектора потокосцепления ротора двигателя осуществляется с помощью выражения:

$$\Psi_{rm} = \sqrt{\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2},$$

а вычисление величины электромагнитного момента двигателя – по выражению:

$$M = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m p_n}{\sigma L_s L_r} (\Psi_{r\alpha} \Psi_{s\beta} - \Psi_{r\beta} \Psi_{s\alpha}).$$

Далее вычисляются сигналы рассогласования заданных и текущих значений координат системы $\Delta\Psi_{rm}$ и ΔM , для которых находятся функции принадлежности μ .

Графики лингвистических переменных для ошибки по потокосцеплению ротора $\Delta\Psi_r$ и по электромагнитному моменту ΔM , асинхронного двигателя с векторным управлением приведены на рис. 2.16.

Задача FUZZY-логического регулирования решается путем FUZZY-логических преобразований. Полученные при фаззифицировании исходные данные в виде нечетких множеств, функций принадлежности и степеней принадлежности элементов множеств на основе логических операций ЕСЛИ <предусловие>, ТОГДА <результат>, поступают в вычислитель. FUZZY-логические вычисления выполняются с применением операций И, ИЛИ, НЕ, в результате чего получается решение задачи в категориях нечеткой логики.

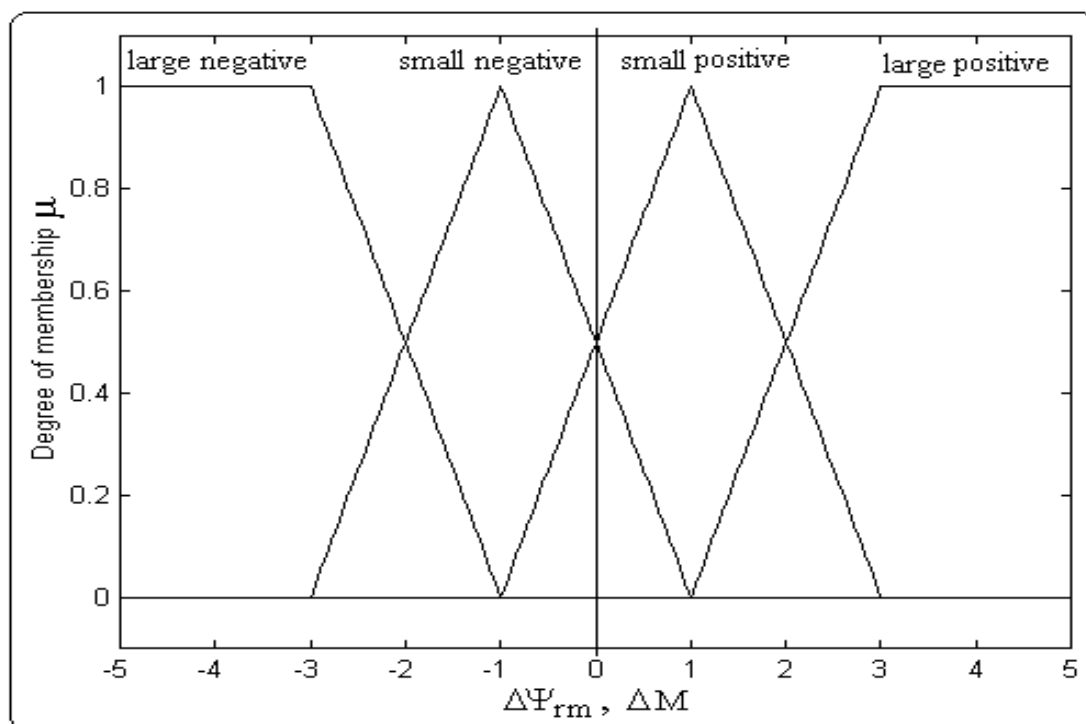


Рис. 2.16. Графики степени принадлежности μ для значений ошибки $\Delta\Psi_{rm}$ и ΔM

Замкнутый контур регулирования в FUZZY-системе содержит следующие основные блоки. С датчиков сигналов контролируемых величин сигналы поступают в устройства сравнения, в которых происходит вычитание четких величин, измеренных и вычисленных по математической модели. Сигналы, пропорциональные ошибке ε и ее первой производной по времени $\frac{d\varepsilon}{dt}$, поступают непосредственно на вход FUZZY-системы регулирования. После фаззифицирования оба сигнала уже в виде лингвистических переменных поступают на вход FUZZY-преобразователя. После этого в соответствии с задачей управления определяются соответствующие логические правила, причем в практике построения алгоритмов нечеткой логики используется обычное человеческое понимание обстоятельств и результатов. В данной задаче синтаксис несет в себе расчет независимого фазового угла обобщенного вектора напряжения статора двигателя. Основой для FUZZY-логических преобразований является матрица, которая форми-

руется заранее на основании экспертных оценок при помощи операций ЕСЛИ..., ТОГДА.

Применительно к рассматриваемой задаче матрица регулирования выглядит следующим образом (рис. 2.17):

$\Delta\Psi \backslash \Delta M$	-Б	-М	+М	+Б
-Б	НН	ПП	ВН	
-М	НП		ВП	
+М				
+Б	НВ		ВВ	

Рис. 2.17. Матрица регулирования при шестисекторном представлении напряжения статора асинхронного двигателя

На рис. 2.17 использованы следующие обозначения: $\pm Б$ – большая ошибка; $\pm М$ – малая ошибка; НН – назад снизить; НП – назад постоянно; НВ – назад повысить; ВН – вперед снизить; ВП – вперед постоянно; ВВ – вперед повысить; ПП постоянно постоянно.

В качестве FUZZY-логического оператора здесь выступает некоторый результирующий оператор, полученный на основании различных эмпирических предпосылок и принятый оптимальным. Такой оператор позволяет получить наилучшие результаты при относительной компенсации.

Для получения четких значений вычисленных величин выполняется обратная операция – дефазифицирование. На вход блока дефазифицирования подаются вычисленные функции принадлежности, а на выходе получаются численные значения переменных, то есть управляющих воздействий. Существует около 30 методов дефазифицирования. Применительно к системе FUZZY-регулирования асинхронного электропривода наиболее

подходящим является метод центра тяжести плоской фигуры, который и реализуется в контроллере Мамдани. Он основан на том, что в качестве выходной величины используется центр тяжести плоской фигуры результирующего множества.

В результате решения задачи дефаззифицирования находятся три наибольших значения функции принадлежности для соответствующих векторов фазного напряжения статора двигателя. Для отыскания этих трех значений в процессе вычислений находятся два значения функций принадлежности, принадлежащих к разным множествам. По этим значениям находится совместная усредненная координата центра тяжести.

Графическое отыскание точки центра тяжести результирующего нечеткого множества показано на рис. 2.18.

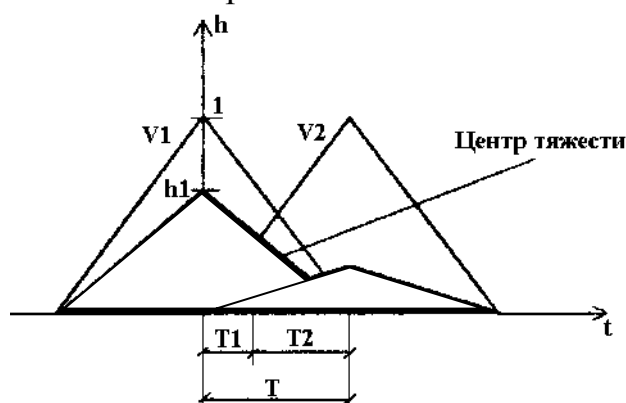


Рис. 2.18. Графическое отыскание центра тяжести результирующего нечеткого множества

Графически фактор ошибки может быть представлен в виде поверхности в трехмерном пространстве, как это показано на рис. 2.19.

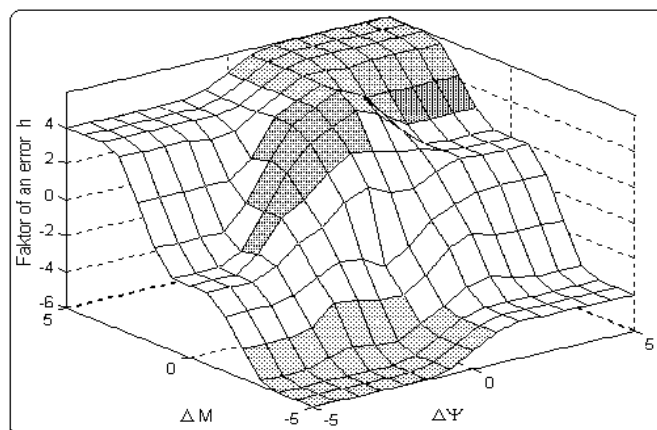


Рис. 2.19. Трехмерный график фактора ошибки h

После выполнения операции дефаззифицирования получается четкое значение пространственного вектора выходной координаты. Полученное четкое значение преобразуется в трехфазную систему (a^*, b^*, c^*) путем разбиения плоскости, образованной осями неподвижной системы координат на 6 секторов. В зависимости от принадлежности выходной координаты к тому или иному сектору определяется мгновенный вектор ошибки регулирования и выбираются векторы трехфазной системы напряжений на выходе преобразователя частоты для компенсации этой ошибки.

Далее сигналы в трехфазной системе координат (U_a^*, U_b^*, U_c^*) поступают в микропроцессор, реализующий закон широтно-импульсной модуляции выходного напряжения, выходные сигналы которого (U_A^*, U_B^*, U_C^*) подаются на управляющие цепи IGBT-модулей.

Функциональная схема формирования нерезкого распознавания фазовых секторов приведена на рис. 2.20.

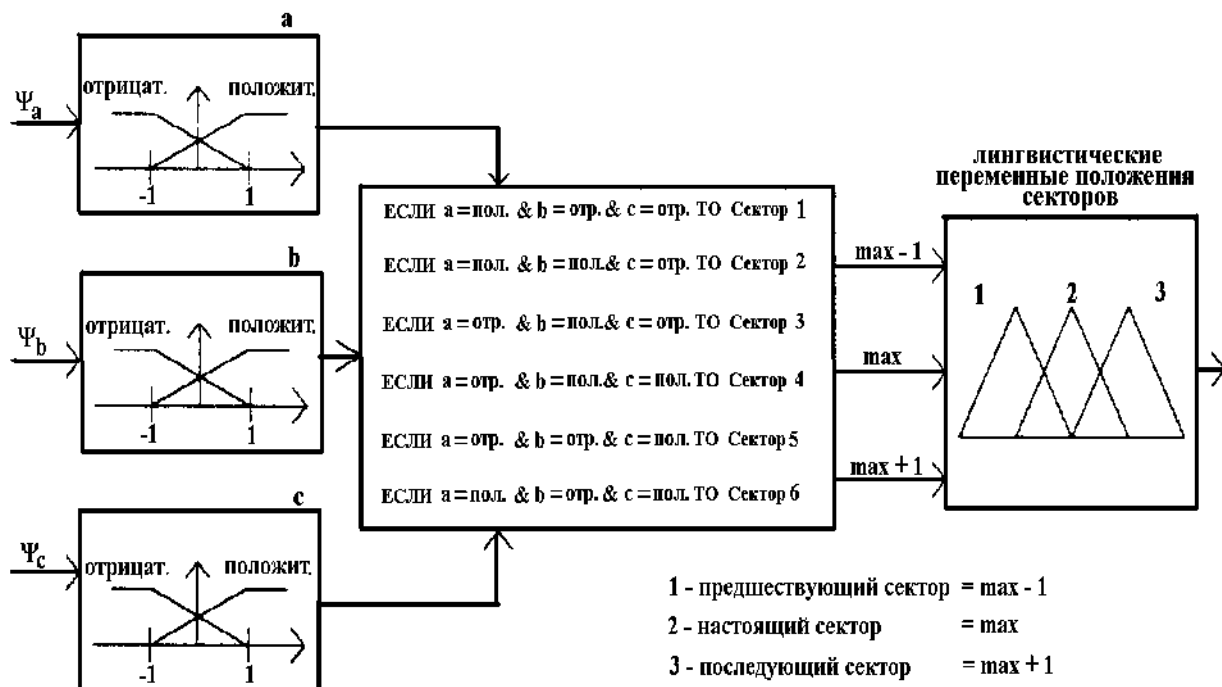


Рис. 2.20. Функциональная схема нерезкого распознавания фазовых секторов

В качестве третьей входной величины для FUZZY-регулятора здесь используются значения функции принадлежности для предшествующего и последующего секторов. Это обеспечивает соответствующий характер регулирования, при котором в области границы сектора всегда находится компромиссное решение. Например, выражение «вперед повысить» в конце каждого сектора соответственно изменяется на «вперед понизить» благодаря оказанному влиянию на значение функции принадлежности. Следовательно, для компромиссных вычислений на границе сектора, в принципе, можно использовать значения векторов напряжений статора, полученные для последующего сектора.

Задача компенсации ошибки, возникающей на границе секторов, при шестисекторном годографе напряжения усугубляется наличием «мертвой зоны» FUZZY-регулятора, ведущей к запаздыванию регулирования. Это особенно сильно проявляется при высоких частотах вращения асинхронного двигателя.

Для компенсации запаздывания ширину лингвистической переменной настраивают так, чтобы при переходе от одного сектора к другому переход к вектору «вперед снизить» происходил, по возможности, точно. Этот принцип позволяет существенно уменьшить ошибку регулирования на границе секторов.

На рис. 2.21 приведена функциональная схема системы электропривода с нечетким векторным управлением.

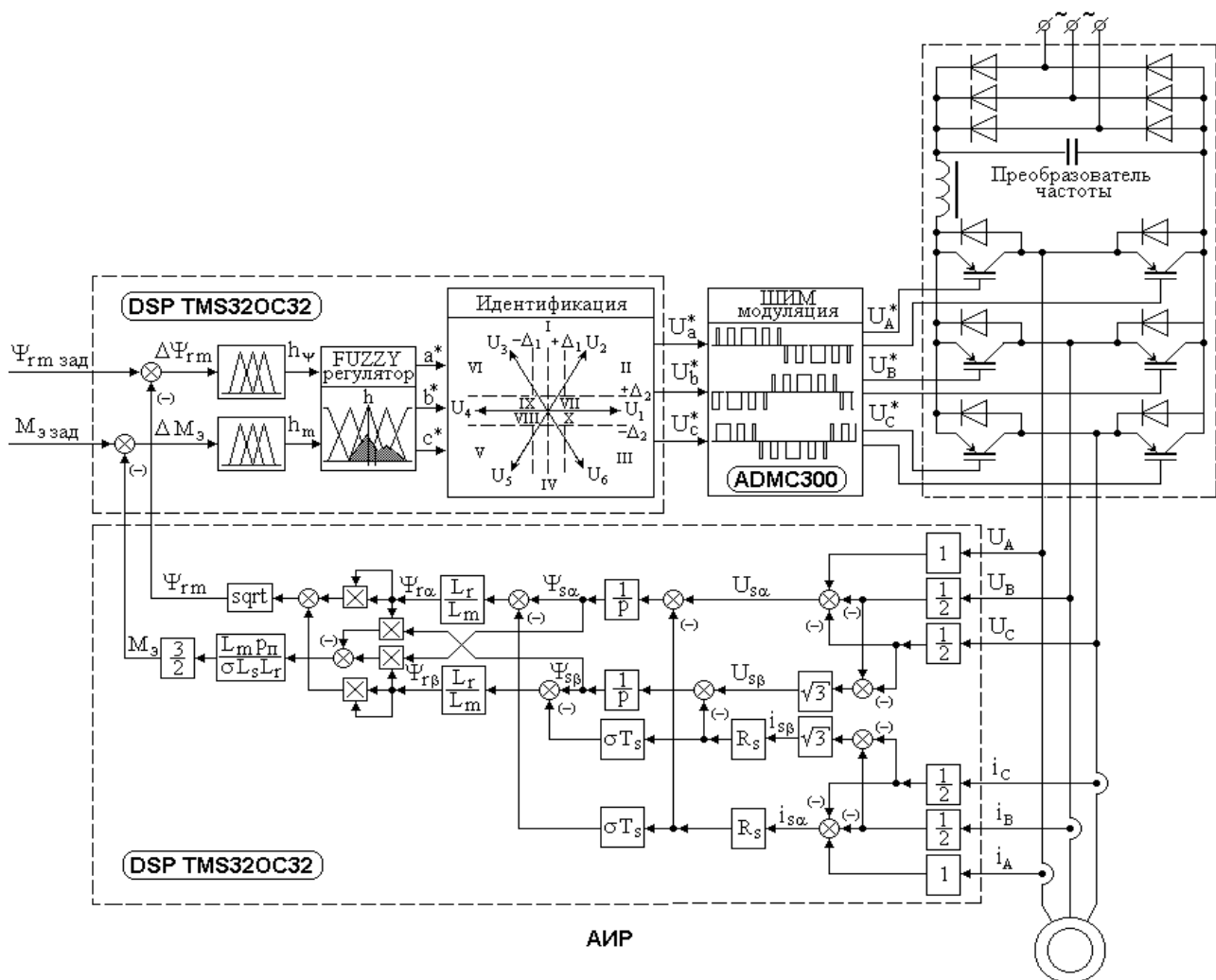


Рис. 2.21. Функциональная схема электропривода с FUZZY-регулированием

В системе нечеткого управления отсутствует накапливающаяся ошибка измерения наблюдаемых и вычисления ненаблюдаемых координат объекта, поскольку четкие значения переменных состояния соотносятся с определенной степенью принадлежности с некоторыми качественными понятиями, после чего реализуется индивидуальный алгоритм вычисления выходного нечеткого множества. На рис. 2.22 приведены результаты расчета переходных процессов в относительных единицах в асинхронном электроприводе с нечетким векторным управлением.

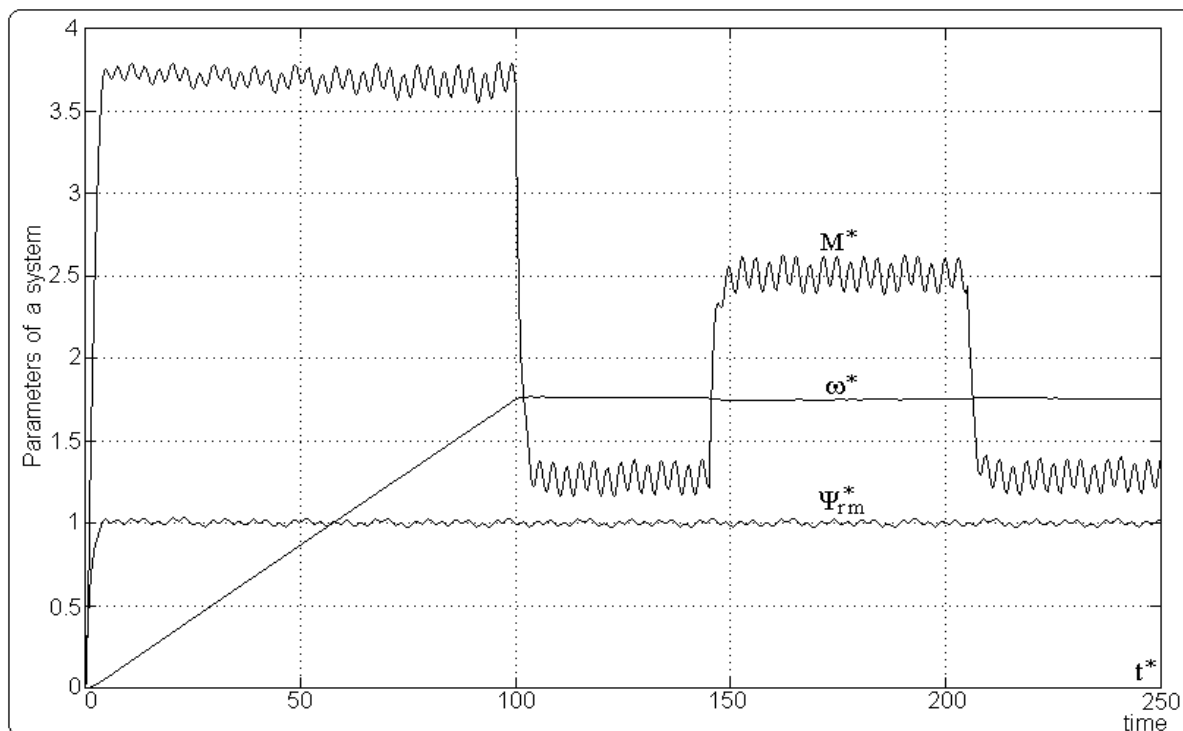


Рис. 2.22. Расчетные переходные процессы в электроприводе

На графиках показаны кривые изменения во времени частоты вращения двигателя ω^* , электромагнитного момента M^* и потокосцепления ротора Ψ_{rm}^* при пуске двигателя и при набросе – сбросе нагрузки. Качество управления, как по управляющему, так и по возмущающему воздействию, – удовлетворительное.

Таким образом, векторный алгоритм управления асинхронным электроприводом может быть построен при использовании аппарата нечеткой логики. При этом существенно сокращается объем вычислительных операций.

2.4. Перечень контрольных вопросов к главе 2

1. Какие существуют способы регулирования скорости асинхронного двигателя (АД)?
2. Как реализуется регулирование скорости АД путем изменения напряжения?

3. Для чего между сетью переменного тока со стандартным напряжением и двигателем устанавливается регулятор напряжения (РН)?
4. Какие существуют тиристорные регуляторы напряжения?
5. Как выглядят механические характеристики АД при регулировании скорости изменением напряжения?
6. Как осуществляется импульсное регулирование скорости АД?
7. Где чаще всего применяется импульсное регулирование?
8. Как выглядят механические характеристики АД при импульсном регулировании скорости?
9. В чем заключается сущность частотного регулирования скорости асинхронного двигателя?
10. В чем преимущества частотного регулирования скорости над другими способами регулирования?
11. Какие основные недостатки динамической модели управления асинхронным электроприводом?
12. Что такое быстродействующий логический автомат?
13. Как выглядят механические характеристики АД при частотном регулировании скорости?
14. Как выглядит укрупненная схема электропривода с частотным регулированием скорости?
15. Каковы принципы организации ШИМ-управления?
16. Каким образом осуществляется регулирование момента и тока АД?
17. В чем особенность схемы прямого управления моментом?
18. Какие существуют перспективные способы управления электроприводом и в чем их особенность?
19. Что такое контроллеры нечеткой логики и как они используются при управлении параметрами электропривода?
20. В каких случаях рекомендуется применять системы с нечетким управлением?

ГЛАВА 3. РАЗОМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Обычно автоматическое управление электроприводами сводится к выполнению совокупности действий, обеспечивающих без непосредственного участия человека получение заданного режима движения механизма в соответствии с требованиями производственного процесса.

Одной из распространенных систем автоматического управления являются релейно-контакторные (или релейно-контактные) системы управления. Электропривод, выполненный на такой основе, представляет собой простой нерегулируемый электропривод, в основном общепромышленного применения (например, электропривод кранов, тихоходных лифтов, конвейеров, компрессоров, вентиляторов, насосов, некоторых транспортных устройств и т. п.).

В общем случае под термином «релейно-контакторные системы управления» (РКСУ) понимают логические системы управления, построенные на релейно-контакторной элементной базе и осуществляющие автоматизацию работы двигателей. В задачу РКСУ входит автоматизация следующих операций:

- включение и отключение двигателей;
- выбор направления и скорости вращения;
- пуск, реверс и торможение двигателя;
- управление двигателем в функции какого-либо параметра (времени, скорости, тока, положения рабочего органа и т. п.);
- создание временных пауз движения;
- защитное отключение двигателя при перегрузках, коротких замыканиях, снижениях напряжения ниже нормы и т. п.;
- остановка механизма;
- обеспечение заданной последовательности действий оператора.

Данные операции требуются для выполнения необходимого по технологическим условиям движения рабочего органа механизма.

Достоинства РКСУ:

- наличие гальванической развязки цепей;
- значительная коммутационная мощность;
- высокая помехоустойчивость;
- возможность использования единичного источника питания для силовых и управляющих цепей.

Недостатки РКСУ:

- контактная коммутация, требующая соответствующего ухода за аппаратурой и ограничивающая срок ее службы;
- ограниченное быстродействие;
- повышенные массогабаритные показатели и энергопотребление.

В составе РКСУ можно выделить *главные* (силовые) цепи и *цепи управления* (вспомогательные). К *главным* цепям относятся цепи двигателей и генераторов. К *цепям управления* относятся цепи схемы, обычно содержащие катушки контакторов и реле, блок-контакты контакторов, контакты реле и другие аппараты управления. Часто к цепям управления относятся также сигнальные цепи, цепи защиты и блокировочные связи различного назначения.

Для выполнения разных технологических задач требуется набор некоторых одинаковых операций, которые можно назвать типовыми функциями. В выполнении одной такой функции участвует не вся РКСУ, а только ее часть – типовой узел. Таким образом, в составе РКСУ всегда будут присутствовать те или иные типовые узлы. Кроме них для решения конкретной технологической задачи требуются дополнительные, нетиповые узлы, например узел, формирующий программу технологического цикла работы установки, узел защиты рабочего органа от пробуксовки приводного шкива, превышения скорости и т. п.

3.1. Управление пуском электродвигателей

Автоматизация пуска двигателя значительно облегчает управление электроприводом, устраняет возможные ошибки при пуске и ведет к повышению производительности механизмов.

Наиболее просто осуществляется автоматизация для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, поскольку управление пуском здесь сводится в подавляющем большинстве случаев к прямому включению двигателя на полное напряжение сети.

Для мощных синхронных и асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором пуск иногда осуществляется переключением обмотки статора с пониженного напряжения на номинальное.

При проектировании схем управления асинхронных двигателей с фазным ротором исходят из заданных условий пуска.

На рис. 3.1 показана пусковая диаграмма двигателя с тремя ступенями пускового резистора (реостата), построенная из условий изменения тока в определенных заданных пределах от I_1 до I_2 . Пуск электродвигателя, согласно этой диаграмме, может быть произведен вручную или автоматически.

Если пуск осуществляется вручную, то резисторы переключаются с ориентировкой на показания амперметра в цепи якоря. Автоматическое управление позволяет более точно выдержать заданные условия пуска и освобождает человека от выполнения утомительных операций.

Выключение ступеней резистора должно происходить при определенной угловой скорости двигателя ($\omega_1, \omega_2, \omega_3$), определенном токе I_2 и через определенные промежутки времени (t_1, t_2, t_3). Очевидно, что управ-

ление пуском может быть осуществлено в функции скорости, тока, времени. Иногда управление двигателем осуществляется в функции пути.

Диаграммы, приведенные на рис. 3.1, иллюстрируют процесс ступенчатого пуска при помощи релейно-контактных аппаратов в разомкнутых системах управления.

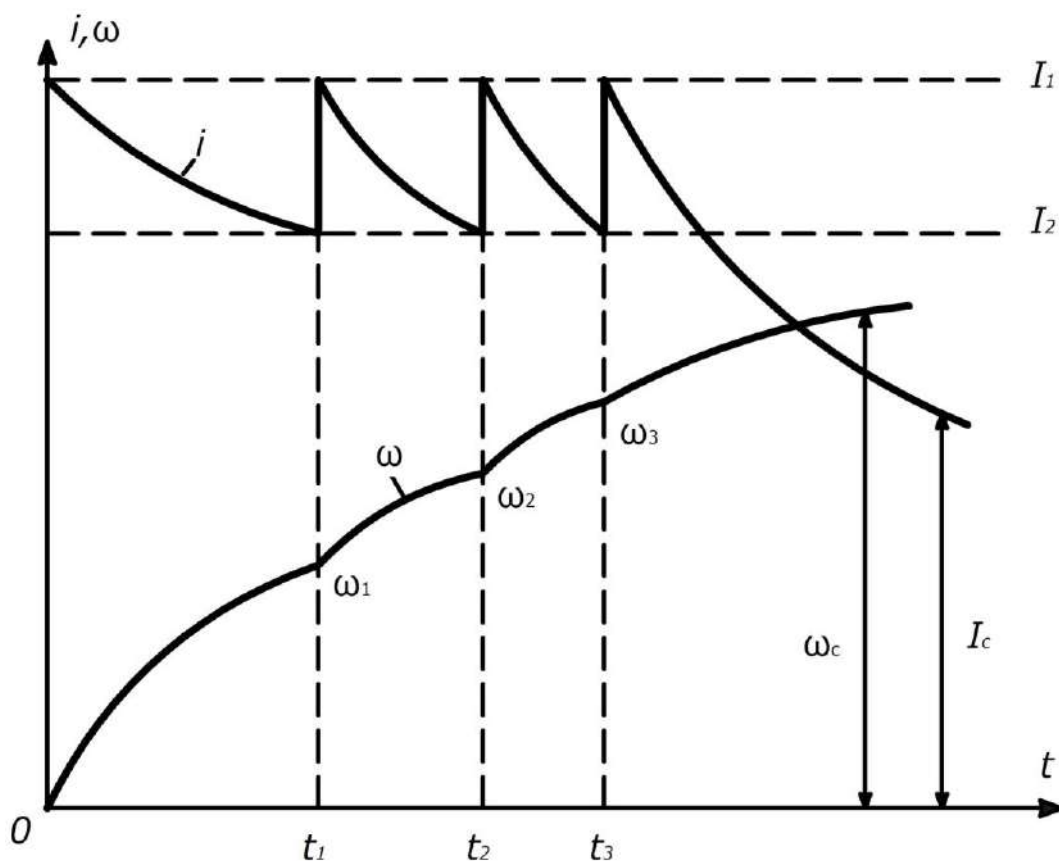


Рис. 3.1. Пусковая диаграмма двигателя с тремя ступенями пускового резистора

Схема управления асинхронным двигателем представлена на рис. 3.2. При нажатии кнопки пуска *SB2* срабатывает реле *KM*, которое встает на самопитание, двигатель *M* подключается к сети и разгоняется.

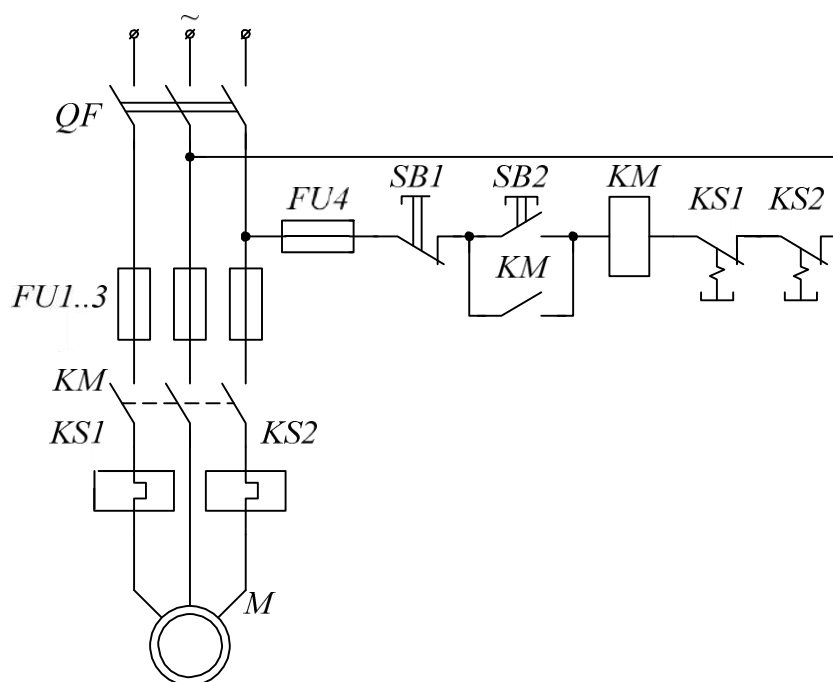


Рис. 3.2. Схема пуска асинхронного двигателя

Защита от перегрузки реализуется следующим образом. Если ток статора больше допустимого тока $I > I_{\text{доп}}$, то элементы тепловых реле $KS1$, $KS2$ нагреваются. При сильном нагреве блок-контакты $KS1$, $KS2$ размыкаются, обесточивая цепь с реле KM , после чего двигатель отключается от сети.

Нулевую (от снижения напряжения) защиту осуществляет реле $KM1$ (магнитный пускатель). В других схемах управления для этого могут дополнительно включаться и другие реле.

Для защиты от коротких замыканий (КЗ) установлены предохранители FU .

3.2. Торможение асинхронного двигателя

Электрическое торможение двигателя можно осуществить как при питании от сети переменного тока (торможение противовключением и рекуперативное торможение), так и при подключении цепи статора к источ-

нику постоянного тока (динамическое торможение), а также при его самовозбуждении. Во всех случаях торможение двигателя осуществляется переводом его в режим генератора, в котором он развивает на своем валу тормозной момент.

Торможение противовключением. Этот режим может быть реализован двумя способами. Один из них связан с изменением чередования на статоре двух фаз питающего двигатель напряжения. Допустим, что двигатель работает на механической характеристике 1 в точке «а» (рис. 3.3, а) при чередовании фаз напряжения на статоре ABC . Тогда при переключении двух фаз (например, B и C) двигатель переходит на характеристику 3 в точку «d», участок db которой соответствует торможению противовключением. При реализации торможения для ограничения тока и момента двигателя производится включение добавочных резисторов в цепь ротора или статора.

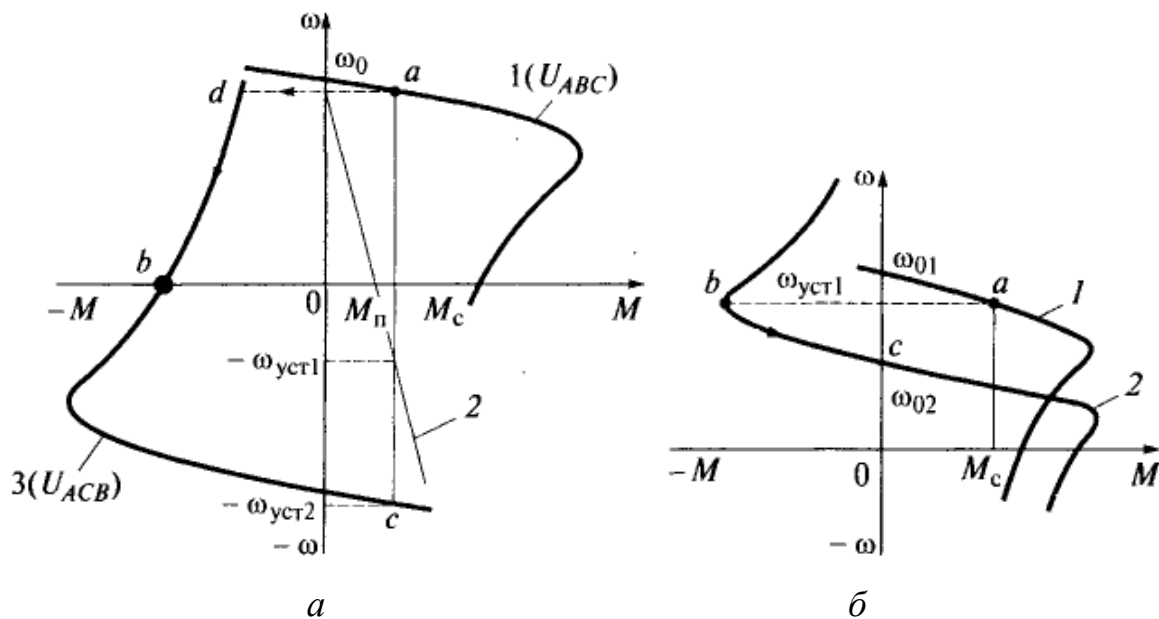


Рис. 3.3. Механические характеристики при торможении противовключением (а) и рекуперативном торможении (б)

Другой путь перевода двигателя в режим торможения противовключением может быть реализован при активном характере момента нагрузки

M_c . Допустим, что требуется осуществить спуск груза при работе грузоподъемного механизма, обеспечивая при этом его торможение с помощью двигателя (так называемый тормозной спуск груза). Для этого двигатель включается на подъем с большим добавочным резистором сопротивлением $R_{2д}$ в цепи ротора (характеристика 2 на рис. 3.3, а). Вследствие превышения моментом нагрузки M_c пускового момента двигателя M_n и его активного характера груз начнет опускаться с установившейся скоростью $\omega_{уст1}$. Двигатель при этом будет работать в режиме торможения противовключением.

Рекуперативное торможение. Этот режим осуществляется в том случае, когда скорость двигателя превышает синхронную ω_0 и он работает в генераторном режиме параллельно с сетью, отдавая (рекуперируя) энергию в сеть. Такой режим возникает при переходе двухскоростного двигателя с высокой скорости на низкую, как это показано на рис. 3.3, б. Предположим, что в исходном положении двигатель работал на характеристике 1 в точке «а», вращаясь со скоростью $\omega_{уст1}$. При увеличении числа пар полюсов асинхронный двигатель переходит на характеристику 2 в точку «б», участок *bc* которой соответствует торможению с рекуперацией (отдачей) энергии в сеть.

Этот вид торможения может быть реализован в системе «преобразователь частоты – двигатель» при торможении, реверсе или переходе двигателя с одной характеристики на другую. Для этого осуществляется уменьшение частоты выходного напряжения ПЧ, и, тем самым, синхронной скорости ω_0 . В силу механической инерции, текущая скорость двигателя ω будет изменяться медленнее, чем скорость вращения магнитного поля ω_0 , и будет ее превышать. За счет этого возникает режим рекуперативного торможения с отдачей энергии в сеть.

Рекуперативное торможение также может быть реализовано в ЭП грузоподъемных механизмов при спуске грузов. Для этого двигатель включается в направлении спуска груза (характеристика 3, рис. 3.3, а). После окончания разбега он будет работать в точке «с» со скоростью – $\omega_{уст2}$. При этом осуществляется процесс тормозного спуска груза с отдачей энергии в сеть.

Рекуперативное торможение является наиболее экономичным видом торможения двигателя.

Динамическое торможение. Для осуществления режима динамического торможения обмотку статора двигателя отключают от сети переменного тока и подключают к источнику постоянного тока, как это показано на рис. 3.4, а. Обмотка ротора двигателя 1 при этом может быть замкнута накоротко или в ее цепь включается добавочный резистор 3 с сопротивлением $R_{2д}$.

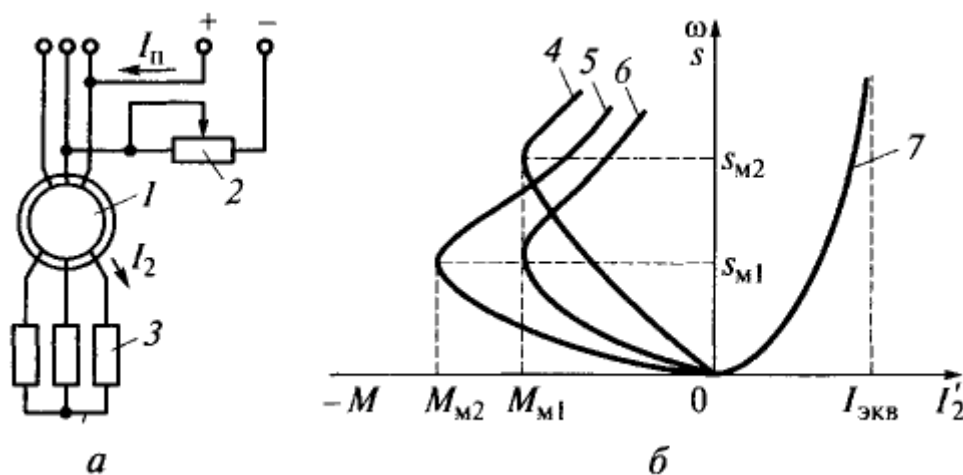


Рис. 3.4. Схема включения (а) и характеристики (б) асинхронного двигателя при динамическом торможении

Протекающий по обмоткам статора постоянный ток I_n создает неподвижное в пространстве магнитное поле (возбуждает двигатель). При вращении ротора в нем наводится ЭДС, под действием которой в обмотке

ротора протекает ток, создающий магнитный поток, также неподвижный в пространстве. Взаимодействие тока ротора с результирующим магнитным полем двигателя создает тормозной момент, за счет чего достигается эффект торможения. Двигатель работает в режиме генератора независимо от сети переменного тока, преобразовывая кинетическую энергию движущихся частей ЭП и рабочей машины в электрическую, которая рассеивается в виде теплоты в цепи ротора.

Формулы для характеристик двигателя в режиме динамического торможения выводятся на основании рассмотрения его схемы замещения. Для электромеханической и механической характеристик двигателя:

$$I_2' = I_{\text{ЭКВ}} \sqrt{\frac{\chi_m^2}{\left[\left(\chi_m + \chi_2' \right)^2 + \left(R_2' / s \right)^2 \right]}}; \quad (3.1)$$

$$M = \frac{2M_m}{\left(s/s_m + s_m/s \right)}, \quad (3.2)$$

где $I_{\text{ЭКВ}}$ – переменный ток статора, эквивалентный по величине намагничивающей силы обмотки постоянному току $I_{\text{П}}$.

Если обмотки статора включены в звезду, то токи $I_{\text{ЭКВ}}$ и $I_{\text{П}}$ связаны соотношением $I_{\text{ЭКВ}} = 0,82 \cdot I_{\text{П}}$, при схеме соединения обмотки статора в треугольник: $I_{\text{ЭКВ}} = 0,47 \cdot I_{\text{П}}$.

Максимальный момент M_m и соответствующее ему скольжение s_m определяются по формулам:

$$M_m = \frac{3I_{\text{ЭКВ}}^2 \chi_m^2}{2\omega_0 \left(\chi_m + \chi_2' \right)}; \quad (3.3)$$

$$s_m = \frac{R_2'}{\chi_m + \chi_2'}. \quad (3.4)$$

При возбуждении асинхронного двигателя постоянным током его скольжение s определяется по формуле:

$$s = \omega / \omega_0 \quad (3.5)$$

Для построения электромеханической характеристики двигателя с помощью формулы (3.4) определяем, что при $s = 0$ ток $I_2' = 0$, а при $s \rightarrow \infty$ ток $I_2' \rightarrow I_{\text{эвб}}$. Можно представить графически электромеханическую характеристику в виде кривой 7 на рис. 3.4, б.

Механические характеристики двигателя могут быть получены с помощью формулы (3.2). При $s = 0$ момент двигателя $M = 0$; при $s \rightarrow \infty$ $M \rightarrow 0$; при s_m момент принимает значение M_m . Механические характеристики двигателя представлены во втором квадранте на рис. 3.4, б в виде кривых 4, 5 и 6.

Такие механические характеристики двигателя могут быть получены изменением добавочного резистора 3 в цепи ротора или постоянного тока $I_{\text{п}}$, подаваемого в обмотки статора (рис. 3.4, а). На рис. 3.4, б показаны механические характеристики двигателя для различных сочетаний $I_{\text{п}}$ и $R_{2\text{д}}$.

Торможение двигателя при самовозбуждении. Этот вид торможения основан на том, что после отключения двигателя от сети его магнитное поле затухает (исчезает) не мгновенно, а в течение некоторого, пусть и небольшого, интервала времени. За счет энергии этого незатухшего поля и использования специальных схем включения двигателя можно обеспечить его самовозбуждение и реализовать тормозной режим. На практике нашли применение конденсаторное и магнитное торможения двигателя.

При конденсаторном торможении возбуждение двигателя 1 осуществляется с помощью конденсаторов 2 , подключаемых к статору двигателя (рис. 3.5, а). Конденсаторы могут подключаться к статору двигателя постоянно (глухое подключение) или с помощью контактора, будучи при этом соединенными в схему «треугольник» или «звезда».

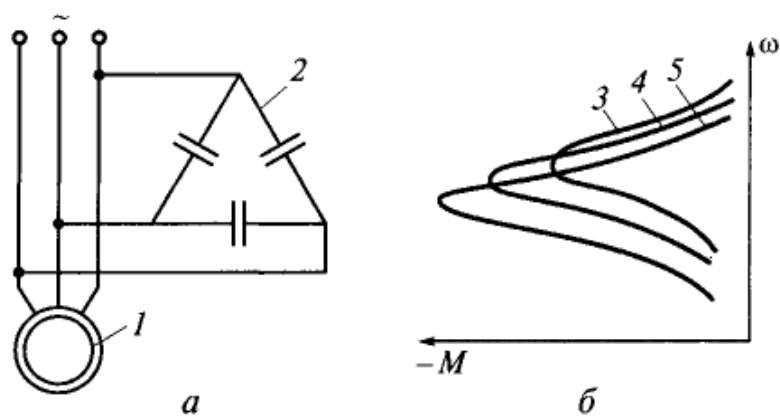


Рис. 3.5. Схема включения (а) и характеристики (б) асинхронного двигателя при конденсаторном торможении

Определяющим фактором, от которого зависят вид и расположение характеристик 3...5 (рис. 3.5, б) и интенсивность торможения, является величина емкости конденсаторов C . Чем она больше, тем больше максимум тормозного момента, а сами характеристики смещаются в область низких скоростей двигателя.

Магнитное торможение реализуется после отключения статора двигателя 2 от сети (рис. 3.6, а) и замыкания с помощью ключей 1 его выводов накоротко.

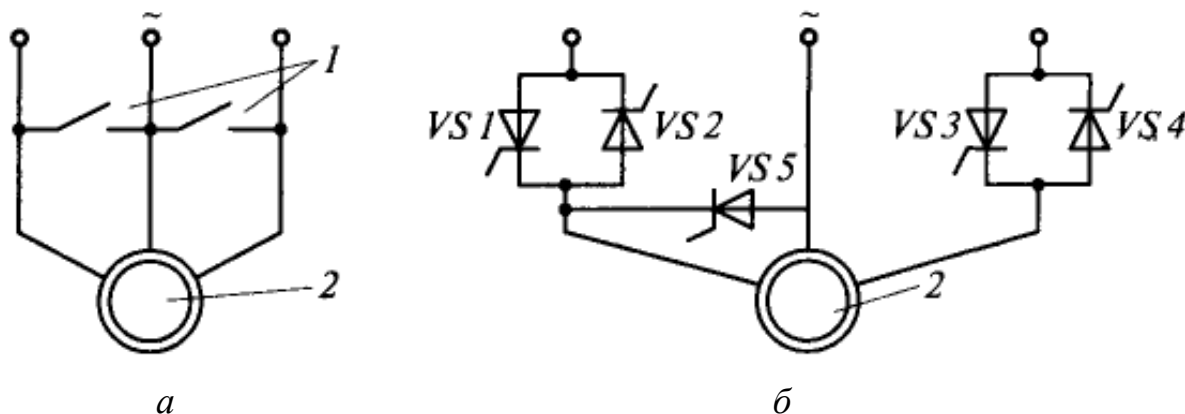


Рис. 3.6. Схема ЭП при торможении асинхронного двигателя замыканием статора (а) и при комбинированном торможении (б)

За счет запасенной в двигателе электромагнитной энергии осуществляется возбуждение двигателя и на его валу создается тормозной момент. Особенностью этого вида торможения является его быстротечность, определяемая небольшим временем затухания магнитного поля двигателя. Несмотря на это возникающие тормозные моменты достаточно велики и обеспечивают интенсивное торможение ЭП.

Практические возможности торможения двигателя существенно расширились в связи с использованием тиристорных пускорегулирующих устройств, которые позволяют осуществлять как пуск двигателя, так и его торможение.

Для обеспечения интенсивного торможения двигателя часто используется комбинированный способ торможения, например динамическое торможение в сочетании с торможением коротким замыканием.

Этот способ может быть реализован тиристорным устройством (рис. 3.6, б), состоящим из двух пар встречно-параллельно включенных тиристоров $VS1...VS4$ для подключения или отключения двигателя и дополнительного тиристора $VS5$ для реализации торможения коротким замыканием обмоток статора.

Торможение осуществляется в два этапа. На первом этапе после закрытия тиристоров $VS1...VS4$ и отключения двигателя от сети подается сигнал управления на тиристор $VS5$, который замыкает накоротко две фазы статора. На втором этапе, когда интенсивность торможения коротким замыканием обмоток статора уменьшается, подается сигнал управления на тиристор $VS1$, с помощью которого в цепь статора подается выпрямленный ток и тем самым обеспечивается режим динамического торможения.

3.3. Аварийная защита и блокировки АД

Для обеспечения надежной работы ЭП и технологического оборудования в его схемах предусматриваются необходимые виды защит. Для этого также предназначены различные блокировочные связи, обеспечивающие заданный порядок операций по управлению одним или несколькими ЭП и технологическим оборудованием и предотвращающие при этом ошибочные действия оператора. Кроме того, во многих случаях целесообразно осуществлять контроль за состоянием и режимом работы отдельных узлов ЭП, что обеспечивается с помощью средств сигнализации, измерительных и регистрирующих приборов.

Аппараты максимальной токовой защиты

При работе АЭП может произойти замыкание электрических цепей между собой или на землю (корпус), а также увеличение тока в силовых цепях сверх допустимого предела, вызванное, например, стопорением движения исполнительного органа рабочей машины, обрывом одной из фаз питающего напряжения и др. Для защиты АЭП и питающей сети от появляющихся в этих случаях недопустимо больших токов (сверхтоков) предусматривается максимальная токовая защита, которая может быть реализована различными средствами: с помощью плавких предохранителей, реле максимального тока и автоматических выключателей.

Плавкие предохранители FU включаются в каждую линию (фазу) питающей двигатель сети между выключателем напряжения сети Q и контактами линейного контактора KM (рис. 3.7, *а*). Цепи управления также могут защищаться плавкими предохранителями (рис. 3.7, *б*).

Выбор плавкой вставки предохранителей силовой части электропривода производится по току, который рассчитывается таким образом, чтобы при пуске двигателя она не перегорала от пускового тока.

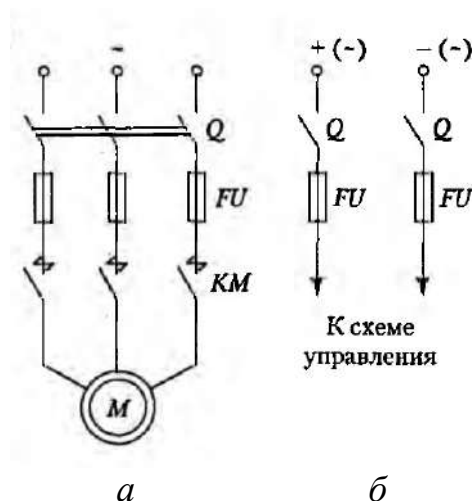


Рис. 3.7. Схемы включения предохранителей для защиты асинхронного двигателя (а) и системы управления (б)

Реле максимального тока используется в основном в АЭП средней и большой мощности. Катушки этих реле $FA1$ и $FA2$ включаются в фазы трехфазных двигателей (рис. 3.8, а). Размыкающие контакты этих реле включены в цепь катушки KM линейного контактора (рис. 3.8, б). При возникновении сверхтоков, превышающих установки реле $FA1$ и $FA2$, эти контакты размыкаются и силовые контакты линейного контактора KM отключают двигатель от питающей сети.

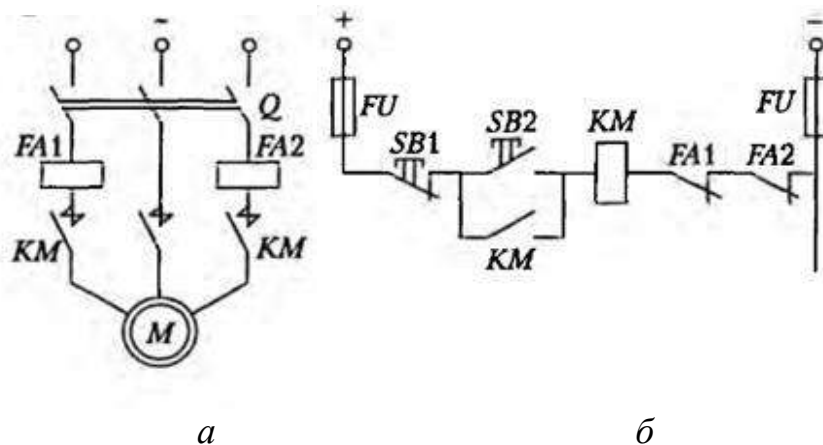


Рис. 3.8. Схемы включения реле максимального тока для защиты асинхронного двигателя (а), и контактов реле в цепи управления (б)

Установки реле максимального тока должны выбираться таким образом, чтобы не происходило отключения двигателей при их пуске или дру-

гих переходных процессах, когда токи в силовых цепях в несколько раз превышают номинальный уровень.

Автоматические воздушные выключатели (автоматы). Эти комплексные многоцелевые аппараты обеспечивают ручное включение и автоматическое отключение двигателей и защиту от сверхтоков, перегрузок и снижения питающего напряжения. Для выполнения этих функций автомат имеет контактную систему, замыкание которой осуществляется вручную с помощью рукоятки или кнопки, максимальное токовое реле и тепловое токовое реле. Кроме этого, некоторые типы автоматов обеспечивают защиту от снижения напряжения и дистанционное отключение двигателей.

Важным устройством автомата является механизм свободного расцепления, который обеспечивает его отключение при поступлении управляющих или защитных воздействий. В общем случае отключение автомата этим механизмом может происходить при протекании токов перегрузки, короткого замыкания, снижении напряжения сети, а также при дистанционном отключении автомата.

Упрощенное устройство автомата показано на рис. 3.9. Рабочий ток нагрузки I протекает через контакт 1 автомата, нагреватель теплового реле 6 в катушку 9 реле максимального тока. При коротком замыкании в контролируемой цепи сердечник 10 максимального реле втягивается в катушку 9 и толкателем 8 воздействует на рычаг 5 механизма расцепления. Последний поворачивается по часовой стрелке и приподнимает защелку 4. Освобождается рычаг 3, и под действием пружины 2 контакты 1 автомата размыкаются.

Аналогичным образом происходит отключение автомата при перегрузке цепи, когда ток в ней больше номинального (расчетного), но меньше тока короткого замыкания. В этом случае ток, проходя по нагревателю 6 теплового реле, вызывает нагрев биметаллической пластины 7. В результате этого свободный конец пластины 7 поднимается вверх и через рычаг 5

воздействует на расцепитель 4, вызывая этим размыкание контактов автомата.

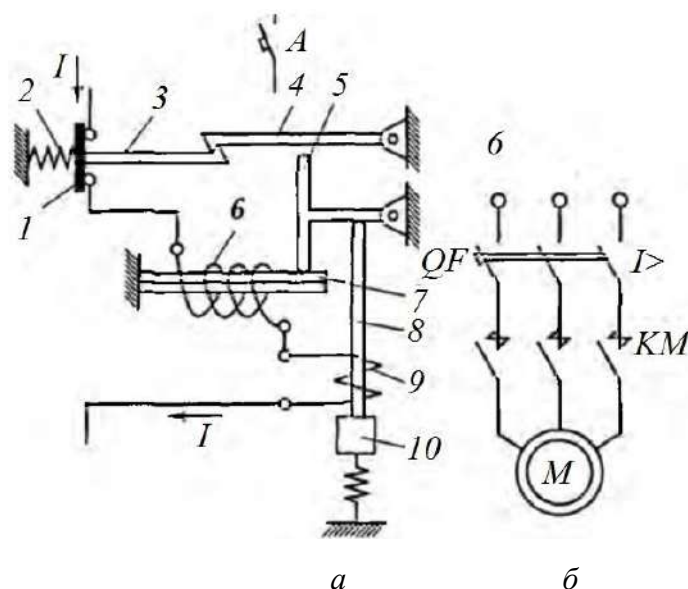


Рис. 3.9. Автоматический выключатель: устройство (а) и схема включения (б)

Пример схемы включения автомата QF для подключения и защиты трехфазного асинхронного двигателя приведен на рис. 3.9, б. Автоматические выключатели широко используются для коммутации и защиты силовых и маломощных цепей ЭП всех видов.

Нулевая защита. При значительном снижении напряжения сети или его исчезновении эта защита обеспечивает отключение двигателей и предотвращает самопроизвольное их включение (самозапуск) после восстановления напряжения. В тех случаях, когда двигатели управляются от кнопок контакторами или магнитными пускателями, нулевая защита осуществляется самими аппаратами без применения дополнительных средств. При управлении АЭП от командоконтроллера или ключа с фиксированным положением их рукояток нулевая защита осуществляется с помощью дополнительного реле напряжения.

Схема нулевой защиты показана на рис. 3.10. В этой схеме реле FV включается в нулевом положении командоконтроллера через контакт $SM0$,

после чего оно становится на самопитание через свой собственный контакт.

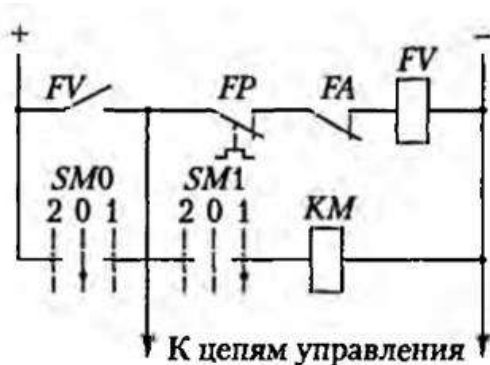


Рис. 3.10. Схема нулевой защиты

При переводе рукоятки командоконтроллера в положение пуска *I*, питание всей схемы управления осуществляется через этот контакт, поэтому при исчезновении напряжения реле *FV* отключит двигатель от сети. При восстановлении напряжения питания повторное включение двигателя может быть произведено лишь после установки рукоятки в нулевое положение, чем исключается возможность его самозапуска.

В схеме на рис. 3.10 реле *FV* является исполнительным элементом еще двух защит от токов короткого замыкания (контакты реле максимального тока *FA*) и тепловой (контакты теплового реле *FP*), что часто практикуется в схемах управления.

Тепловая защита. Это защита отключает двигатель от источника питания, если вследствие протекания по его цепям повышенных токов имеет место более высокий нагрев его обмоток. Такая перегрузка возникает, в частности, при обрыве одной из фаз трехфазных асинхронных двигателей.

Тепловая защита двигателей может быть осуществлена с помощью тепловых, максимально-токовых реле и автоматических выключателей.

Тепловые реле *КК* включаются в две фазы трехфазных двигателей переменного тока непосредственно (рис. 3.11, *а*) или через трансформато-

ры тока TA (рис. 3.11, б), если ток двигателя превышает номинальный ток реле. Размыкающие контакты тепловых реле включаются или в цепь катушек главных (линейных) контакторов или в цепь защитного реле, как это показано на рис. 3.10.

Действие теплового реле основано на эффекте изгибания биметаллической пластинки при ее нагревании за счет различных температурных коэффициентов линейного расширения образующих ее металлов (см. рис. 3.9, а).

Тепловая защита двигателей может осуществляться автоматически выключателями и магнитными пускателями, если они имеют встроенные тепловые расцепители, как, например, в схеме автомата (см. рис. 3.9, а).

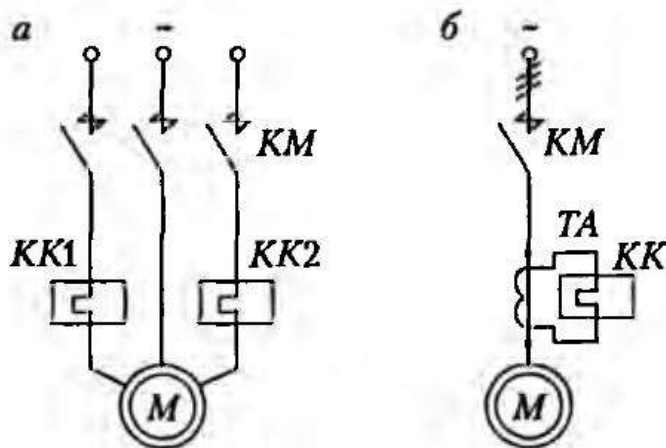


Рис. 3.11. Тепловая защита: а – схема включения теплового реле в цепь статора АД без трансформатора тока; б – схема включения тепловых реле в цепь статора АД с трансформатором тока

При повторно-кратковременных режимах работы ЭП, когда процессы нагрева реле и двигателя различны, защита двигателей от перегрузок осуществляется с помощью максимально-токовых реле $FA1$ и $FA2$ (см. рис. 3.8). Токи установок реле при этом выбирают на 20 – 30 % выше номинального тока двигателя. Так как установки реле ниже пускового тока, то

при пуске его контакты шунтируются контактами реле времени, имеющего выдержку времени несколько большую времени пуска двигателя.

3.4. Схемы управления реверсом двигателей

При осуществлении реверса двигателей следует исключить режим короткого замыкания (КЗ) при неправильном действии персонала. Например, нажатие одновременно кнопок «Вперед» и «Назад» может привести к КЗ. Такие режимы исключаются с помощью электрических блокировок (рис. 3.12).

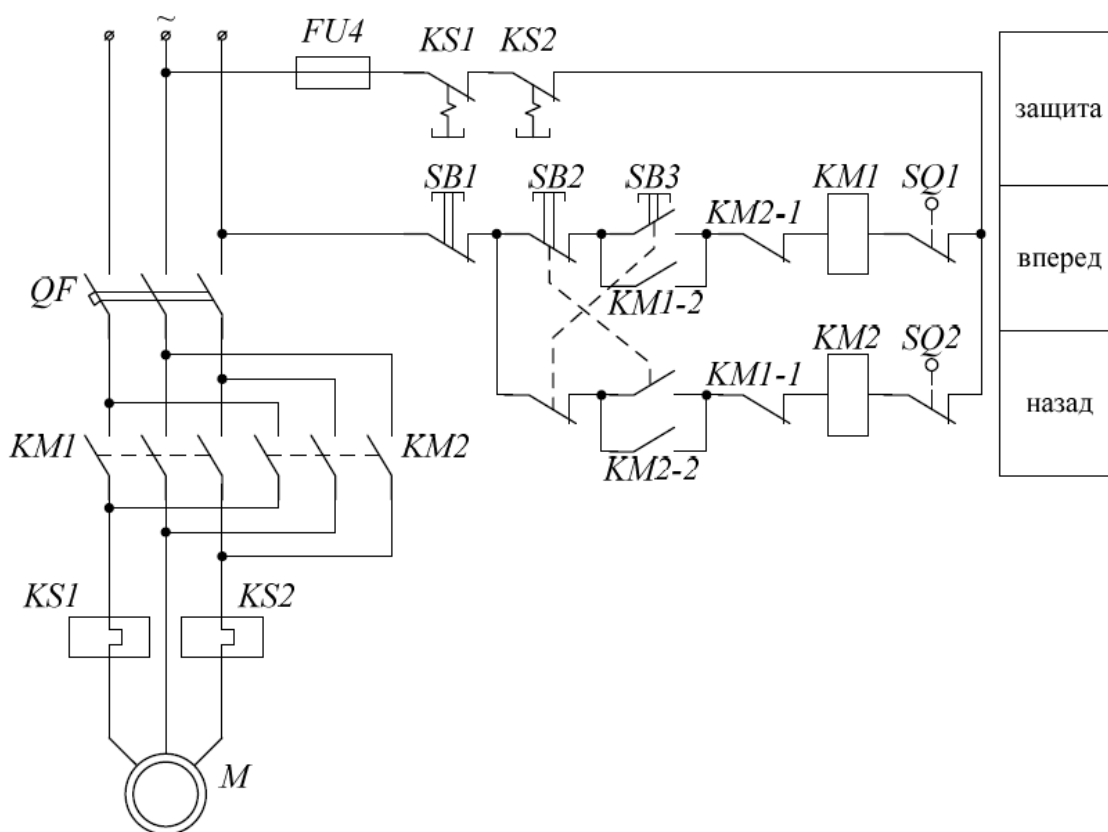


Рис. 3.12. Схема управления реверсом асинхронного двигателя

В этой схеме имеется блокировка от неправильных действий посредством сдвоенных кнопок *SB2* и *SB3*. От приваривания (залипания) контактов – блок-контакты *KM1-2* и *KM2-2*. Защита от недозволённых перемеще-

ний – конечные выключатели $SQ1$ и $SQ2$ (конечная защита). Выключатель $SQ1$ размыкается при достижении перемещений крайнего положения «вперед», а $SQ2$ – «назад». В этих положениях двигатель останавливается. Можно нажатием противодействующей кнопки заставить двигатель перемещаться назад.

При нажатии кнопки пуска $SB3$ срабатывает реле $KM1$, которое встает на самопитание, двигатель M подключается к сети ABC и разгоняется. При нажатии кнопки $SB2$ отпадает реле $KM1$, срабатывает реле $KM2$, которое встает на самопитание, двигатель M подключается к сети BAC и реверсируется. При нажатии кнопки $SB1$ происходит остановка двигателя.

3.5. Схема управления при зависимом пуске двигателей

Достаточно часто необходима определенная последовательность включения и отключения двигателей. Например, при управлении двумя двигателями сначала должен включиться двигатель $M1$, а затем $M2$, а отключение происходит в обратной последовательности. Схема управления при такой работе двигателей представлена на рис. 3.13, а.

При подаче на схему напряжения питания $M1$ и $M2$ не работают, реле $K1$ и $K2$ выключены, но поскольку блок-контакты $K1-3$ и $K2-3$ замкнуты, то реле $K3$ срабатывает и подготавливает схему к пуску. При нажатии кнопки пуска $SB1$ срабатывает реле $K1$, которое встает на самопитание через $K1-1$ и $K3-3$, и двигатель $M1$ подключается к сети.

В цепи реле $K2$ блок-контакт реле $K1-2$ замыкается и срабатывает реле $K2$. Его блок-контакт $K2-3$ отпадает, и реле $K3$ теряет питание. Но его отключение не меняет рабочего состояния схемы, поскольку блок-контакты реле $K3$ шунтированы $K2-1$ (цепь $K2$) и $K2-2$.

При нажатии кнопки $SB2$ катушка реле $K2$ теряет питание, отпадает и отключает двигатель $M2$. При размыкании контакта $K2-2$ реле $K1$ отпа-

дает, отключается двигатель $M1$, контакт $K1-3$ замыкается, на реле $K3$ подается питание и схема снова готова к запуску.

На рис. 3.13, б представлена для сравнения еще одна релейно-контакторная схема, работающая по тому же алгоритму, что и предыдущая. Разница состоит в том, что во второй схеме используется значительно меньше контактов, а тем самым и проводов при монтаже, чем в первой. Однако при длительном режиме работы двигателей первая схема имеет преимущество, так как катушка реле $K3$ отключена и не получает электроэнергию из сети. Необходимо также отметить, что при большем количестве реле во второй схеме нужно держать кнопку $SB2$ нажатой до тех пор, пока не отпадут все реле, иначе при ее отпускании реле включатся заново, начиная с последнего ($K3$).

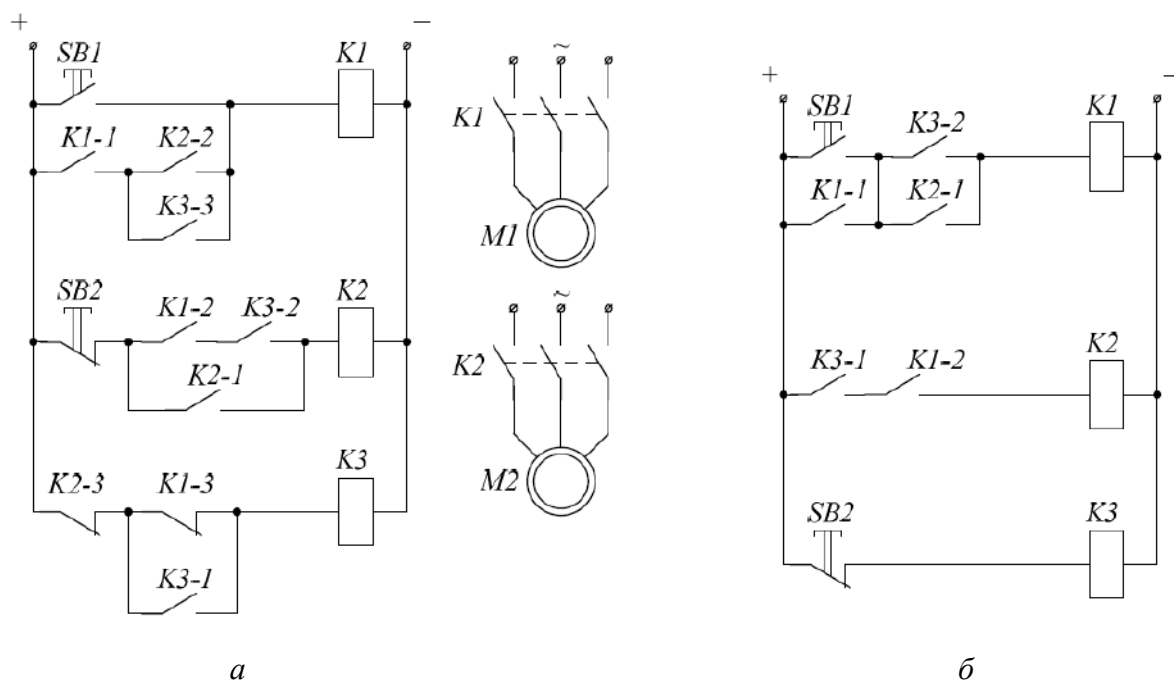


Рис. 3.13. Схема управления при зависимом пуске двигателей

3.6. Схема управления асинхронным двигателем в функции времени

В схеме управления асинхронным двигателем в функции времени (рис. 3.14) предусмотрено динамическое торможение с изменяемым до-

полнительным сопротивлением в цепи статора. При нажатии кнопки пуска *SB2* срабатывает реле *KM*, которое встает на самопитание, и двигатель *M* подключается к сети *ABC*. Срабатывает реле *KT*, замыкается его контакт, подготавливая к включению контактор *K*.

При нажатии кнопки *SB1* отпадает реле *KM*, двигатель *M* отключается от сети. Одновременно включается контактор *K*, подключая источник постоянного напряжения к статору двигателя для динамического торможения. Одновременно размыкается блок-контакт *K* в цепи реле *KM*, исключая возможность включения двигателя. По истечении времени контакт реле *KT* размыкается, контактор *K* теряет питание и отключает режим динамического торможения.

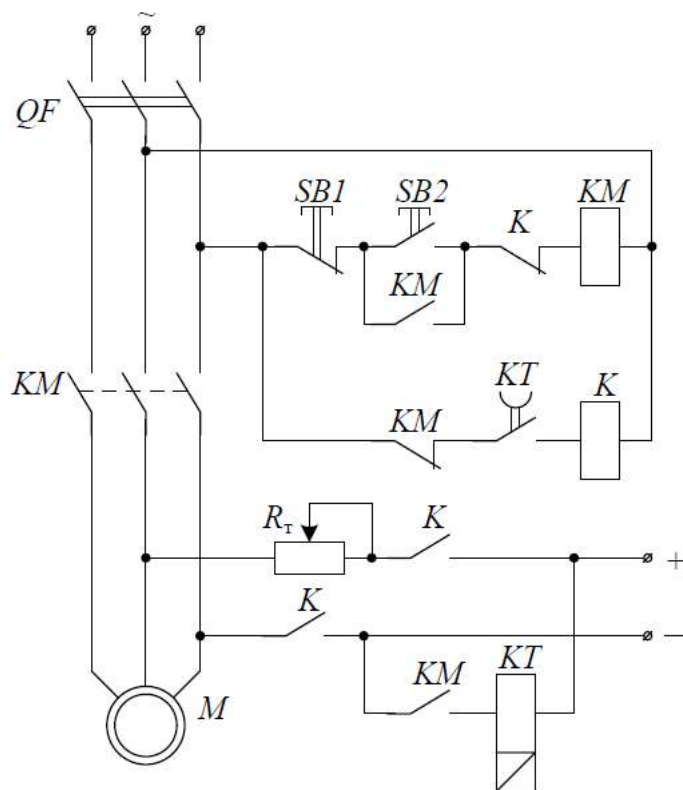


Рис. 3.14. Схема управления асинхронным двигателем в функции времени

3.7. Перечень контрольных вопросов к главе 3

1. В чем состоит принцип разомкнутого управления электроприводом?

2. Где используется разомкнутое управление автоматизированным электроприводом?
3. Какие существуют достоинства релейно-контакторных схем управления электроприводом?
4. Какие существуют недостатки релейно-контакторных схем управления электроприводом?
5. Как осуществляется управление пуском электродвигателей?
6. Какие задачи решаются при автоматизации пускового процесса?
7. Что такое пусковая диаграмма?
8. Как выглядит схема управления пуском асинхронных электродвигателей в релейно-контакторном варианте?
9. Что такое максимально токовая защита и как она реализуется?
10. Что такое тепловая защита и для чего она используется?
11. Для чего необходима нулевая защита электропривода?
12. Как осуществляется электрическое торможение асинхронного электродвигателя?
13. Какие существуют способы торможения электродвигателей?
14. Что такое реле максимального тока?
15. Как с помощью релейно-контакторных схем осуществляется реверс асинхронного электродвигателя?
16. Поясните принцип действия теплового реле.
17. В чем особенность зависимого пуска электродвигателей?
18. Как выглядит схема управления асинхронным электродвигателем в функции времени?
19. В чем заключается принцип управления асинхронным электродвигателем в функции тока?
20. В чем заключается принцип управления асинхронным электродвигателем в функции ЭДС вращения?

ГЛАВА 4. ЗАМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

4.1. Элементы и устройства замкнутых систем управления электроприводом

4.1.1. Классификация элементов АЭП

Автоматизированный электропривод (АЭП) представляет собой совокупность «элементов», представляющих устройство, выполняющее определенную функцию управления, в соответствии с которой входное воздействие элемента преобразуется в выходное.

В автоматизированном электроприводе можно выделить силовые и управляющие элементы (рис. 4.1). *Силовые элементы* преобразуют, регулируют и подводят к рабочему органу (РО) механизма основной поток энергии. *Управляющие элементы* формируют, преобразуют и подводят сигналы управления к силовым элементам. К силовым элементам относятся управляемые преобразователи энергии (УПЭ), электродвигатели (М), передаточные механизмы (ПЭ), рабочие органы машин и механизмов.

Управляющие элементы можно разделить на две группы:

1. Элементы систем управления вентилями УП, которые преобразуют сигнал управления с выхода системы автоматического управления (САУ) в открывающие импульсы.

2. Элементы САУ, формирующие, задающие и управляющие воздействия и определяющие статические и динамические свойства АЭП.

По функциональному признаку элементы второй группы делятся на:

- регуляторы (Р), которые вычисляют разность сигналов задания и обратной связи (рассогласование) и на ее основе формируют управляющее воздействие, приводящее регулируемую координату к заданному значению;

- датчики (Д), преобразующие управляемую координату в электрический сигнал, используемый как сигнал обратной связи;
- задающие элементы (ЗЭ), которые формируют задающие воздействия, определяющие технологическую программу работы АЭП;
- согласующие элементы (СЭ), которые согласуют выходные и входные координаты соединяемых элементов по роду тока, виду и уровню сигналов и т. п.

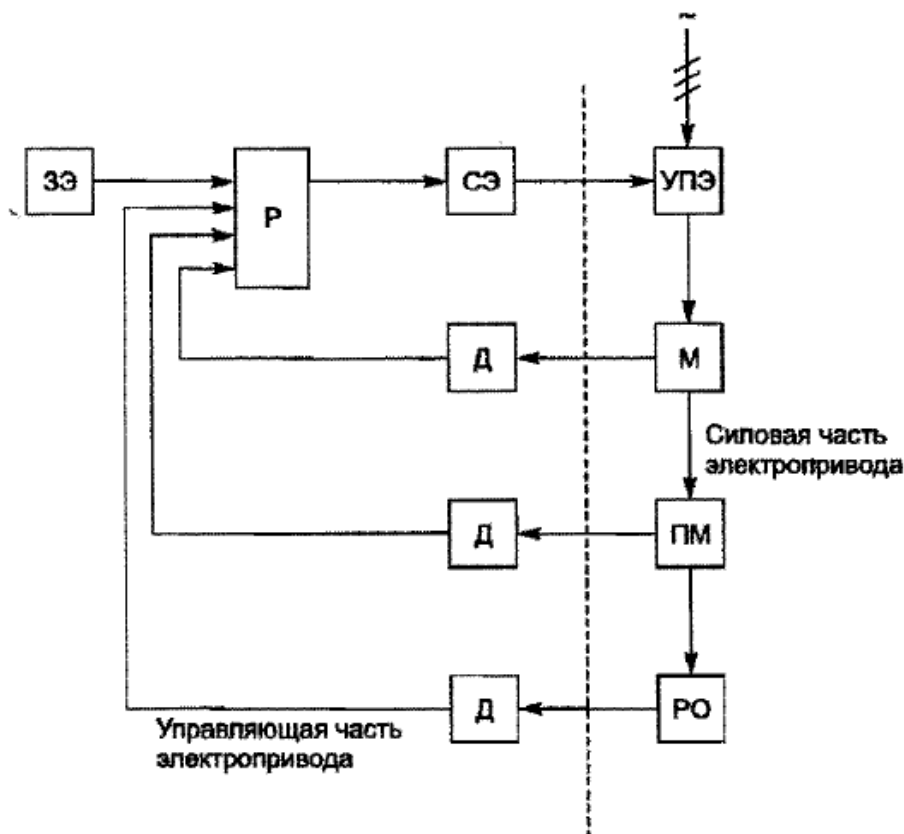


Рис. 4.1. Структурная схема автоматизированного электропривода

4.1.2. Регуляторы

Регулятор – это устройство, которое формирует управляющее воздействие в соответствии с определенным законом (функцией) управления по величине рассогласования значения регулируемой величины от заданного. В САУ используются в основном следующие типы регуляторов:

пропорциональный (П), интегральный (И), пропорционально-интегральный (ПИ), пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД). В зависимости от вида преобразуемых сигналов различают аналоговые и цифровые регуляторы. *Аналоговые регуляторы* (АР), в основном, реализуются на базе операционных усилителей, *цифровые* – на основе специализированных вычислительных устройств или микропроцессоров. Аналоговые регуляторы преобразуют только аналоговые сигналы, являющиеся непрерывными функциями времени. При прохождении через АР преобразуется каждое мгновенное значение непрерывного сигнала.

Для реализации АР операционный усилитель (ОУ) включается по схеме суммирующего усилителя с отрицательной обратной связью. Тип регулятора и его передаточная функция определяются схемой включения резисторов и конденсаторов в цепях на входе и в обратной связи ОУ.

При анализе регуляторов воспользуемся двумя основными допущениями, которые с высокой степенью точности выполняются для ОУ с отрицательной обратной связью в линейном режиме работы:

- дифференциальное входное напряжение $U_{вх}$ ОУ равно нулю;
- инвертирующий и неинвертирующий входы ОУ тока не потребляют, то есть входные токи $i_{и} \approx i_{ни} \approx 0$ (рис. 4.2). Так как неинвертирующий вход подключен к шине «нуль», то, согласно первому допущению, потенциал ϕ_a инвертирующего входа также равен нулю.

С учетом этого в соответствии закона Ома:

$$R_{oy}i_3 = -u_{ba} = -u_y; \quad i_1 = u_3/R_3; \quad i_2 = u_{oc}/R_{oc}.$$

В предположении, что $i_{и} = i_{ни}$, запишем для узла «а» первый закон Кирхгоффа:

$$i_1 - i_2 = i_3; \quad \frac{u_3}{R_3} - \frac{u_{oc}}{R_{oc}} = \frac{-u_y}{R_{oy}}.$$

При равенстве сопротивлений входных резисторов ($R_3 = R_{oc}$) последнее уравнение примет вид:

$$-u_y = \frac{R_{oy}}{R_3} (u_3 - u_{oc}),$$

или

$$-u_y = \frac{R_{oy}}{R_3} u_{pac}, \quad (4.1)$$

где $u_{pac} = u_3 - u_{oc}$ – рассогласование. Знак « \rightarrow » означает, что сигналы управления и рассогласования изменяются в противофазе.

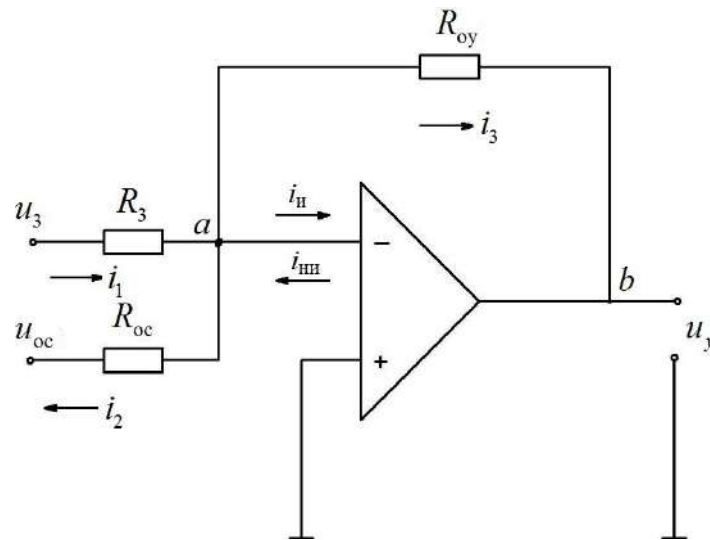


Рис. 4.2. Функциональная схема пропорционального регулятора

Перейдя к приращению переменных в уравнении (4.1) и используя преобразование Лапласа, получим передаточную функцию П-регулятора:

$$W_{\Pi}(p) = \frac{-u_y(p)}{u_{pac}(p)} = \frac{R_{oy}}{R_3} = K_{\Pi},$$

где K_{Π} – коэффициент пропорционального усиления.

Таким образом, в П-регуляторе осуществляется пропорциональное усиление (умножение на постоянную K_{Π}) сигнала рассогласования u_{pac} .

Коэффициент K_{Π} может быть как больше, так и меньше единицы. На рис. 4.3 представлена зависимость $u_y = f(t)$ П-регулятора при изменении сигнала рассогласования $u_{\text{рас}}$.

Напряжение $u_{\text{рас}}$ на входе регулятора не должно превышать значения $u_{\text{рас max}}$, определяемого из условия:

$$|u_{\text{рас}}| \leq |u_{\text{рас max}}| = \left| \frac{U_{\text{вых max}}}{K_{\Pi}} \right|, \quad (4.2)$$

где $U_{\text{вых max}}$ – максимальное значение выходного напряжения ОУ.

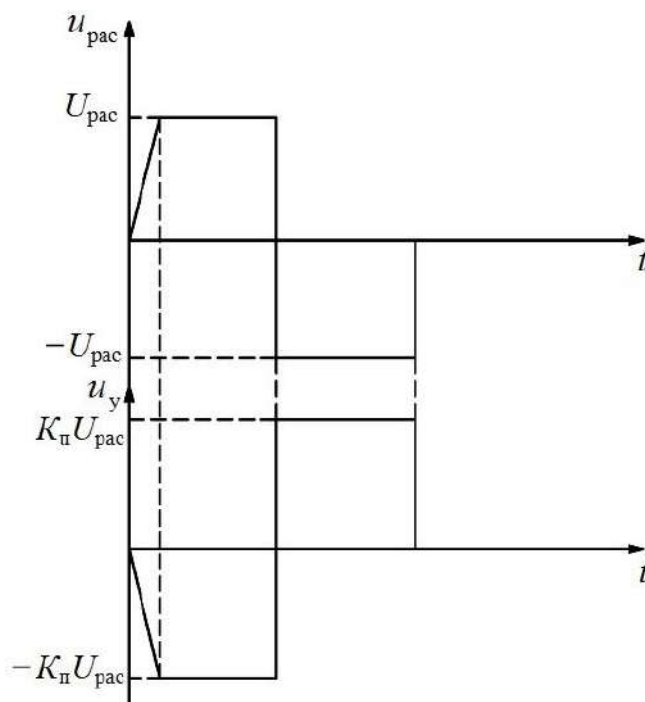


Рис. 4.3. Временные диаграммы работы пропорционального регулятора

Если условие (4.2) не выполняется, то регулятор входит в состояние насыщения и теряет управляющие свойства. При уменьшении $|u_{\text{рас}}|$ до значений меньших $|u_{\text{рас max}}|$, регулятор вновь переходит в линейный режим работы.

Интегральный регулятор (И-регулятор) реализуется при включении в цепь обратной связи ОУ конденсатора $C_{\text{оу}}$ (рис. 4.4). Передаточная функция И-регулятора:

$$W_{\text{и}}(p) = \frac{-u_y(p)}{u_{\text{рас}}(p)} = \frac{1}{T_{\text{и}} p},$$

где $T_{\text{и}} = R_3 C_{\text{оу}}$ – постоянная интегрирования, с.

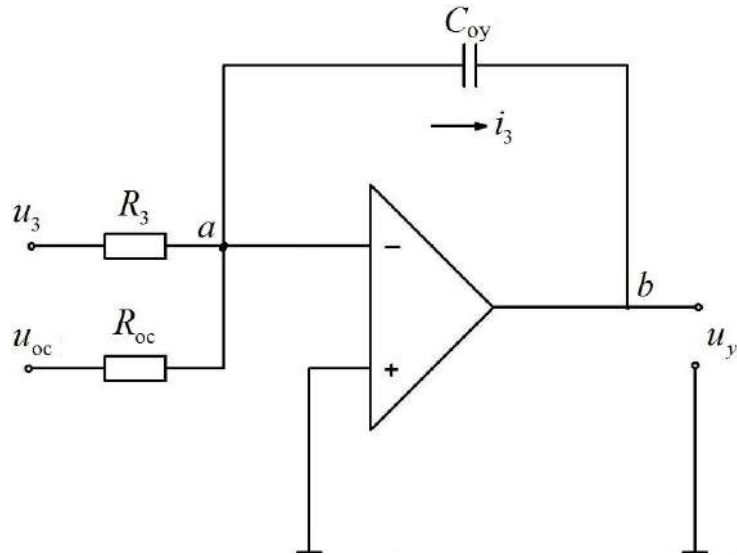


Рис. 4.4. Функциональная схема интегрального регулятора

В И-регуляторе осуществляется интегрирование сигнала рассогласования $U_{\text{рас}}$.

Если входной сигнал $U_{\text{рас}}$ изменяется скачком, то u_y изменяется линейно, достигая за время $t = T_{\text{и}}$ значения входного $U_{\text{рас}}$ (рис. 4.5).

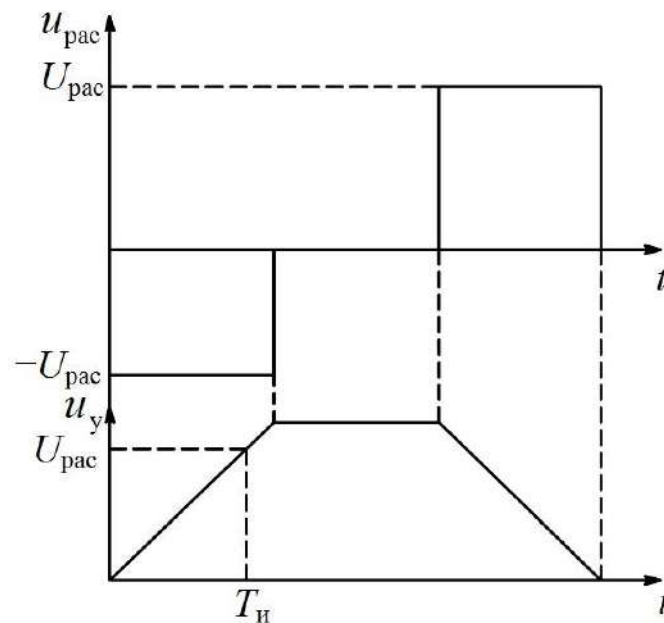


Рис. 4.5. Временные диаграммы работы И-регулятора

При действии на входе И-регулятора постоянного сигнала $U_{\text{рас}}$ в течение времени:

$$t \geq \left| \frac{U_{\text{вых max}} - U_{\text{вых 0}}}{u_{\text{рас}}} T_{\text{и}} \right|,$$

где $U_{\text{вых 0}}$ – начальное выходное напряжение при $t = 0$, регулятор входит в насыщение и будет находиться в нем, пока рассогласование $U_{\text{рас}}$ не изменит знак. *Пропорционально-интегральный регулятор* (ПИ-регулятор) реализуется включением в обратную связь резистора $R_{\text{оу}}$ и конденсатора $C_{\text{оу}}$ (рис. 4.6).

Передаточная функция ПИ регулятора

$$W_{\text{пи}} = \frac{U_y(p)}{u_{\text{рас}}} = K_{\text{п}} + \frac{1}{T_{\text{и}} p} = W_{\text{п}}(p) + W_{\text{и}}(p)$$

является суммой передаточных функций пропорционального и интегрального регуляторов. Так как ПИ-регулятор обладает свойствами П и И-регуляторов, то он осуществляет одновременно пропорциональное усиление и интегрирование сигнала рассогласования $U_{\text{рас}}$.

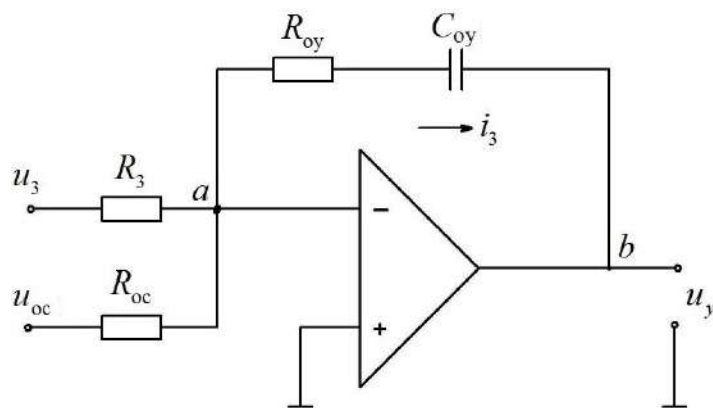


Рис. 4.6. Функциональная схема ПИ-регулятора

Если рассогласование $U_{\text{рас}}$ изменяется скачком от нуля до $-U_{\text{рас}}$, то вначале осуществляется его пропорциональное усиление до значения $K_{\text{п}} U_{\text{рас}}$, а затем интегрирование во времени с постоянной интегрирования

$T_{\text{и}}$ (рис. 4.7). При действии на входе ПИ-регулятора постоянного сигнала $U_{\text{рас}}$ в течение времени t

$$t \geq \left| \frac{U_{\text{вых max}} - U_{\text{вых0}} - K_{\text{п}} U_{\text{рас}}}{U_{\text{рас}}} T_{\text{и}} \right|$$

регулятор входит в состояние насыщения.

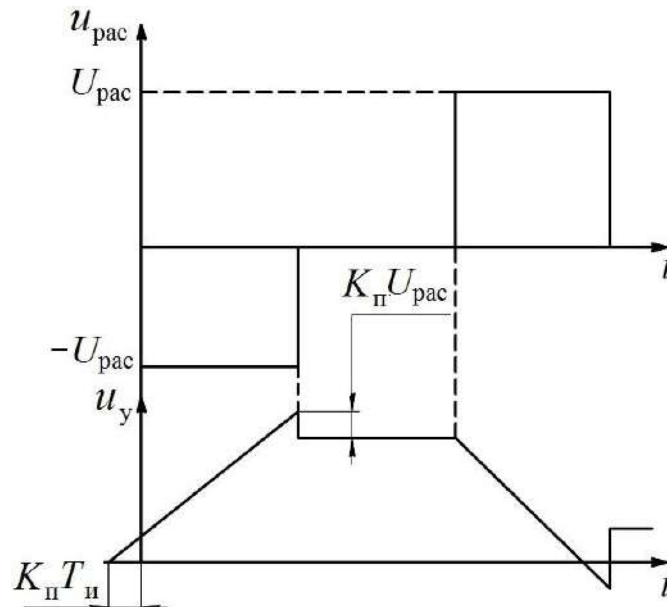


Рис. 4.7. Временные диаграммы работы ПИ-регулятора

Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор) реализуется в простейшем случае включением в ПИ-регуляторе параллельно резисторам R_3 и $R_{\text{ос}}$ конденсаторов C_3 и $C_{\text{ос}}$ (рис. 4.8).

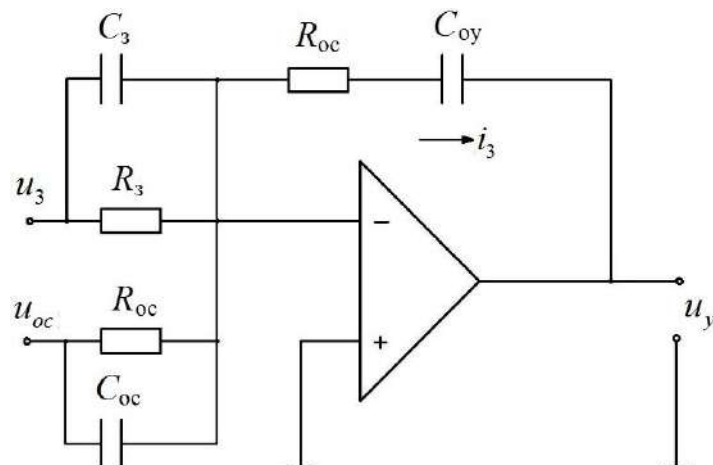


Рис. 4.8. Функциональная схема ПИД-регулятора

Передаточная функция ПИД регулятора:

$$W_{\text{ПИД}}(p) = \frac{-U_y(p)}{U_{\text{рас}}} = K_{\text{п}} + T_{\text{д}}p + \frac{1}{T_{\text{и}}p},$$

где $K_{\text{п}} = \frac{R_{\text{оу}}C_{\text{оу}} + R_3C_3}{R_3C_{\text{оу}}} = \frac{T_1 + T_2}{T_{\text{и}}}$ – коэффициент пропорционального усиления

ПИД-регулятора R ;

$T_{\text{д}} = R_{\text{оу}}C_3$ – постоянная дифференцирования;

$T_{\text{и}} = R_3C_{\text{оу}}$ – постоянная интегрирования;

$T_1 = R_{\text{оу}}C_{\text{оу}}; T_2 = R_3C_3$.

Передаточная функция ПИД-регулятора является суммой передаточных функций пропорционального, интегрального и дифференциального регуляторов. ПИД-регулятор осуществляет одновременно пропорциональное усиление, дифференцирование и интегрирование сигнала рассогласования $u_{\text{рас}}$.

4.1.3. Датчики координат АЭП

Структурная схема датчика. Для получения сигналов обратной связи по управляемым координатам в АЭП используются датчики. Датчик представляет собой устройство, информирующее о состоянии управляемой координаты АЭП путем взаимодействия с ней и преобразования реакции на это взаимодействие в электрический сигнал.

Управляемыми в АЭП являются электрический и механические координаты: ток, напряжение, ЭДС, момент, скорость, величина перемещения и т.д. Для их измерения используют соответствующие датчики.

Датчик координат АЭП структурно может быть представлен в виде последовательного соединения измерительного преобразователя (ИП) и согласующего устройства (СУ) (рис. 4.9). Как показано на рисунке, изме-

рительный преобразователь преобразует координату x в электрический сигнал напряжения u (или тока i) пропорционально x . Согласующее устройство осуществляет преобразование выходного сигнала u ИП в сигнал обратной связи $u_{ос}$, который по величине и форме удовлетворяет САУ.

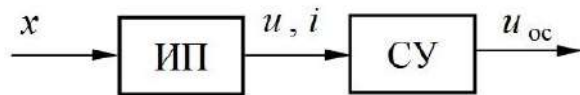


Рис. 4.9. Структурная схема датчика координат АЭП

Датчики тока. Датчики тока (ДТ) предназначены для получения информации о силе и направлении тока двигателя. К ним предъявляют следующие требования:

- линейность характеристики управления (как правило, в диапазоне от $0,1 \cdot I_{ном}$ до $5 \cdot I_{ном}$ не менее 0,9);
- наличие гальванической развязки силовой цепи и системы управления;
- высокое быстродействие.

В качестве измерительных преобразователей в ДТ используются трансформаторы тока, дополнительные (компенсационные) обмотки сглаживающих дросселей, элементы Холла, шунты. Датчики тока на основе трансформаторов тока в основном используются в АЭП постоянного тока, поэтому в учебном пособии не рассматриваются.

Широкое распространение для измерения тока двигателей получили датчики тока на основе шунтов. *Шунт* представляет собой четырехзажимный резистор с чисто активным сопротивлением $R_{ш}$ (безындуктивный шунт), к токовым зажимам которого подключается силовая цепь, а к потенциальным – измерительная цепь.

По закону Ома, падение напряжения на активном сопротивлении (шунте) пропорционально силе тока протекающей в цепи $u = R_{ш}i$.

Для ослабления влияния шунта на прохождение тока в цепи двигателя его сопротивление должно быть минимальным. Номинальное падение напряжения на шунте составляет обычно 75 мВ, поэтому его необходимо усилить до требуемых значений (3,0...3,5 В). Так как шунт имеет потенциальную связь с силовой цепью, датчик тока должен содержать устройство гальванической развязки. В качестве таких устройств применяются трансформаторные и оптоэлектронные устройства. Структурная схема датчика тока на основе шунта приведена на рис. 4.10. Коэффициент передачи:

$$k_{\text{дт}} = R_{\text{ш}} K_{\text{г.р}} K_{\text{ус}},$$

где $K_{\text{г.р}}$, $K_{\text{ус}}$ – коэффициенты передачи устройства гальванической развязки и усилителя соответственно.

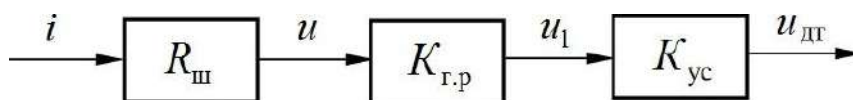


Рис. 4.10. Структурная схема датчика тока на основе шунта

В настоящее время все большее распространение получают датчики тока, работа которых основана на эффекте Холла. Такие датчики выполняются из полупроводникового материала в виде тонкой пластинки или пленки (рис. 4.11). При прохождении электрического тока I_x по пластинке, расположенной перпендикулярно к магнитному полю с индукцией B , в пластинке наводится ЭДС Холла e_x :

$$e_x = K_x I_x B,$$

где K_x – коэффициент, зависящий от свойств материала и размеров пластинки.

Датчик тока на основе элемента Холла схематично представлен на рис. 4.12. Он содержит магнитопровод 1, в воздушном зазоре которого размещен элемент Холла 3, подключенный к усилителю 4. При прохождении тока двигателя $i_{\text{дв}}$ по шине 2, расположенной в окне магнитопровода, возникает магнитный поток, пропорциональный $i_{\text{дв}}$. Следовательно, при

постоянном токе элемента Холла I_x величина ЭДС e_x пропорциональна току двигателя $i_{дв}$.

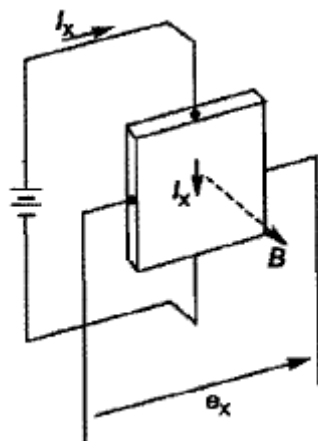


Рис. 4.11. Получение ЭДС Холла в элементе Холла

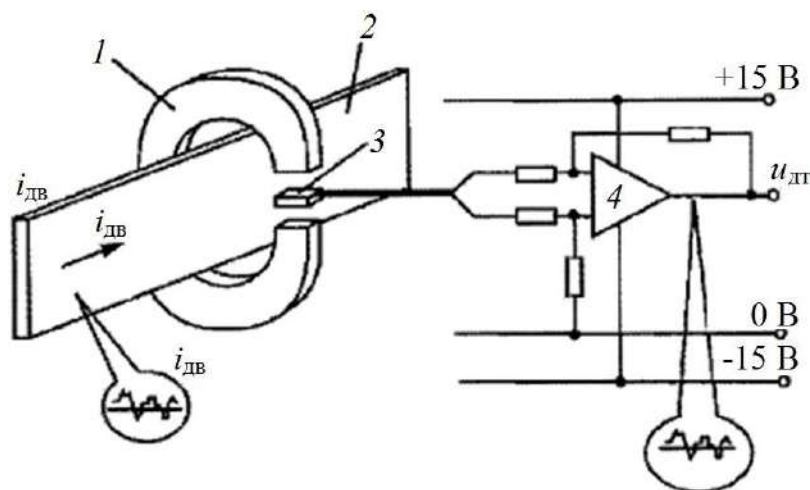


Рис. 4.12. Упрощенная схема датчика тока на основе элемента Холла

Датчики скорости. В качестве датчиков скорости в автоматизированном электроприводе используются тахогенераторы и импульсные датчики скорости, позволяющие получать электрический сигнал, пропорциональный угловой скорости ротора двигателя. Тахогенераторы применяются в аналоговых САУ, импульсные – в цифровых.

К датчикам скорости предъявляются жесткие требования по линейности характеристики управления, стабильности выходного напряжения и

уровню его пульсации, так как они определяют статические и динамические параметры электропривода в целом.

Широкое распространение в электроприводе получили тахогенераторы постоянного тока с постоянными магнитами. Для уменьшения уровня обратных пульсаций тахогенераторы могут встраиваться в электродвигатели. Основной характеристикой тахогенератора является зависимость его ЭДС $e_{\text{тг}}$ от скорости вращения вала электродвигателя $\omega_{\text{тг}}$:

$$e_{\text{тг}} = k_{\text{тг}} / \omega_{\text{тг}},$$

где $k_{\text{тг}}$ – коэффициент передачи тахогенератора, или крутизна характеристики.

В импульсных датчиках скорости в качестве первичного измерительного преобразователя используются импульсные преобразователи перемещения, у которых количество импульсов пропорционально углу поворота вала. В зависимости от измеряемой скорости, диапазона регулирования и требуемой динамической точности используют два варианта цифрового измерения скорости. Оба способа основаны на цифровой реализации выражения:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{\Delta N}{\Delta t} \cdot \frac{2\pi}{z},$$

где $\Delta\varphi$ – угол поворота вала за время Δt ; ΔN – число импульсов преобразователя за время Δt ; z – число импульсов преобразователя за один оборот вала.

При первом варианте осуществляется подсчет импульсов преобразователя ΔN за фиксированный (эталонный) интервал времени ΔT , т. е.

$$\Delta N = \frac{z\Delta T}{2\pi} \omega = k_{\text{дс}} \omega,$$

где $k_{\text{дс}} = \frac{z\Delta T}{2\pi}$ – коэффициент передачи датчика скорости. Этот вариант применяется при высокой скорости вращения.

При втором варианте осуществляется измерение временного интервала Δt , за который от преобразователя поступает фиксированное (эталонное) число импульсов $N_{\text{эт}}$, т. е.:

$$\Delta t = \frac{2\pi N_{\text{эт}}}{z\omega} = k_{\text{дс}} \frac{1}{\omega},$$

где $k_{\text{дс}} = \frac{2\pi N_{\text{эт}}}{z}$ – коэффициент передачи датчика скорости. Такой вариант используется при низкой скорости вращения.

Датчики положения. В настоящее время в электроприводе для измерения перемещения подвижных частей машин и механизмов применяются индукционные и фотоэлектронные преобразователи.

К индукционным относятся вращающиеся трансформаторы, сельсины и индуктосины. Индуктосины могут быть круговыми и линейными.

Вращающимися трансформаторами (ВТ) называются электрические микромашины переменного тока, преобразующие угол поворота α в синусоидальное напряжение, пропорциональное этому углу. В системе автоматического регулирования вращающиеся трансформаторы используются в качестве измерителей рассогласования, фиксирующих отклонение системы от некоторого заданного положения.

Вращающийся трансформатор имеет на статоре и роторе по две одинаковые однофазные распределенные обмотки, сдвинутые между собой на 90° . Напряжение с обмотки ротора снимается с помощью контактных колец и щеток или с помощью кольцевых трансформаторов.

Принцип действия ВТ в синусном режиме основан на зависимости напряжения, наведенного в обмотке ротора пульсирующим магнитным потоком статора, от углового положения осей обмоток статора и ротора.

Пусть к обмотке A (рис. 4.13) подведено синусоидально изменяющееся напряжение $u_A = U_{\text{max}} \sin \omega t$. Проходящий в обмотке ток создает продольный пульсирующий магнитный поток. Если ось вторичной обмотки B

совпадает с осью первичной ($\alpha = 0$), то во вторичной обмотке В будет наведена ЭДС $e_e = E_{\max} \sin \omega t$ (рис. 4.13, а). При повороте вторичной обмотки В на угол α (рис. 4.13, б) в ней будет наводиться меньшая ЭДС:

$$e_e = (E_{\max} \cos \alpha) \sin \omega t.$$

При $\alpha = 90^\circ$ (поперечное расположение обмотки В на рис. 4.13, в) пульсирующий магнитный поток статора не сцепляется с вторичной обмоткой, и ЭДС в ней не будет наводиться.

Если относительно неподвижной катушки статора поворачиваются две одинаковые катушки – синусная и косинусная, расположенные под прямым углом друг к другу (рис. 4.13, г), то амплитуды наведенных в них ЭДС будут изменяться по закону соответственно синуса и косинуса.

Вращающийся трансформатор может использоваться также в фазовращательном режиме. В этом случае на взаимно перпендикулярные обмотки статора подаются напряжения, сдвинутые во времени на 90° . Токи, созданные этими напряжениями, возбуждают два пульсирующих потока, которые образуют суммарное вращающееся поле. Это поле наводит в обмотках ротора синусоидальные ЭДС с постоянными амплитудой и частотой, равной частоте питающих статор напряжений. Фаза этих ЭДС будет определяться углом α поворота относительно статора.

Сельсин представляет собой электрическую микромашину переменного тока, имеющую две обмотки: возбуждения и синхронизации. В зависимости от числа фаз обмотки возбуждения различают одно- и трехфазные сельсины. Обмотка синхронизации всегда трехфазная. В САУ широкое распространение получили бесконтактные сельсины с кольцевым трансформатором.

Обмотка синхронизации бесконтактного сельсина с кольцевым трансформатором размещается в пазах статора, обмотка возбуждения – в пазах или на явно выраженных полюсах ротора сельсина. Особенность

кольцевого трансформатора состоит в том, что его первичная обмотка располагается на статоре, а вторичная – на роторе. Обмотки имеют вид колец, размещенных в магнитной системе, состоящей из кольцевых магнитопроводов статора и ротора, которые на роторе соединяются внутренним магнитопроводом, а на статоре – внешним. В САУ сельсины используются в амплитудном и фазовращательном режимах.

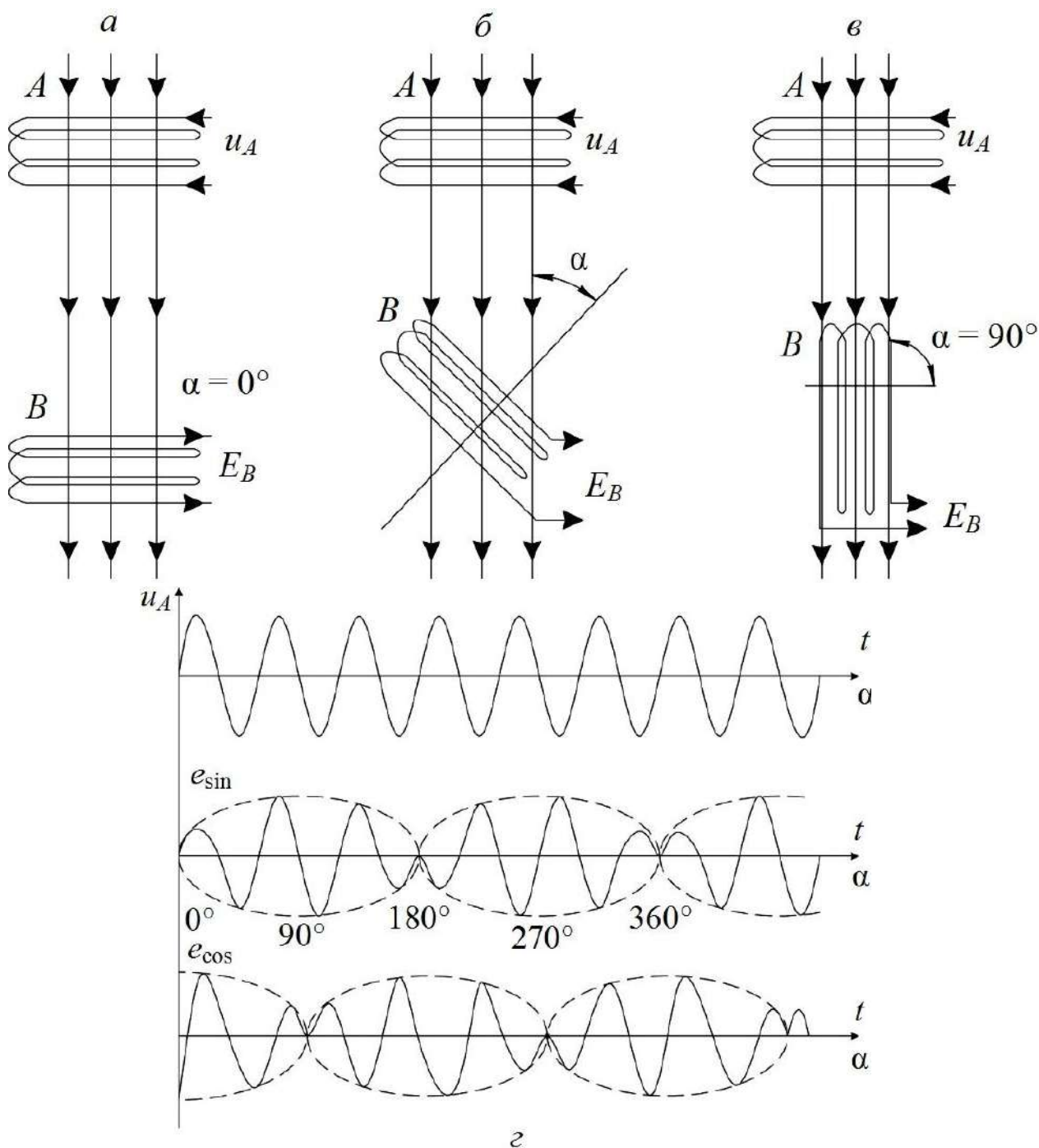


Рис. 4.13. Схематическое представление принципа действия вращающегося трансформатора

Схема включения обмоток сельсина в амплитудном режиме представлена на рис. 4.14. Входной координатой сельсина в этом режиме является угол поворота ротора τ . За начало отсчета принята осевая линия обмотки фазы A .

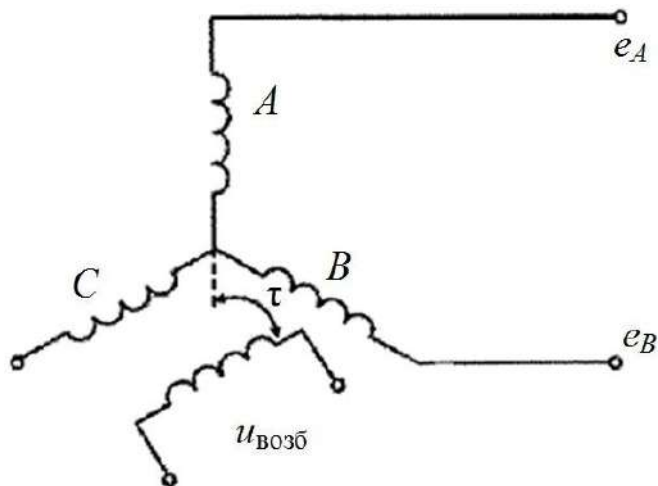


Рис. 4.14. Функциональная схема включения обмоток сельсина в амплитудном режиме

При подаче на обмотку возбуждения переменного напряжения $u_{\text{возб}} = U_{\text{возбmax}} \sin \omega t$ ($U_{\text{возбmax}}$ – амплитудное значение напряжения возбуждения) возникает пульсирующий магнитный поток, действующий по осевой линии обмотки возбуждения. При этом в фазах обмотки синхронизации наводятся ЭДС той же частоты, амплитуды которых изменяются в зависимости от угла поворота ротора относительно статора, а фазы входных напряжений неизменны.

4.1.4. Задающие элементы

К задающим элементам относятся устройства ввода задания (задатчики скорости, силы тока и т. д.) и задатчики интенсивности. По виду сигналов задающие элементы делятся на аналоговые и цифровые.

Простейшими задающими элементами являются потенциометрические. Для электропривода с малым диапазоном скорости используется

один потенциометр (рис. 4.15), с большим – два (рис. 4.16). Потенциометр $R1$ служит для грубого задания скорости, $R2$ – для точного. Для повышения точности задания скорости задающие элементы питаются стабилизированным напряжением $\pm U_{\text{пит}}$. Как правило $\pm U_{\text{пит}} = \pm 10 \text{ В}$.

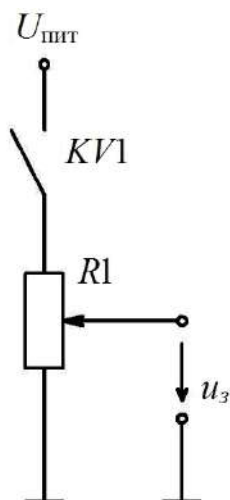


Рис. 4.15. Потенциометрический задатчик скорости

Вместо потенциометров со скользящим контактом в электроприводе большой мощности используются бесконтактные задатчики скорости. Основой их являются бесконтактные сельсины и вращающиеся трансформаторы, выходное напряжение которых пропорционально углу поворота вала на требуемый угол.

В качестве цифровых задатчиков используются многопозиционные переключатели. Они представляют собой десятипозиционные (или более) переключатели сегментного типа с барабанным толкателем. На цилиндрической поверхности барабана нанесены номера сегментных ламелей, с которыми поочередно замыкается общий круговой вывод переключателя при переводе барабана из одного механически фиксируемого положения в другое. Многопозиционные плоские переключатели позволяют при наборе обычного десятичного числа получать на выходе то же число, но в двоичном либо двоично-десятичном коде.

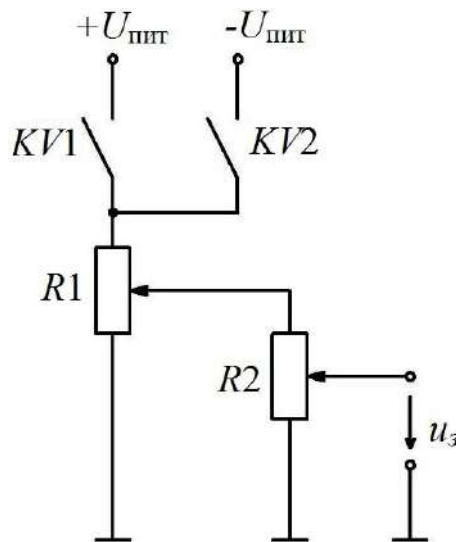


Рис. 4.16. Потенциометрический задатчик скорости с точным заданием

В качестве бесконтактного цифрового задатчика используется фотоэлектрический преобразователь перемещения, число импульсов на выходе которого пропорционально углу поворота вала на требуемый угол.

Задатчики интенсивности служат для получения линейного (в большинстве случаев) закона изменения во времени задающего сигнала, в частности, сигнала задания скорости. Функциональная схема аналогового задатчика интенсивности представлена на рис. 4.17 и состоит из компаратора $A1$ и интегратора $A2$, охваченных обратной связью. При ступенчатом изменении входного сигнала u_1 компаратор $A1$ входит в состояние насыщения с напряжением u_2 , а интегратор $A2$ начинает интегрировать напряжение u_2 . С этого момента входное напряжение u_3 интегратора $A2$ устанавливается на уровне u_1 . Скорость изменения во времени напряжения u_3 на выходе задатчика интенсивности:

$$\frac{du_3}{dt} = \frac{U_{2\max}}{R1 \cdot C1},$$

где $U_{2\max}$ — напряжение насыщения компаратора $A1$.

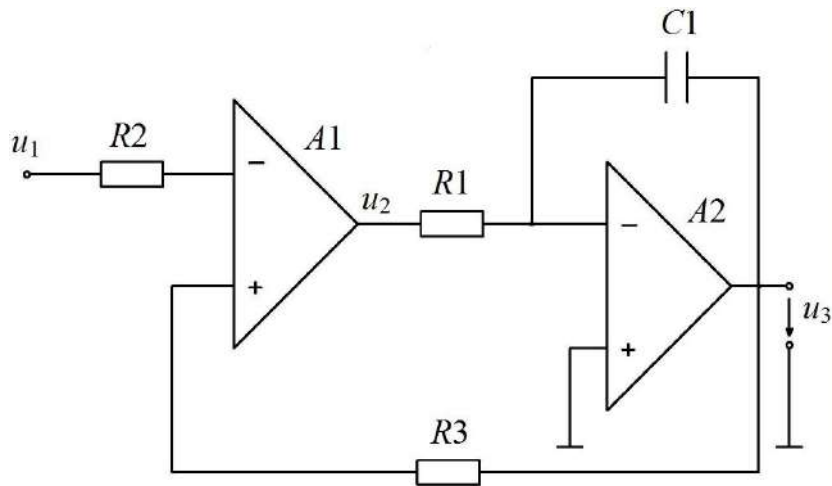


Рис. 4.17. Функциональная схема задатчика интенсивности

4.2. Системы управления параллельного действия

Управление переходными процессами в машинах переменного тока основывается на необходимости организовать управление по переменным состояниям: вектору тока статора i_s , вектору тока ротора i_r , потокосцеплению статора Ψ_s , потокосцеплению ротора Ψ_r , главному потокосцеплению машины $\Psi_o = L_m (i_s + i_r)$. Эти переменные состояния взаимосвязаны перекрестными связями.

Базовым элементом такой системы управления приводом является преобразователь координат (векторный преобразователь). При помощи преобразователя координат осуществляется преобразование сигналов, пропорциональных переменным состояниям $(i_s, i_r, \Psi_r, \Psi_s, \Psi_o)$, из системы координат, жестко связанной со статором ($\alpha - \beta$) или с ротором ($d - q$), во вращающуюся систему координат (1 – 2) в соответствии с выражениями:

$$X_1 = X_{\alpha(d)} \cos\psi + X_{\beta(q)} \sin\psi,$$

$$X_2 = - X_{\alpha(d)} \sin\psi + X_{\beta(q)} \cos\psi,$$

где ψ – угол, отсчитываемый от оси α (d) до вектора X .

Составляющие i_{s1}, i_{s2} в системе координат (1 – 2) получаются в виде сигналов постоянного тока. По этим составляющим токов может быть ор-

ганизована система подчиненного управления потоком и моментом двигателя.

Момент, развиваемый машиной переменного тока, определяется векторным произведением переменных состояния:

$$M = \frac{3}{2} \Psi_o \cdot i_s = \frac{3}{2} k_r \Psi_r \cdot i_s = \frac{3}{2} \frac{k_s k_r}{L_m} \Psi_r \cdot \Psi_s = \frac{3}{2} L_m i_r \cdot i_s = \frac{3}{2} k_s i_r \cdot \Psi_s = \frac{3}{2} \Psi_s \cdot i_s,$$

причем оба вектора должны быть взяты в одной и той же системе координат.

Общее выражение векторного произведения двух векторов $X \cdot Y$ в произвольной системе координат имеет вид

$$M = X \cdot Y = X_1 Y_2 - X_2 Y_1.$$

Если взять систему координат, жестко связанную с первым вектором, входящим в векторное произведение, то эта формула преобразуется к виду:

$$M = X \cdot Y = X_1 Y_2.$$

Выражение для момента машины переменного тока определяется амплитудой первого вектора и составляющей второго, находящейся в квадратуре к первому вектору.

Выбор переменных состояния и, следовательно, системы координат определяется конкретным типом машины переменного тока и назначением привода.

При управлении приводом переменного тока в большинстве случаев целесообразно стабилизировать модуль потокосцепления и управлять моментом, развиваемым двигателем при помощи составляющих вектора тока i_{s1} и i_{s2} . Раздельное управление модулем потокосцепления и составляющей вектора тока всегда осуществимо.

При использовании систем координат, связанных с Ψ_o и Ψ_s , канал управления модулем потокосцепления при управлении со стороны статора

необходимо строить по одноконтурной схеме, а в случае использования системы координат, связанной с Ψ_r , – по двухконтурной схеме подчиненного регулирования.

В случае управления со стороны ротора (машины двойного питания) при использовании системы координат Ψ_o или Ψ_r управление модулем Ψ_o или Ψ_r можно осуществлять по одноконтурной схеме, а при использовании системы координат Ψ_s – по двухконтурной схеме.

Канал управления моментом при стабилизации модуля потокосцепления строится одноконтурным как канал управления составляющей тока i_{s2} .

Действительно, техническая реализация систем векторного управления требует формирования сигналов обратных связей, пропорциональных составляющим векторов $\Psi_{j\alpha}, \Psi_{j\beta}; j = (0, s, r)$ и $i_{s\alpha}, i_{s\beta} (i_{r\alpha}, i_{r\beta})$.

В системе, построенной по принципу стабилизации Ψ_o , возможно прямое измерение $\Psi_{o\alpha}, \Psi_{o\beta}$ при помощи измерения индукции в зазоре машины по осям α и β .

В системах со стабилизацией Ψ_r и Ψ_s составляющие $\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$ или $\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}$ могут быть получены только при помощи специальных вычислителей.

Главной особенностью системы управления является полная независимость управляемых переменных Ψ_o, i_2 от напряжения и частоты сети, а также от угловой скорости ротора. Это свойство позволяет рассматривать такую систему как систему управления, обеспечивающую работу электропривода от нестабильной сети.

Представим на рис. 4.18 качественный характер зависимости момента асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором от абсолютного значения скольжения β для различных законов управления потокосцеплением двигателя.

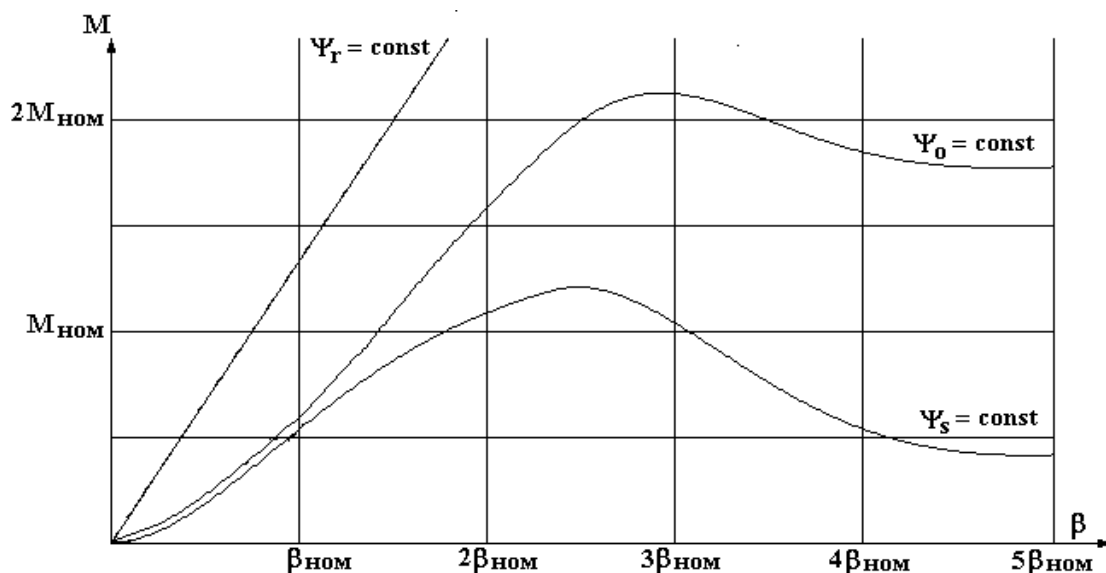


Рис. 4.18. Механические характеристики асинхронного двигателя при различных законах частотного управления

Абсолютное скольжение β , определяющее частоту тока ротора:

$$\beta = (\omega_1 - \omega).$$

В режиме $\Psi_r = \text{const}$ развиваемый электромагнитный момент не имеет максимума и растет неограниченно с ростом β . Однако при больших величинах скольжения поддержание неизменным Ψ_r невозможно из-за роста потокоцепления в воздушном зазоре и неизбежного насыщения машины.

При изменении скольжения в пределах $3\beta_{\text{ном}}$ увеличение Ψ_o незначительно и реализация $\Psi_r = \text{const}$ вполне осуществима.

4.3. Системы управления асинхронным электродвигателем последовательного действия

Современный уровень развития вычислительной техники дает возможность с учетом допущений строить модель асинхронного двигателя в фазных координатах. Однако структурная схема модели при этом получается весьма сложной из-за наличия переменных коэффициентов в уравне-

ниях связи фазных токов и потокосцеплений машины, зависящих от мгновенного значения угла поворота ротора относительно магнитных осей статора двигателя. С целью упрощения математических моделей систему уравнений трехфазного асинхронного электродвигателя, записанную в фазных координатах, принято представлять в ортогональной системе координат $(x - y)$, вращающейся в пространстве с произвольной угловой скоростью ω_k .

Эквивалентные напряжения статора в системе координат $(x - y)$ связаны с фазными напряжениями трехфазного электродвигателя следующими соотношениями:

$$U_{sx} = \frac{2}{3} \left[U_{\Phi A} \cos \omega_k t + U_{\Phi B} \cos \left(\omega_k t - \frac{2\pi}{3} \right) + U_{\Phi C} \cos \left(\omega_k t + \frac{2\pi}{3} \right) \right],$$

$$U_{sy} = -\frac{2}{3} \left[U_{\Phi A} \sin \omega_k t + U_{\Phi B} \sin \left(\omega_k t - \frac{2\pi}{3} \right) + U_{\Phi C} \sin \left(\omega_k t + \frac{2\pi}{3} \right) \right].$$

Аналогичные соотношения связывают эквивалентные значения токов и потокосцеплений двигателя с соответствующими фазными значениями переменных. Подставляя в эти уравнения выражения для реальных фазных напряжений:

$$U_{\Phi A} = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

$$U_{\Phi B} = U_m \cos \left(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_0 \right),$$

$$U_{\Phi C} = U_m \cos \left(\omega_0 t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_0 \right).$$

можно получить выражения для составляющих напряжений в эквивалентной двухфазной системе координат:

$$U_{sx} = U_m \cos[(\omega_o - \omega_k)t + \varphi_o],$$

$$U_{sy} = U_m \sin[(\omega_o - \omega_k)t + \varphi_o],$$

где U_m – амплитудное значение фазного напряжения, ω_0 – частота вращения поля статора двигателя в пространстве, ϕ_0 – начальная фаза напряжения фазы A двигателя.

Система уравнений электромагнитного равновесия асинхронного двигателя в форме Коши в системе координат $(x - y)$ может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned}\frac{d\Psi_{sx}}{dt} &= U_{sx} - R_s i_{sx} + \omega_\kappa \Psi_{sy}, \\ \frac{d\Psi_{sy}}{dt} &= U_{sy} - R_s i_{sy} - \omega_\kappa \Psi_{sx}, \\ \frac{d\Psi_{rx}}{dt} &= -R_r i_{rx} + (\omega_\kappa - \omega) \Psi_{ry}, \\ \frac{d\Psi_{ry}}{dt} &= -R_r i_{ry} - (\omega_\kappa - \omega) \Psi_{rx}.\end{aligned}$$

где Ψ_{sx}, Ψ_{sy} – потокосцепления эквивалентных статорных контуров; Ψ_{rx}, Ψ_{ry} – потокосцепления эквивалентных роторных контуров; i_{sx}, i_{sy} – эквивалентные токи статора; i_{rx}, i_{ry} – эквивалентные токи ротора; R_s, R_r – активные сопротивления фазных обмоток статора и ротора; ω – частота вращения ротора двигателя.

Для решения этой системы уравнений ее необходимо дополнить уравнениями связи эквивалентных токов и потокосцеплений машины.

В системе координат $(x - y)$ эквивалентные потокосцепления и токи статора и ротора двигателя связаны друг с другом следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}\Psi_{sx} &= L_s i_{sx} + L_m i_{rx}, \\ \Psi_{sy} &= L_s i_{sy} + L_m i_{ry}, \\ \Psi_{rx} &= L_m i_{sx} + L_r i_{rx}, \\ \Psi_{ry} &= L_m i_{sy} + L_r i_{ry},\end{aligned}$$

где L_m – взаимная индуктивность, учитывающая магнитную связь одной фазы статора с тремя обмотками ротора и соответственно одной обмот-

ки ротора с тремя обмотками статора; $L_s = L_m + L_{\sigma s}$ – индуктивность обмотки статора, учитывающая магнитную связь с двумя другими фазными обмотками статора; $L_r = L_m + L_{\sigma r}$ – индуктивность обмотки ротора, учитывающая магнитную связь с двумя другими фазными обмотками ротора; $L_{\sigma s}$ – индуктивность рассеяния фазной обмотки статора; $L_{\sigma r}$ – индуктивность рассеяния фазной обмотки ротора.

Коэффициенты в уравнениях связи между эквивалентными токами и потокоцеплениями не зависят от мгновенного значения угла поворота ротора относительно магнитной оси статора двигателя. Для построения математической модели асинхронного двигателя удобнее пользоваться обратными зависимостями, то есть зависимостями $i = f(\Psi)$, которые имеют вид:

$$\begin{aligned} i_{sx} &= \frac{1}{\sigma L_s} \Psi_{sx} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \Psi_{rx}, \\ i_{sy} &= \frac{1}{\sigma L_s} \Psi_{sy} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \Psi_{ry}, \\ i_{rx} &= -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \Psi_{sx} + \frac{1}{\sigma L_r} \Psi_{rx}, \\ i_{ry} &= -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \Psi_{sy} + \frac{1}{\sigma L_r} \Psi_{ry}, \end{aligned}$$

где $\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}\right)$ – коэффициент рассеяния двигателя.

Выражение для электромагнитного момента асинхронного двигателя представляет собой векторное произведение любой пары пространственных векторов токов и потокоцеплений. Таким образом, в системе координат $(x - y)$ можно использовать шесть уравнений для отыскания электромагнитного момента двигателя. При использовании любого из этих выражений результат, естественно, будет один и тот же.

$$\begin{aligned}
M &= \frac{3}{2} p_n (\Psi_{sx} i_{sy} - \Psi_{sy} i_{sx}), & M &= \frac{3}{2} p_n (i_{rx} \Psi_{ry} - i_{ry} \Psi_{rx}), \\
M &= \frac{3}{2} L_m p_n (i_{rx} i_{sy} - i_{ry} i_{sx}), & M &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} p_n (\Psi_{rx} \Psi_{sy} - \Psi_{ry} \Psi_{sx}), \\
M &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} p_n (i_{rx} \Psi_{sy} - i_{ry} \Psi_{sx}), & M &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} p_n (\Psi_{rx} i_{sy} - \Psi_{ry} i_{sx}).
\end{aligned}$$

где p_n – число пар полюсов асинхронного двигателя.

Выбор того или иного вида уравнения для электромагнитного момента осуществляется из условия рационального построения структурной схемы математической модели.

Как известно, уравнение движения двигателя в одномассовой механической системе имеет вид:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_\Sigma} (M - M_c),$$

где J_Σ – суммарный момент инерции ротора двигателя и механизма;

M_c – статический момент нагрузки электропривода.

Структурная схема асинхронного двигателя в системе координат $(x - y)$ представлена на рис. 4.19.

В зависимости от выбора скорости вращения системы координат ω_k уравнения электромагнитного равновесия асинхронного двигателя несколько видоизменяются, однако механическая характеристика двигателя, рассчитанная в системе координат, вращающейся в пространстве с любой угловой скоростью ω_k , изменений не претерпевает.

В теории электромагнитных переходных процессов электрических машин используются три основные координатные системы, являющиеся частными случаями рассмотренной выше.

Первая система координат неподвижна относительно статора двигателя, то есть $\omega_k = 0$. Оси в этой системе координат обозначаются $(\alpha - \beta)$. Основное преимущество системы координат $(\alpha - \beta)$ состоит в том, что при выборе положения одной из ее осей (принято – оси α), совпадающей с маг-

нитной осью одной из фаз реальной машины, эквивалентный ток i_{sa} будет равен реальному фазному току двигателя.

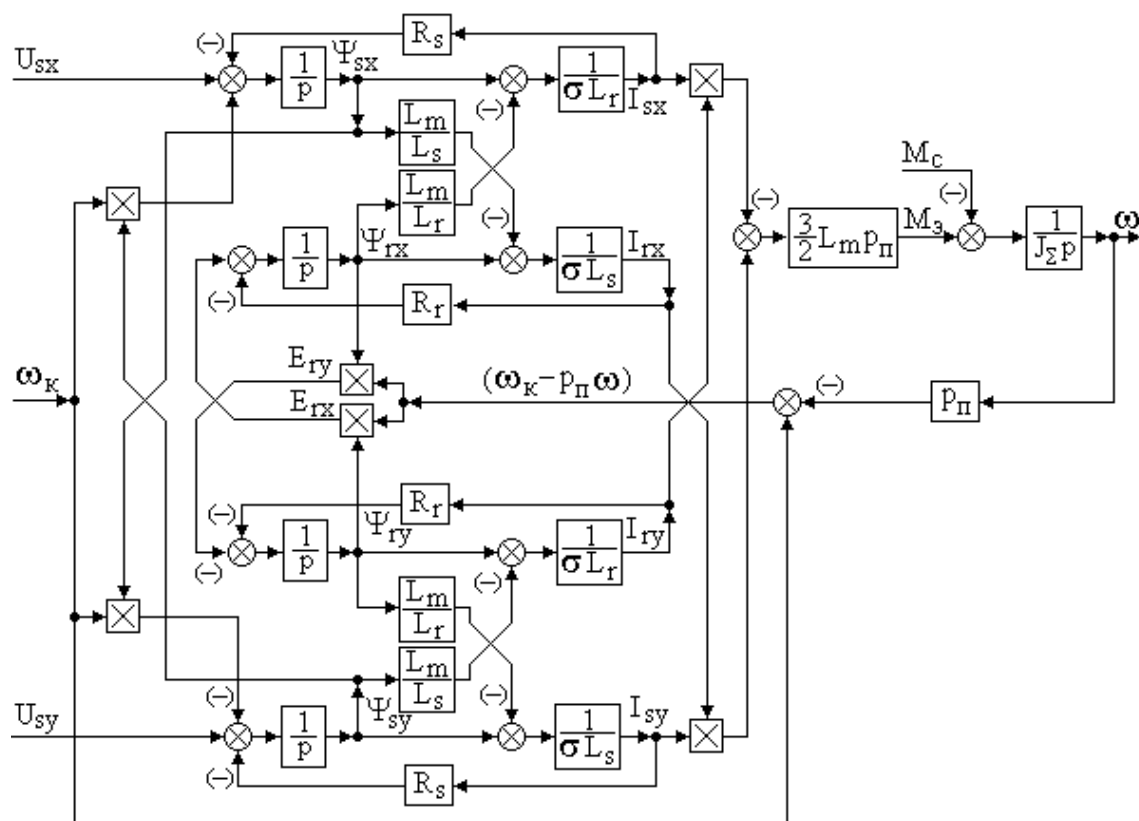


Рис. 4.19. Структурная схема асинхронного электродвигателя в системе координат, вращающейся в пространстве с произвольной угловой скоростью ω_k

Эта система координат широко применяется для анализа систем электропривода с управлением двигательными и тормозными режимами по цепи статора, в том числе и при анализе систем с векторным управлением. Определенную сложность при построении модели асинхронного двигателя в системе координат $(\alpha - \beta)$ представляет то обстоятельство, что эквивалентные напряжения U_{sa} и $U_{s\beta}$ изменяются во времени по синусоидальному закону. В том случае, если частота источника электроэнергии f_c постоянна

$$\omega_o = \frac{2\pi f_c}{p_n} = \text{const},$$

$$W_1(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2 + \omega_0^2} \quad \text{и} \quad W_2(p) = \frac{\omega_0 p}{p^2 + \omega_0^2}.$$
$$h_1(t) = 1(t) \cdot (1 - \cos \omega_0 t) \quad \text{и} \quad h_2(t) = 1(t) \cdot \sin \omega_0 t.$$
$$U_{s\alpha} = U_m \cdot (1 - h_1(t)), \quad U_{s\beta} = U_m \cdot h_2(t).$$

The diagram illustrates a control system for a motor drive. The input signal (1) is processed by a PI controller block ($\frac{1}{T_{np}s}$) and a saturation block (limiting to -1 and 1). The output of the saturation block is compared with a reference ω_0 . The error signal is integrated ($\frac{1}{s}$) and then multiplied by a gain U_m . This result is then multiplied by $\cos(\omega_0 t)$ and $\sin(\omega_0 t)$ to produce the reference voltages $U_{s\alpha}$ and $U_{s\beta}$. There are also feedback paths from the outputs $U_{s\alpha}$ and $U_{s\beta}$ through multipliers and integrators back to the error signal calculation.

На рис. 4.20 представлена структурная схема идеального преобразователя частоты. Интегратор и блок ограничения определяют задатчик интенсивности с единичным выходным сигналом. Преобразователь частоты

построен с помощью двух интеграторов и двух блоков умножения. Первый интегратор формирует на выходе синусоидальный сигнал с единичной амплитудой и переменной частотой ω_o , а второй интегратор формирует сигнал вида $(1 - \cos \omega_o t)$. Как видно на схеме (см. рис. 4.20), на выходе сумматора получается косинусоидальный сигнал с единичной амплитудой и переменной частотой ω_o за счет введения дополнительного сумматора. Единичные косинусоидальный и синусоидальный сигналы умножаются на амплитудное значение выходного напряжения преобразователя частоты U_m , также являющееся величиной переменной. Обе переменные величины, и частота ω_o , и амплитуда U_m формируются с помощью общего задатчика интенсивности, благодаря чему на выходах второй пары умножителей получаются эквивалентные напряжения статора асинхронного двигателя U_{sa} и U_{sb} при реализации известного закона частотного управления:

$$\frac{U_m}{\omega_o} = \text{const.}$$

При необходимости динамическая модель идеального преобразователя частоты позволяет реализовать также любой другой закон частотного управления асинхронным двигателем. При создании модели асинхронного электропривода на основе преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией идеализация преобразователя частоты не вносит существенных погрешностей в вычисления, так как токи и потокосцепления в таких системах практически синусоидальны.

4.4. Перечень контрольных вопросов к главе 4

1. Какие силовые элементы выделяют в теории электропривода?
2. Какие управляющие элементы выделяют в теории электропривода?
3. Как выглядит структурная схема замкнутой системы управления автоматизированным электроприводом в общем виде?

4. Для чего используются регуляторы и какие типы регуляторов обычно используются в замкнутых системах управления автоматизированным электроприводом?
5. Как выглядит функциональная схема пропорционального регулятора?
6. Как реализуется интегральный регулятор?
7. Как реализуется ПИ-регулятор?
8. Как выглядит функциональная схема и как реализуется ПИД-регулятор?
9. Для чего используются датчики координат в замкнутых системах управления электроприводом?
10. Что такое задающие элементы, и какие функции они выполняют?
11. Какие задающие элементы используются в замкнутых системах управления электроприводом?
12. Каким образом можно построить функциональную схему задатчика интенсивности?
13. В чем особенность замкнутых систем управления электроприводом параллельного действия?
14. В чем особенность замкнутых систем управления электроприводом последовательного действия?
15. Какие элементы используются в качестве датчиков тока в замкнутых системах управления электроприводом?
16. Какие элементы используются в качестве датчиков скорости в замкнутых системах управления электроприводом?
17. Какие элементы используются в качестве датчиков положения в замкнутых системах управления электроприводом?
18. Назовите достоинства и недостатки замкнутых систем управления электроприводом параллельного и последовательного действия.
19. Как выглядит структурная схема идеального преобразователя частоты?
20. Что такое критическое и абсолютное скольжение асинхронного электродвигателя?

ГЛАВА 5. ЧАСТОТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Большинство современных электроприводов переменного тока для решения разного рода задач оснащаются преобразователем частоты (ПЧ). Несмотря на многообразие существующих на данный момент алгоритмов управления и вариантов аппаратной реализации преобразователей частоты существуют типовые решения, применяемые большинством производителей. Структура преобразователей частоты и выполняемые ими функции максимально унифицированы и стандартизированы.

Регулируемый электропривод решает две основные задачи: управление моментом и скоростью вращения электродвигателя.

Необходимость регулирования момента диктуется предъявляемыми к электроприводу техническими и технологическими требованиями. Для нормального функционирования привода необходимо ограничивать момент и ток двигателя допустимыми значениями в переходных процессах пуска, торможения и приложения нагрузки. Для механизмов, испытывающих при работе значительные перегрузки вплоть до стопорения рабочего органа, возникает необходимость непрерывного регулирования момента двигателя в целях ограничения динамических ударных нагрузок. Во многих случаях требуется также точное дозирование усилия на рабочем органе (электроприводы металлообрабатывающих станков, намоточные машины и др.).

Технологические режимы многих производственных механизмов на разных этапах работы требуют движения рабочего органа с различной скоростью, что обеспечивается либо механическим путем, либо путем электрического регулирования скорости электропривода. При этом требования к диапазону и точности регулирования скорости могут изменяться в широких диапазонах в зависимости от области применения электропривода.

5.1. Методы управления

Для решения задач регулирования скорости и момента в современном электроприводе применяют два основных метода частотного управления: скалярное и векторное управление.

Наиболее распространенным на сегодняшний день является асинхронный электропривод со скалярным управлением. Он применяется в составе приводов насосов, вентиляторов, компрессоров и других механизмов, для которых важно поддерживать либо скорость вращения вала двигателя (при этом используется датчик скорости), либо технологический параметр (например, давление в трубопроводе, при этом используется соответствующий датчик).

Основной принцип скалярного управления – изменение частоты и амплитуды питающего напряжения по закону

$$\frac{U}{fn} = \text{const},$$

где $n \geq 1$.

Конкретный вид зависимости определяется требованиями, предъявляемыми к электроприводу и нагрузкой. Как правило, за независимое воздействие принимается частота, а значение напряжения при данной частоте определяет вид механической характеристики, значения пускового и критического моментов. Скалярное управление обеспечивает постоянство перегрузочной способности электропривода независимо от частоты напряжения, однако имеет место снижение развиваемого двигателем момента при низких частотах (при $f < 0,1f_{\text{ном}}$). Максимальный диапазон регулирования скорости вращения ротора при неизменном моменте сопротивления для электроприводов со скалярным управлением достигает 1:10.

Метод скалярного управления относительно прост в реализации, но обладает двумя существенными недостатками. Во-первых, при отсутствии

датчика скорости на валу двигателя невозможно регулировать скорость вращения вала, так как нагрузка влияет на скорость вращения вала. Наличие датчика скорости решает эту проблему, однако, остается *второй существенный недостаток* – нельзя регулировать момент на валу двигателя. С одной стороны, и эту проблему можно решить установкой датчика крутящего момента, однако, такие датчики имеют очень высокую стоимость, так как предъявляются высокие требования к их чувствительности, и зачастую их применение превышает стоимость всего электропривода. Но даже при наличии датчика крутящего момента электропривод получается очень инерционным. Более того, при скалярном управлении нельзя регулировать одновременно и момент, и скорость (только один из параметров), поэтому приходится выбирать ту величину, которая является наиболее важной для данного технологического процесса.

Для устранения недостатков, присущих скалярному управлению, фирмой *SIEMENS* еще в 1971 году был предложен метод векторного управления. Первые варианты электроприводов с векторным управлением требовали использования двигателей со встроенными датчиками потока. Это существенно ограничивало применение таких электроприводов.

В современных электроприводах в систему управления закладывается математическая модель двигателя, позволяющая рассчитывать момент и скорость вращения вала электродвигателя.

При этом необходимыми являются только датчики тока фаз статора двигателя. Благодаря специальной структуре системы управления обеспечивается независимое и практически безынерционное регулирование двух основных параметров – момента на валу и скорости вращения.

На сегодняшний день сформировалось два основных класса систем векторного управления: бездатчиковые системы (без датчика скорости на валу двигателя) и системы с обратной связью по скорости. Применение того или иного метода векторного управления определяется областью при-

менения электропривода. При небольших диапазонах изменения скорости (не более 1:100) и требованиях к точности ее поддержания не более $\pm 0,5$ % применяют бездатчиковое векторное управление. Если же скорость вращения вала изменяется в широких пределах (до 1:10000 и более), имеются требования к высокой точности поддержания скорости вращения (до $\pm 0,02$ % при частотах вращения менее 1 Гц) или есть необходимость позиционирования вала, а также при необходимости регулирования момента на валу двигателя на очень низких частотах вращения, применяют методы векторного управления с обратной связью по скорости.

При использовании векторного управления достигаются следующие преимущества:

- высокая точность регулирования скорости даже при отсутствии датчика скорости;
- плавное вращение вала электродвигателя в области малых частот;
- возможность обеспечения номинального момента на валу при нулевой скорости (при наличии датчика скорости);
- быстрая реакция на изменение нагрузки: при резких скачках нагрузки практически не происходит скачков скорости;
- обеспечение такого режима работы двигателя, при котором снижаются потери на нагрев и намагничивание, а следовательно, повышается КПД двигателя.

Наряду с очевидными преимуществами, методу векторного управления присущи и некоторые недостатки, такие, как большая вычислительная сложность и необходимость знания параметров двигателя. Кроме того, при векторном управлении колебания скорости на постоянной нагрузке больше, чем при скалярном управлении. Следует отметить, что существуют области, в которых возможно использование только скалярного управления, например, в групповом электроприводе, где от одного преобразователя питаются несколько двигателей.

5.2. Построение силовой части

Наибольшее распространение получили преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока, построенные по схеме выпрямитель – автономный инвертор. Принцип работы и области применения таких преобразователей частоты зависят от типа используемого выпрямителя и автономного инвертора (инвертор напряжения или инвертор тока).

Существует несколько различных схем выпрямителей. По принципу действия они могут быть разделены на три группы: управляемые, полуправляемые и неуправляемые.

В основу построения схем выпрямителей промышленного назначения положено использование трехфазной мостовой схемы.

Наибольшее распространение получили неуправляемые выпрямители. Неуправляемые выпрямители строятся на базе простых полупроводниковых приборов (диоды) и характеризуются несложностью построения и надежностью, высоким кпд, а также достаточно высоким качеством выходного (выпрямленного) напряжения и гармонического состава тока, потребляемого из сети. К недостаткам такого рода выпрямителей можно отнести отсутствие управляемости процесса преобразования энергии, что, в свою очередь, не позволяет реализовать режимы рекуперации, необходимые во многих случаях.

Управляемые выпрямители, выполняемые обычно на базе низкочастотных тиристоров, лишены как недостатков, так и большинства достоинств диодных выпрямителей. Они обладают высоким кпд и свойством обратимости по направлению преобразования энергии и обычно используются совместно с автономными инверторами тока для регулирования величины выходного тока преобразователя. Недостатки управляемых выпрямителей заключаются в повышенном уровне пульсаций выпрямленного напряжения, в пониженном значении коэффициента мощности, который

уменьшается пропорционально выходному напряжению, и в одностороннем направлении выходного тока. При необходимости обеспечить протекание выпрямленного тока в обоих направлениях используют реверсивные тиристорные преобразователи, состоящие из двух включенных встречно-параллельно тиристорных выпрямителей, один из которых предназначен для протекания тока нагрузки в прямом, а другой в обратном (реверсном) направлении, что, в свою очередь, усложняет и удорожает преобразователь.

Полууправляемые выпрямители занимают промежуточное положение между управляемыми и неуправляемыми выпрямителями, позволяя регулировать значение выпрямленного напряжения без возможности рекуперации энергии в сеть. В случае управляемых и полууправляемых выпрямителей появляется возможность отключения силовой схемы преобразователей частоты от сети без использования дополнительного оборудования.

В зависимости от типа автономного инвертора контур постоянного тока может быть выполнен как звено, обеспечивающее постоянное напряжение (обычно C - или LC -фильтр), или как звено, поддерживающее постоянство тока (фильтр в виде реактора со значительной индуктивностью). Величина емкости конденсатора в звене постоянного тока обычно составляет 2000 – 20000 мкФ; такие конденсаторы имеют большие габариты и высокую стоимость.

Автономные инверторы тока (АИТ, рис. 5.1) питаются от источника тока (в цепь источника включается индуктивный элемент – дроссель). АИТ характеризуется значительным колебанием напряжения на входе при постоянном токе источника, а также зависимостью формы кривой напряжения на выходе и входе инвертора от характера нагрузки.

АИТ технически реализуются проще, чем автономные инверторы напряжения АИН, так как в них отсутствует возвратный диодный мост. В преобразователях частоты на основе АИТ при использовании управляемых

выпрямителей возможен рекуперативный режим, что важно для электроприводов, работающих в повторно-кратковременных режимах работы.

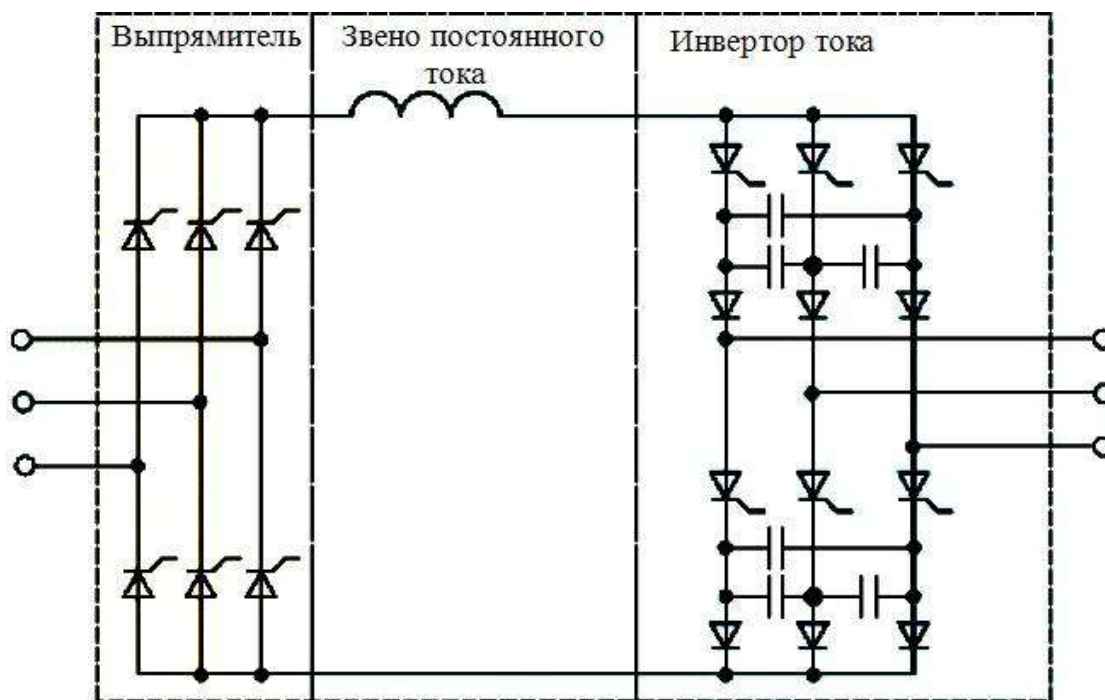


Рис. 5.1. Автономный инвертор тока

Характерным недостатком АИТ является то, что он не может работать на холостом ходу (с отключенным двигателем). Кроме того, при использовании АИТ возможны существенные потери мощности и формирование дополнительных возмущающих моментов в двигателе, приводящих к колебаниям скорости вращения вала электродвигателя. При необходимости формирования токов двигателя, близких к синусоидальным, требуется значительное усложнение схемы АИТ.

Особенностями автономных инверторов напряжения (рис. 5.2) являются питание от источника напряжения, замыкание контура реактивного тока нагрузки через обратные диоды и независимость формы кривой напряжения на выходе инвертора от характера нагрузки.

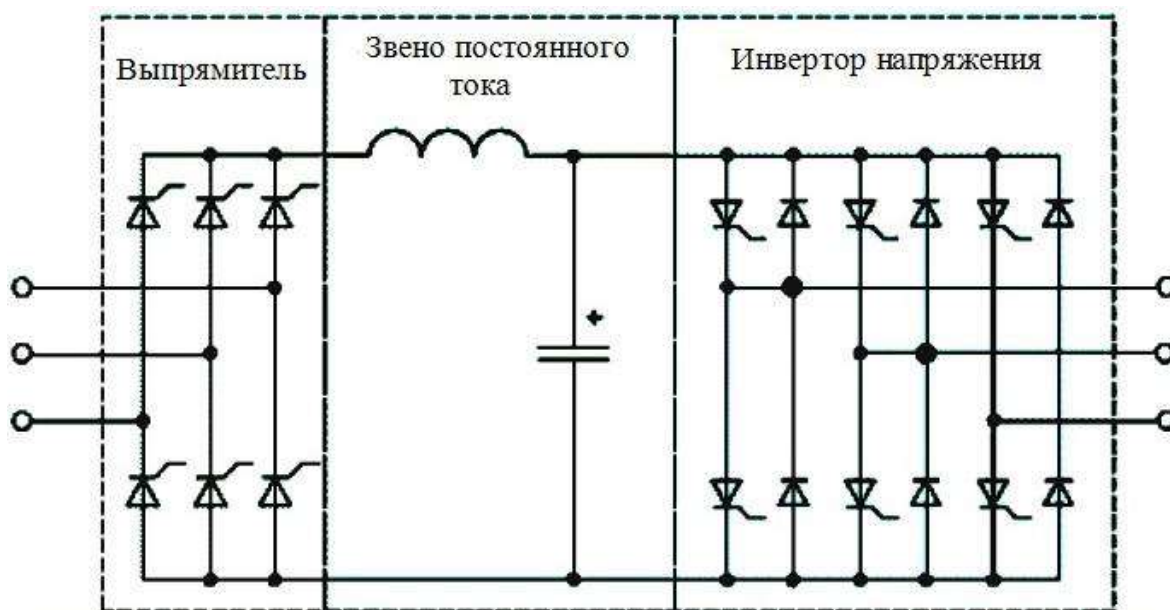


Рис. 5.2. Автономный инвертор напряжения

Недостатком АИН является необходимость использования реверсивных выпрямителей для организации рекуперативных режимов работы электропривода. Однако применение инверторов напряжения позволяет без усложнения схемы получить высокие энергетические показатели и обеспечить выходные токи, близкие к синусоидальным. Именно это обуславливает широкое применение АИН в современном электроприводе.

Для построения силовых ключей в области коммутируемых токов до 50 А используются биполярные транзисторы с изолированным затвором (*IGBT*) и полевые транзисторы с изолированным затвором (*MOSFET*), а также низкочастотные и высокочастотные диоды и тиристоры. Силовые биполярные транзисторы в диапазоне до 50 А находят основное применение в дешевом промышленном оборудовании. В области коммутируемых токов более 50 А основными используемыми приборами являются силовые модули на базе биполярных транзисторов, запираемые тиристоры (*GTO*, *GCT*, *IGCT*). Особо следует выделить транзисторные и диодно-транзисторные модули, выполненные по интегральной технологии на основе транзисторов типа *IGBT*. Низкие потери мощности в ключевых режи-

мах, большие значения рабочих напряжений и токов, малые времена включений и отключений этих модулей, а также возможность их использования при параллельной работе позволяют создавать мощные и компактные преобразовательные установки с высокой частотой коммутации полупроводниковых ключей.

5.3. Построение системы управления преобразователей частоты

Современные преобразователи частоты представляют собой многокомпонентную структуру, однако основным элементом систем управления (рис. 5.3) является специализированный микроконтроллер или цифровой сигнальный процессор (*DSP*). Специализированный микроконтроллер необходим для реализации современных алгоритмов управления и производства большого объема сложных вычислений в режиме реального времени. В наибольшей степени это критично для бездатчиковых систем векторного управления.

Система управления может быть одно- или многопроцессорной. Однопроцессорные системы обладают рядом существенных недостатков: к микроконтроллеру предъявляются повышенные требования по наличию встроенных периферийных модулей и портов ввода-вывода, по быстродействию и объему памяти; значительно усложняется разработка программного обеспечения. Однако при решении задач управления невысокой сложности достоинством однопроцессорных систем является простота аппаратной и программной реализации.

Достоинства двухпроцессорной системы по сравнению с однопроцессорной:

- снижение требований к ЦП1 и ЦП2 по встроенной периферии, быстродействию и объему памяти; возможность применения единого интерфейса для связи центрального контроллера с пультом;

- управления и с системой автоматизации верхнего уровня; значительное упрощение разработки;
- программного обеспечения для каждого из контроллеров.

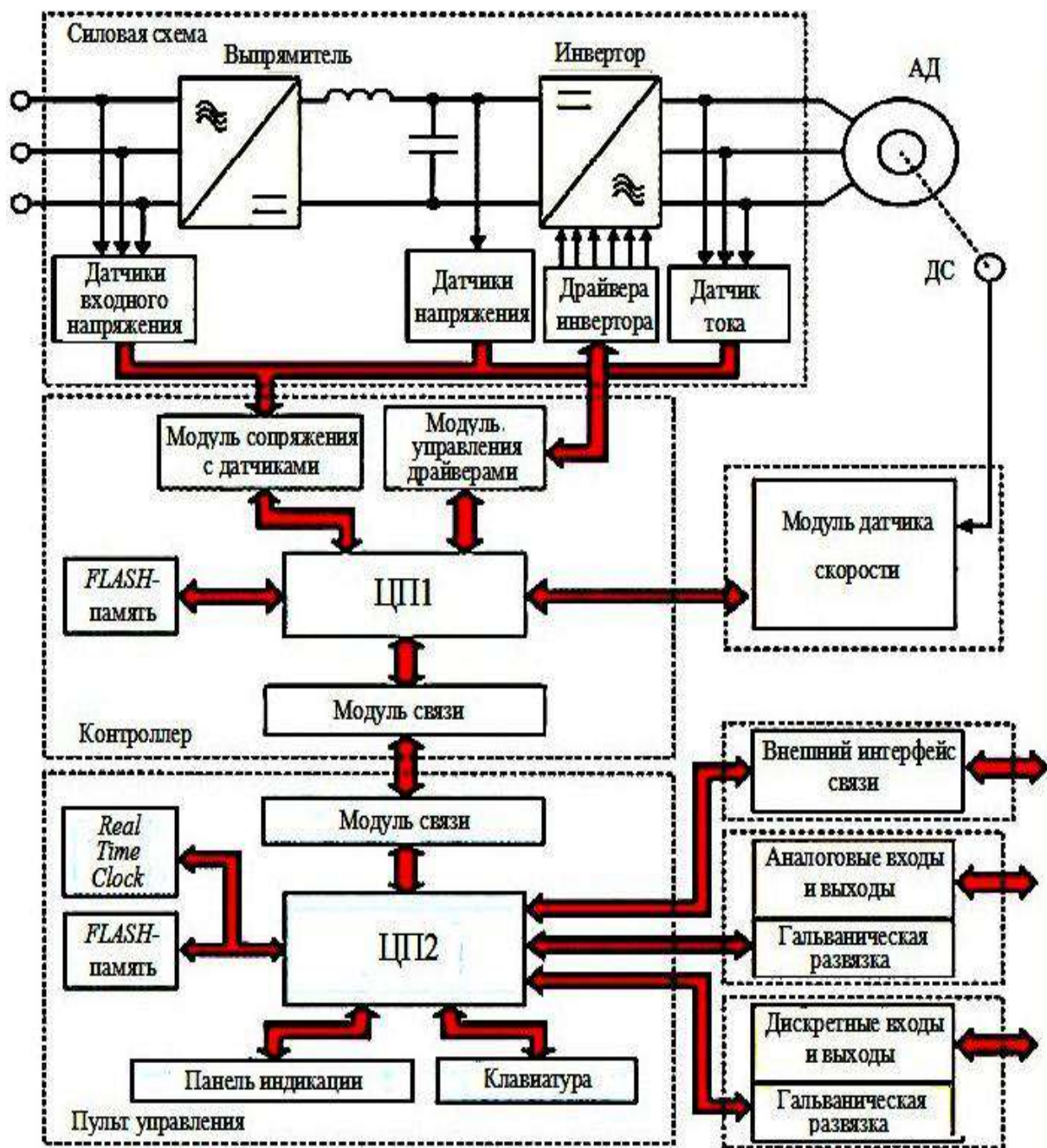


Рис. 5.3. Схема системы управления преобразователя частоты

Управление драйверами инвертора осуществляется посредством формирования шестиканального ШИМ-сигнала с автоматическим добавлением «мертвого времени». В большинстве микроконтроллеров модуль

ШИМ реализован аппаратно. Для получения формы выходного напряжения, близкой к синусоидальной (что особенно критично при скалярном управлении), может использоваться программная или аппаратная коррекция «мертвого времени». Также в большинстве случаев реализуется аппаратная блокировка сигналов ШИМ в случае аварии.

Управление преобразователем может осуществляться с помощью пульта (возможно, удаленного), дискретных или аналоговых входов.

Преобразователи конструктивно строятся по модульному принципу, позволяющему вводить в них дополнительные функциональные модули, которые в сочетании со встроенными программными средствами позволяют получить различную конфигурацию электропривода, отвечающего требованиям заказчика, – от простейших разомкнутых до точных замкнутых систем позиционирования. Как правило, такие модули (платы) расширения содержат в своем составе аналоговые и дискретные входы и выходы, а также интерфейсы связи (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Характеристики модулей расширения

Тип	Характеристика
Аналоговые выходы	Выход напряжения: 0...10 В, $I_{\text{вых.мах}} = 2 \text{ мА}$
	Выход тока: 4...20 мА, $R_{\text{нагр}} < 600 \text{ Ом}$
Аналоговые входы	Вход напряжения: $\pm 10 \text{ В}$ ($R_{\text{вх}} = 20 \text{ кОм}$)
	Вход тока: : 4...20 мА ($R_{\text{вх}} = 250 \text{ Ом}$)
	Вход задатчика частоты: $R = 4,7...10 \text{ кОм}$
Дискретные входы	Тип входов – «открытый коллектор», $U_{\text{вх.мах}} = 24 \text{ В}$, $I_{\text{мах}} = 8 \text{ мА}$
Дискретные выходы	«Релейные выходы»: 30 В, 3 А, постоянно- го тока или 250 В, 1 А, переменного тока
	Выходы «открытый коллектор»: 24 В, 50 мА
Сетевые интерфейсы	<i>RS-422 (RS-485), Modbus, Profibus, Interbus, CANOpen и DeviceNet</i>

Все аналоговые входы и выходы на платах расширения имеют встроенный источник питания и обычно выполняются гальванически развязанными от системы управления и дискретных входов и выходов. Функции, выполняемые аналоговыми входами и выходами, программируются с пульта управления. Наиболее часто аналоговые входы служат для подключения датчиков обратной связи по технологическим параметрам (для этих целей, как правило, предусматривается один вход напряжения и один вход тока).

В большинстве преобразователей частоты имеется также вход для подключения потенциометра, используемого в качестве задатчика выходной частоты (для преобразователей частоты со скалярным управлением) или частоты вращения ротора электродвигателя (для преобразователей частоты с векторным управлением), при этом для питания задатчика частоты используется встроенный источник питания (как правило, 10 В). Возможно также наличие дополнительного входа для подключения датчика температуры двигателя (терморезистора). Аналоговые выходы служат для индикации одного из параметров состояния преобразователя частоты (например, текущей выходной частоты или расчетного значения момента на валу двигателя). Возможность подключения к выходам как вольтметров, так и амперметров, достигается за счет наличия выхода напряжения и выхода тока. Выходные аналоговые сигналы формируются с помощью ЦАП (как правило, 10-битных); в отдельных случаях выходное напряжение формируется методом широтно-импульсной модуляции.

Дискретные входы и выходы на платах расширения используются для подключения внешних управляющих сигналов, поступающих с электромагнитных реле, а также для формирования сигналов управления такими реле.

Обычно в преобразователях частоты имеется от четырех до восьми дискретных входов типа «открытый коллектор», выполняющих следующие

щие функции: выбор одной из трех выходных частот (или скоростей вращения ротора), управление отключением и реверсом, аварийное отключение преобразователей частоты. Все дискретные входы выполняют гальванически развязанными от системы управления.

Дискретные выходы можно разделить на две категории: силовые («релейные») выходы для управления внешними электромагнитными реле и выходы типа «открытый коллектор» для работы с внешними логическими схемами. Платы расширения обычно содержат два релейных выхода, имеющих пару нормально замкнутых и пару нормально разомкнутых контактов, а также четыре выхода типа «открытый коллектор». Функции выходов можно запрограммировать с пульта управления; обычно это: готовность, перегрузка, авария, выход на заданную частоту. Все дискретные выходы гальванически развязаны от системы управления, при этом релейные выходы развязаны между собой, а выходы типа «открытый коллектор» имеют общий нулевой сигнал.

Для построения систем с обратной связью по скорости в преобразователях частоты предусматривают входы для подключения датчика угловой скорости. Модуль сопряжения с датчиком скорости может входить в стандартную поставку преобразователей частоты или выполняться в виде платы расширения. Для питания дискретных входов и датчика скорости используется, как правило, встроенный источник питания (обычно 24 В).

Преобразователи частоты легко встраиваются в современные системы автоматизированного управления. Широко используется управление в реальном времени несколькими преобразователями, для чего предлагаются решения с различными интерфейсами связи и топологиями сетей. Большинство преобразователей частоты комплектуется стандартным интерфейсом RS-422 или RS-485. При этом взаимодействие осуществляется с использованием протоколов *Modbus* или *Profibus* или их упрощенных модификаций. При использовании модулей расширения доступны дополни-

тельные интерфейсы (например, *CAN*) и протоколы (*Interbus*, *CANOpen*, *DeviceNet*).

Как правило, преобразователи частоты в своем составе имеет пульт управления, который может располагаться как на лицевой панели корпуса преобразователя, так и исполняться в выносном варианте. Пульт содержит несколько специализированных кнопок, информационное табло, в отдельных случаях может присутствовать цифровая клавиатура.

Вывод информации осуществляется посредством одно- или двухстрочного специализированного ЖКИ или нескольких семисегментных индикаторов, а также светодиодов, отображающих режимы работы. На этапе ввода преобразователей частоты в эксплуатацию пульт служит для конфигурирования преобразователя и настройки соответствующих параметров; во время работы – для наблюдения за параметрами рабочего режима. В процессе обслуживания на индикаторе отображается информация о возникших неисправностях, что обеспечивает возможность постоянного контроля состояния электропривода. Также возможно оперативное переключение отображения оперативной информации между различными выходными параметрами. Перед началом работы оператор должен внести всю необходимую информацию о параметрах электродвигателя в постоянную память преобразователя частоты. Пульт управления, как правило, выполняется съемным, что позволяет подключать его к преобразователям частоты только при необходимости и использовать один пульт для нескольких преобразователей.

Для хранения настроек системы, калибровочных параметров, журнала аварий и другой информации используется дополнительная энергонезависимая память. Часто она выполняется на основе микросхем *Flash*-памяти (как правило, с последовательным интерфейсом *I2C* или *SPI*). Кроме того, многие микроконтроллеры и *DSP* имеют возможность сохранения данных во внутренней энергонезависимой памяти.

Основная задача, решаемая программным обеспечением преобразователей частоты – реализация различных методов управления электродвигателем и методов формирования выходного напряжения (табл. 5.2).

Таблица 5.2

Методы управления электродвигателем

Метод	Характеристика
Формирования выходного напряжения	– синусоидальная ШИМ: – метод пространственной модуляции базовых векторов (<i>Space Vector Modulation</i>)
	Частота ШИМ настраиваемая, 8...16 кГц для мощностей от 0,75 до 30 кВт и 4...8 кГц для мощностей выше 37 кВт. Для снижения уровня акустического шума используется метод «мягкой» ШИМ.
Управления двигателем	Скалярное управление: – классическое скалярное управление по заданной характеристике U/f ; – скалярное управление с компенсацией падения напряжения на статоре (<i>IR</i> -компенсация); – скалярное управление с компенсацией скольжения.
	Векторное управление: – бездатчиковое векторное управление скоростью; – бездатчиковое векторное управление моментом; – векторное управление скоростью с датчиком обратной связи по скорости; – векторное управление моментом с датчиком обратной связи по скорости.
Торможения двигателем	– постоянным током; – динамическое торможение с использованием встроенного или внешнего тормозного резистора.

Управление входным выпрямителем (в случае использования управляемого или полупроводящего выпрямителя) – выдача импульсов управления на силовые ключи в соответствии с заданным углом открытия тиристор. При этом необходима синхронизация с питающей сетью, то есть

определение момента прохождения фаз входного напряжения через ноль и корректировка моментов открытия ключей выпрямителя.

Прием и обработка информации с датчиков. Данная информация используется для определения текущего состояния преобразователей частоты и электродвигателя, что необходимо для реализации требуемых законов управления, отслеживания аварийных ситуаций и т. д.

Взаимодействие с периферийными модулями контроллера (работа с *Flash*-памятью, часами реального времени и прочими устройствами, обеспечивающими дополнительные сервисные функции).

Взаимодействие с системой автоматизации верхнего уровня. Осуществляется по принципу «ведущий – ведомый» (*Master – Slave*), причем преобразователи частоты выступают в роли ведомого устройства. Программное обеспечение реализует требуемый протокол обмена, обеспечивает прием и выполнение команд управления, а также выдачу требуемой информации о текущем режиме работы, состоянии датчиков и параметрах преобразователей частоты. В случае двухпроцессорной системы обеспечивается возможность совместной работы основного контроллера и контроллера пульта управления.

Обработка внешних сигналов и выдача управляющих воздействий на внешнюю аппаратуру в случае управления преобразователем частоты осуществляется через дискретные или аналоговые входы.

Обеспечение интерфейса с пользователем. Следует отметить, что сложность реализации удобного интерфейса определяется набором средств управления и индикации, предусмотренных на пульте.

Диагностика аппаратуры и самодиагностика. Диагностика заключается в определении работоспособности различных модулей, входящих в состав преобразователей частоты (как силовых, так и управляющих), и подключенного электродвигателя. Кроме того, производится контроль целостности программы и данных, хранимых в энергонезависимой памяти.

Реализация защитных функций. Современные преобразователи частоты реализуют максимально-токовую защиту, защиту от перегрева двигателя и преобразователя, от перегрузки, чрезмерных отклонений напряжения питания, обрыва фазы, межфазного короткого замыкания, замыкания фазы на землю и ошибок связи. Корректный выход из состояния аварии возможен, только если ликвидированы причины ее возникновения. Для отдельных видов аварий (например, пропадание напряжения в сети, авария связи) система в состоянии самостоятельно отследить возможность продолжения работы. Восстановление после других аварий требует вмешательства обслуживающего персонала.

Сохранение информации о режимах, длительности работы, периодичности включения преобразователей частоты; подсчет показателей эффективности за определенный период; ведение журнала произошедших сбоев и аварий. Это позволяет проанализировать эффективность использования преобразователей частоты и облегчает поиск причин сбоев в работе оборудования.

Реализация дополнительных функций. Различные модификации преобразователей обладают набором таких возможностей, как задание программируемых фиксированных установок скорости; управление режимом торможения электропривода; управление несколькими электродвигателями; осуществление работы преобразователей частоты по расписанию.

К программируемым управляющим функциям, обеспечивающим возможность адаптации статических и динамических характеристик электропривода под условия нагрузки, относят:

- плавный пуск и остановку двигателя с выбором формы кривой изменения скорости (обычно используют линейную, S - и U -образную характеристики изменения скорости) и отдельной настройкой времени разгона и торможения с автоматической коррекцией ускорения и замедления в случае превышения допустимого момента;

- режим «подхвата» электродвигателя, используемый при включении преобразователей частоты на вращающийся двигатель (например, после кратковременного пропадания напряжения сети);
- пропуск частот, при которых работа электропривода нежелательна;
- компенсацию падения напряжения на активном сопротивлении статора (*IR*-компенсация), которая может быть заменена настройкой требуемого профиля кривой «напряжение – частота» для обеспечения работы с минимальным током потребления;
- поддержку высокого пускового момента на низких частотах за счет дополнительного увеличения напряжения;
- стабилизацию скорости вращения путем воздействия на частоту в функции нагрузки (компенсация скольжения);
- настройку реакции на скачок скорости или момента нагрузки с учетом инерционных свойств механизма;
- автоматическое определение параметров подключенного электродвигателя.

5.4. Перечень контрольных вопросов к главе 5

1. Что такое преобразователь частоты?
2. В чем особенность системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель (ПЧ – АД)?
3. В чем преимущества скалярного управления?
4. В чем преимущества векторного управления?
5. Какие существуют схемы построения силовой части системы ПЧ – АД?
6. Для чего используется и как работает автономный инвертор тока?
7. Для чего используется и как работает автономный инвертор напряжения?

8. Какие принципиальные отличия, достоинства и недостатки автономного инвертора тока и автономного инвертора напряжения?
9. Из каких основных элементов состоят системы управления преобразователями частоты?
10. В чем преимущества двухпроцессорной системы микропроцессорного управления преобразователем частоты?
11. По каким протоколам и интерфейсам осуществляется взаимодействие в системе ПЧ – АД?
12. Приведите структуру и принципиальные отличия неуправляемых и управляемых выпрямителей.
13. Назовите достоинства и недостатки неуправляемых, полууправляемых и управляемых выпрямителей.
14. Какие электронные компоненты и элементы используются для построения силовых ключей в автономных инверторах?
15. Приведите и опишите схему системы управления преобразователя частоты?
16. Назовите особенности построения дискретных входов и выходов преобразователей частоты?
17. Опишите, как происходит взаимодействие преобразователей частоты с системами автоматизации верхнего уровня?
18. Как происходит диагностика аппаратуры и самодиагностика, а также реализация защитных функций современных преобразователей частоты?
19. Что такое режим «подхвата» двигателя? В каких случаях данный режим используется и как реализуется на практике?
20. Какие основные программируемые управляющие функции существуют у преобразователей частоты?

ГЛАВА 6. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ТИПОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

6.1. Металлообрабатывающее оборудование

Многообразие типов металлообрабатывающих станков обусловлено конструктивно-технологическими особенностями обрабатываемых деталей, номенклатуру которых условно можно разделить на две группы: тела вращения (валы, диски, втулки) и корпусные детали. Для обработки тел вращения используют токарные центровые и патронно-центровые станки, а для корпусных деталей – станки сверлильно-фрезерно-расточной группы. Для обработки деталей сложной формы используют специализированные станки: токарно-затыловочные, зубообрабатывающие, резьбофрезерные. Станки для электрофизических и электрохимических методов обработки широко используют для изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов: твердых сплавов, высоколегированных сталей.

Многооперационный сверлильно-фрезерно-расточной станок с горизонтальным шпинделем (рис. 6.1) предназначен для высокопроизводительной обработки корпусных деталей, устанавливаемых на поворотном столе 2. Обработку деталей производят инструментом, закрепленным в шпинделе 3, подачей стойки 7 шпиндельной бабки 6 и стола 2 в направлении осей координатной системы XYZ . Стол и подвижная стойка находятся на станине 1 станка. Стол предназначен для установки и крепления обрабатываемых деталей. Он состоит из саней и встроенного поворотного делительного стола. Сани монтируются на станине стола, которая закрепляется на общей станине станка. Сани с поворотным столом могут перемещаться по направляющим станины стола в направлении оси X . Поворот на угол α_y осуществляется вокруг оси Y . Стойка перемещается по направляющим станины в направлении оси Z . Шпиндельная бабка расположена внутри стойки и по ее направляющим перемещается в направлении оси Y .

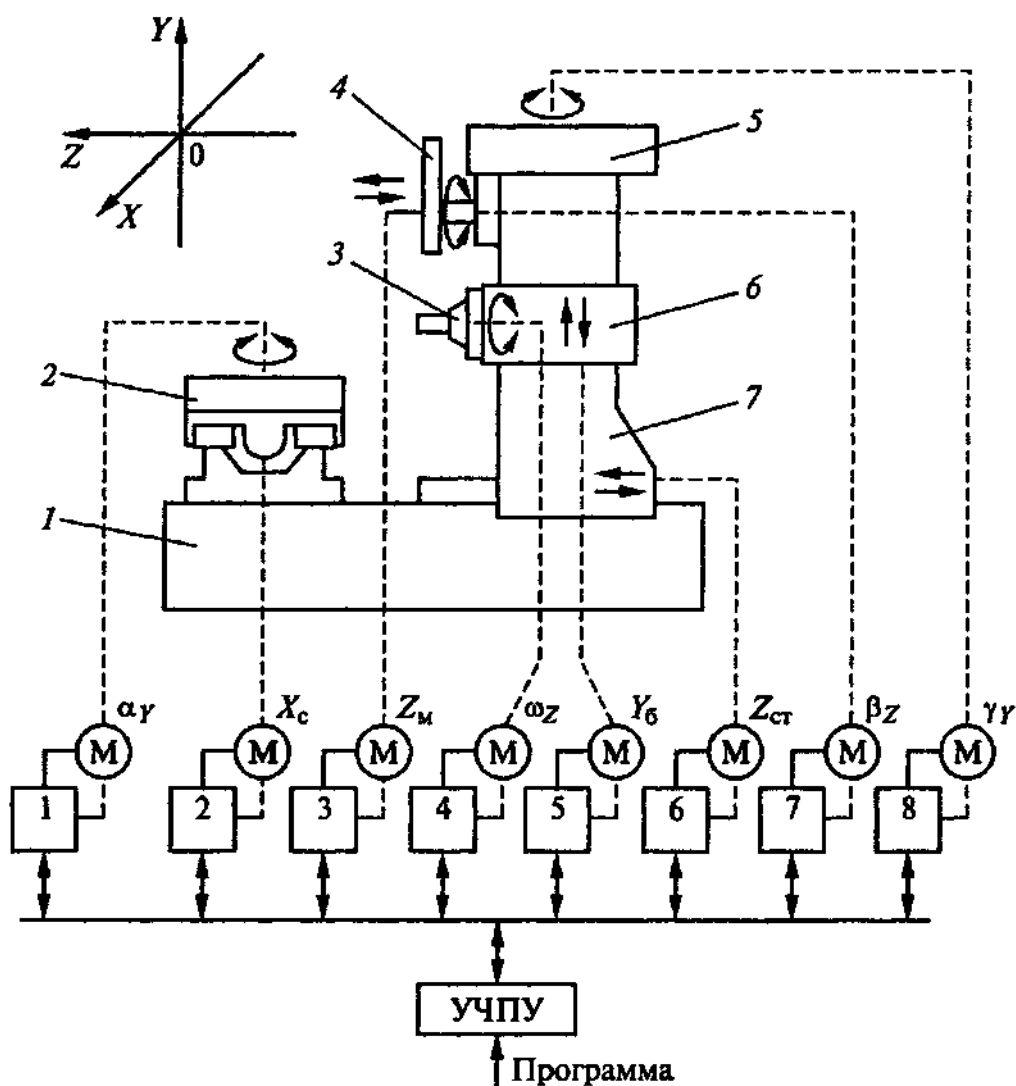


Рис. 6.1. Многооперационный сверлильно-фрезерно-расточной станок с горизонтальным шпинделем

Устройство для автоматической смены инструмента состоит из манипулятора 4 и инструментального магазина 5 и расположено вне рабочей зоны станка. Инструментальный магазин служит для хранения комплекта инструмента, используемого для обработки детали по управляющей программе и перемещения на угол γ_Y требуемого гнезда с инструментом в зону смены инструмента. Магазин выполняется в виде поворотного барабана с фиксированными гнездами и монтируется на верхнем торце стойки.

Инструментальный автооператор или манипулятор обеспечивает автоматический обмен инструментами между магазином и шпинделем станка.

Как правило такое устройство закрепляется на переднем торце стойки и состоит из корпуса, двухзахватной поворотной руки и механизма ее выдвижения в направлении оси Z и поворота на угол β_z .

Широкий диапазон частот вращения шпинделя ω_z скоростей подачи стола X_c , стойки $Z_{ст}$ и бабки Y_6 позволяет обрабатывать изделия выполненные из конструкционных сталей и сплавов. Современные станки оснащаются станочным транспортом, обеспечивающим автоматическую доставку заготовок и деталей для загрузки и выгрузки в рабочую зону станка.

Приводы. Основные и вспомогательные движения на станках выполняются от электро- и гидроприводов. Электроприводы наиболее распространены среди приводов основных движений. *Электропривод главного движения* имеет электродвигатель и многоступенчатую коробку скоростей обеспечивающую передачу движения исполнительному органу станка – шпинделю с закрепленной деталью или инструментом. Возможно отсутствие передающего устройства, когда двигатель соединяется непосредственно с исполнительным органом. В таких случаях могут использоваться управляемые электромагнитные муфты сцепления вала двигателя и исполнительного органа.

Распространенными приводами главного движения станков являются приводы от одно- и многоскоростных АД с короткозамкнутым ротором со ступенчатым регулированием скорости путем переключения шестерен коробки скоростей. Переключения производятся дистанционно различными устройствами, из которых наибольшее распространение получили устройства с фрикционными многодисковыми электромагнитными муфтами, встраиваемыми в коробку скоростей, а также с электрическими исполнительными двигателями и гидравлическими механизмами.

Использование электропривода переменного тока со ступенчатым регулированием скорости резания не может обеспечить высокую производительность и гибкость управления выходными параметрами станка. При-

менение коробки скоростей со сложной кинематикой снижает точность обработки на станке и увеличивает его стоимость, поэтому привод главного движения выполняется в виде регулируемого электропривода с простым редуктором или двухступенчатой коробкой скоростей и дистанционным переключением. Для электроприводов главного движения шлифовальных станков и заточных станков, где требуется высокая частота вращения (6000 мин^{-1} и более), применяются высокооборотные электроприводы переменного тока. Для этих станков используют специальные асинхронные двигатели с частотным управлением мощностью до 100 кВт, асинхронные высокоскоростные двигатели мощностью до 4 кВт и др.

Мощность, развиваемая при резании, определяется скоростью резания и усилием резания. Для приводов главного движения наиболее рациональным является способ регулирования скорости с постоянной мощностью, так как большим скоростям резания соответствуют меньшие усилия резания, а меньшим скоростям – большие усилия. В станках с числовым программным управлением (ЧПУ) функции, выполняемые электроприводом главного движения, значительно усложнены. Кроме стабилизации частоты вращения, требуется обеспечение режимов позиционирования шпинделя при автоматической смене, а также возможность нарезания резьбы метчиками и резцами. Это ведет к увеличению требуемого диапазона регулирования частоты вращения. Так, при требуемой точности позиционирования шпинделя 0,1 % и максимальной частоте вращения двигателя $3000...5000 \text{ мин}^{-1}$ суммарный диапазон изменения частоты вращения должен быть не менее 10 000:1.

При небольшой мощности главного привода применяют однозонное регулирование скорости с постоянным моментом. На скоростях ниже номинальных регулирование осуществляется с постоянным моментом. Таким образом получается двухзонное регулирование скорости.

Стабильность работы привода характеризуется изменением частоты вращения при изменении нагрузки, напряжения питающей сети, температуры окружающей среды и т. п. Погрешность регулирования определяется суммированием следующих отклонений: частоты вращения при изменении тока нагрузки на $0,4f_{\text{ном}}$ по сравнению со значением $0,6f_{\text{ном}}$ при номинальном напряжении питания и постоянной температуре окружающей среды (20 ± 5) °C; частоты вращения при изменении температуры окружающей среды от (20 ± 5) до 45 °C при питании номинальным напряжением при номинальной нагрузке; частоты вращения при изменении напряжения питания на ± 10 % от номинального напряжения при холостом ходе и постоянной температуре.

Погрешность частоты вращения при изменении направления вращения определяется при холостом ходе привода, номинальном напряжении питания и температуре окружающей среды (20 ± 5) °C:

$$\Delta_{\text{пер}} = \frac{2(n_{\text{п}} - n_{\text{л}})}{n_{\text{п}} + n_{\text{л}}} 100 \%,$$

где $n_{\text{п}}$, $n_{\text{л}}$ – частота вращения соответственно при правом и левом направлениях.

Системы стабилизации скорости резания. Такие системы необходимы для поддержания постоянного значения скорости резания в зависимости от изменения возмущающих факторов. Рассмотрим систему стабилизации скорости резания v_p на примере процесса точения (рис. 6.2). В шпинделе 1, вращающемся с частотой $\omega_{\text{ш}}$ установлена деталь 2, профиль которой изменяется перемещением резца 4, закрепленного в суппорте 3. С помощью заднего центра 5 обеспечивается жесткость установки детали большого размера. Привод шпинделя с электродвигателем М1 является приводом главного движения. Приводы с электродвигателями М2 и М3 являются приводами поперечной S_1 и продольной S_2 подач суппорта с инструментом.

Если готовая деталь имеет форму усеченного конуса с образующей L , меньшим и большим радиусами соответственно R_1 и R_2 , то при постоянстве частоты вращения шпинделя ($\omega_{ш} = \text{const}$) скорость резания будет переменной в процессе обработки. Выбрав расчетное значение скорости v_p при большем радиусе R_2 , имеем $\omega_{ш} = v_p / R_2 = \text{const}$.

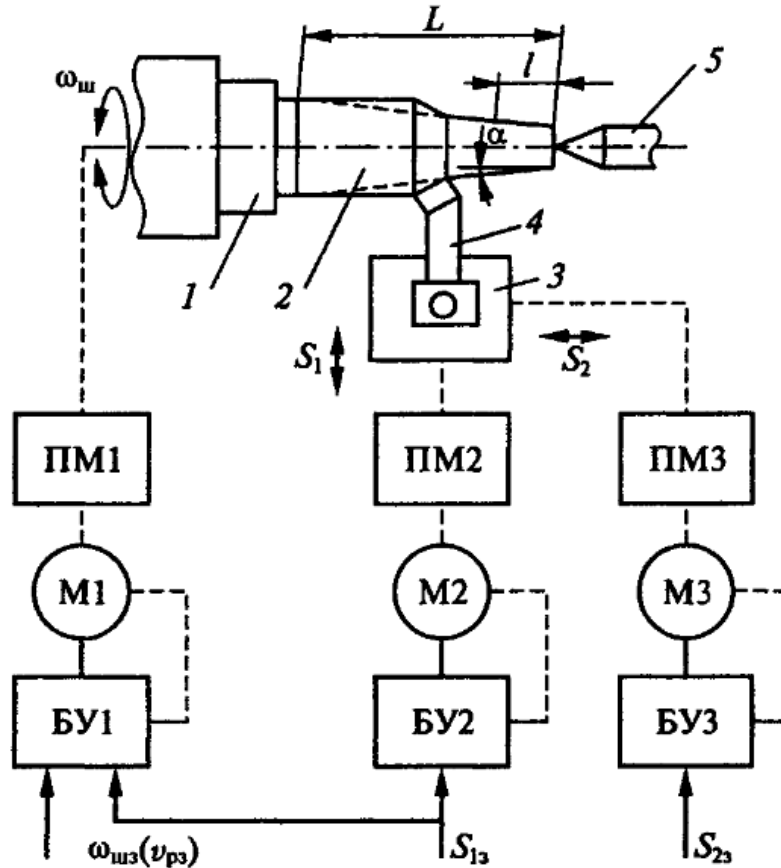


Рис. 6.2. Система стабилизации скорости резания на примере процесса точения

Тогда время обработки детали:

$$t_{об1} = \frac{2\pi L R_2}{v_p S_2},$$

где S_2 – подача резца вдоль образующей.

При постоянстве скорости резания $v_p = \text{const}$ время обработки

$$t_{об2} = \int_0^L \frac{2\pi r}{v_p S_2} dl,$$

где r – текущий радиус обработки.

Отличительной особенностью главного привода станков с ЧПУ является необходимость применения реверсивного привода с целью получения нужного качества переходных процессов даже в тех случаях, когда по технологии обработки реверс не требуется.

В *электроприводах подачи* наибольшее распространение получили передачи «винт – гайка» или «шестерня – рейка», для управления которыми применяются высокомоментные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов. Такие двигатели непосредственно связаны с ходовым винтом, что существенно сокращает механическую часть привода, снижает его момент инерции, повышает КПД и жесткость станочной системы. Для повышения производительности станков перемещение исполнительных органов в зону обработки осуществляется на быстрых ходах теми же электродвигателями подачи.

Системы стабилизации мощности и усилия резания. Управление мощностью P_p и усилием F_p резания осуществляется с помощью электроприводов шпинделя и подачи (ЭПШ и ЭПП) (рис. 6.3) при изменении глубины резания h и механических свойств обрабатываемого материала (твердости НВ).

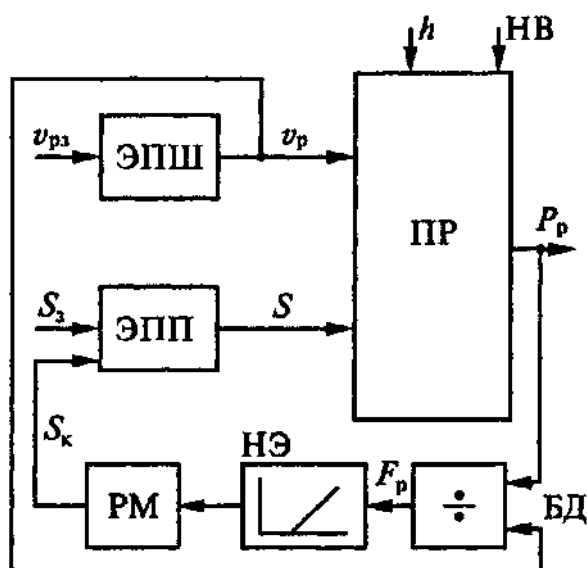


Рис. 6.3. Управление мощностью и усилием резания

Стабилизируя мощность резания, следует иметь в виду, что $P_p = F_p v_p$. Если осуществляется стабилизация скорости v_p , то выполнить условие $P_p = \text{const}$ можно соблюдением условия $F_p = \text{const}$. Таким образом, стабилизируя переменные v_p и F_p при изменении переменных h и НВ, можно считать, что стабилизируем и сам процесс резания (ПР).

Для тяжелых фрезерных станков автоматическое поддержание задаваемой мощности резания P_{pz} осуществляется путем изменения минутной подачи стола или бабки S_m , ограничивающей амплитуду вибраций станка A в допустимых пределах с помощью воздействий на подачу.

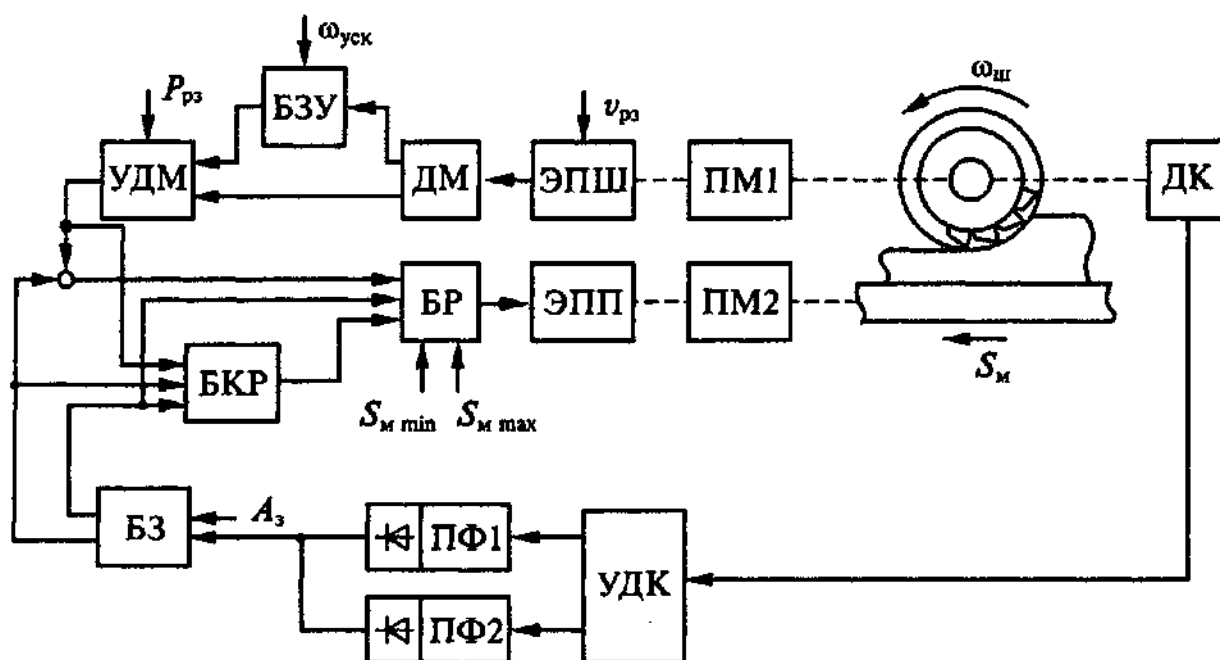


Рис. 6.4. Функциональная схема автоматического поддержания задаваемой мощности резания

На функциональной схеме системы (рис. 6.5) обозначены: ДМ, ДК – соответственно датчики мощности и колебаний; УДМ, УДК – соответственно усилители датчиков мощности и колебаний; БЗ, БЗУ, БКР, БР – блоки соответственно задания, запоминающих устройств, контроля режимов, регулирования; ПФ1, ПФ2 – полосовые фильтры; ЭПШ, ЭПП – электроприводы шпинделя и подачи.

Система стабилизации реализует алгоритм:

$$P_p = \text{const}, \omega_{III} = \text{const}, S_M = \text{var},$$

$$S_{\text{M min}} \leq S_{\text{M}} \leq S_{\text{M max}}, A \leq A_{\text{max}},$$

где $S_{\text{M min}}$, $S_{\text{M max}}$ – минимально и максимально допустимые минутные подачи;
 A_{max} – максимально допустимая амплитуда вибраций.

Система обеспечивает автоматическую компенсацию потерь холостого хода главного привода, прохождение на быстром ходу участков без резания и автоматическое форсирование снижения минутной подачи при врезании в деталь. Ограничение амплитуды вибраций станка выполняется в диапазоне резонансных частот от 10 до 100 Гц; диапазон изменения допустимой амплитуды вибраций 1:10. Стабилизирующая мощность задается от 0,1 до 1,2 номинального значения на пульте управления станком.

6.2. Транспортные и подъемно-транспортные устройства

Конвейеры. Конвейеры широко применяются в различных отраслях промышленности для перемещения сыпучих и штучных грузов. Наиболее часто в промышленности встречаются ленточные конвейеры (рис. 6.5), которые применяются на агломерационных фабриках, в доменных цехах металлургических заводов и тепловых станциях.

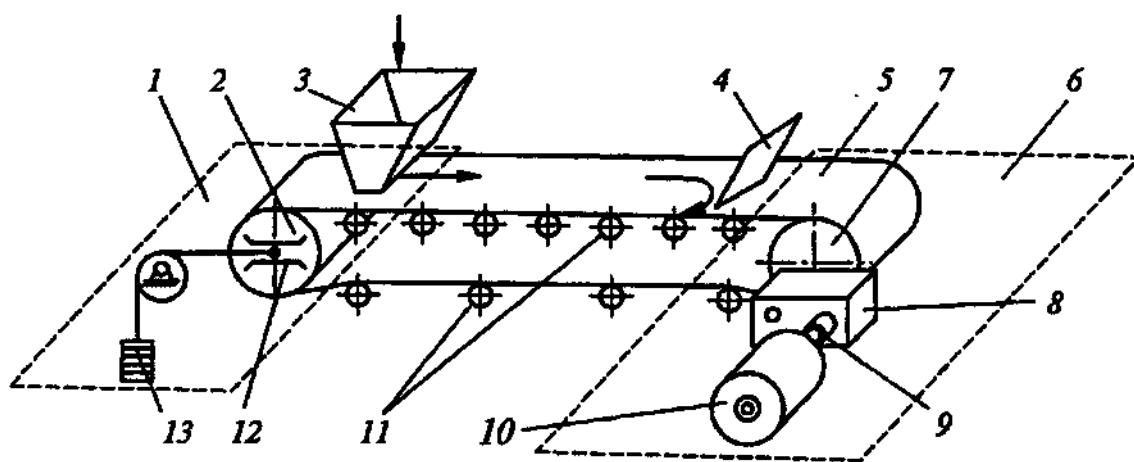


Рис. 6.5. Ленточный конвейер

Между барабанами 2 и 7 натяжной 1 и приводной 6 станции расположена гибкая лента 5. Барабан 2, ось которого может перемещаться в направляющих 12, под действием груза 13 создает предварительное натяжение ленты. Это натяжение обеспечивает передачу без проскальзывания тягового усилия от барабана приводной станции. Чтобы исключить провисание верхней рабочей и нижней холостой ветвей ленты, вдоль трассы устанавливают поддерживающие ролики 11. Барабан приводной станции через редуктор 8 соединен с двигателем 10. Для сглаживания возможных ударов в процессе пуска и торможения валы двигателя и редуктора соединяют упругой муфтой 9. Транспортируемый груз подается на ленту через загрузочную воронку 3 и выгружается плужком 4.

Длина ленточного конвейера может достигать 2... 3 км при скорости движения ленты 1,5...3 м/с и ширине ленты 2 м. Такой конвейер может обеспечивать производительность 700 т/ч. Ленточные конвейеры применяют для транспортирования груза в горизонтальной плоскости, а также для вертикальной транспортировки изделий под углом к горизонту. При перемещении с углом наклона более 20°, когда возможно осыпание груза, устанавливают ленточный скребковый конвейер.

Поточные линии машиностроительных и автомобильных заводов оборудованы подвесными конвейерами. Грузозахватывающие приспособления шарнирно присоединены к каткам, движущимся по монорельсу. Тяговое усилие каткам сообщается от двигателя цепью через звездочку приводной станции. Разновидность подвесного конвейера – канатную дорогу – используют как транспортное средство для пассажирских и грузовых перевозок. Роль монорельса в такой дороге выполняет канат, подвешенный на специальных опорах. Тяговое усилие от двигателя к грузонесущему приспособлению сообщается посредством дополнительного каната приводной и натяжной станций канатной дороги.

Часто производственный процесс обслуживает несколько конвейеров, объединенных общим технологическим циклом в единую поточно-транспортную систему (ПТС), например процесс смесеобразования в металлургическом производстве (рис. 6.6).

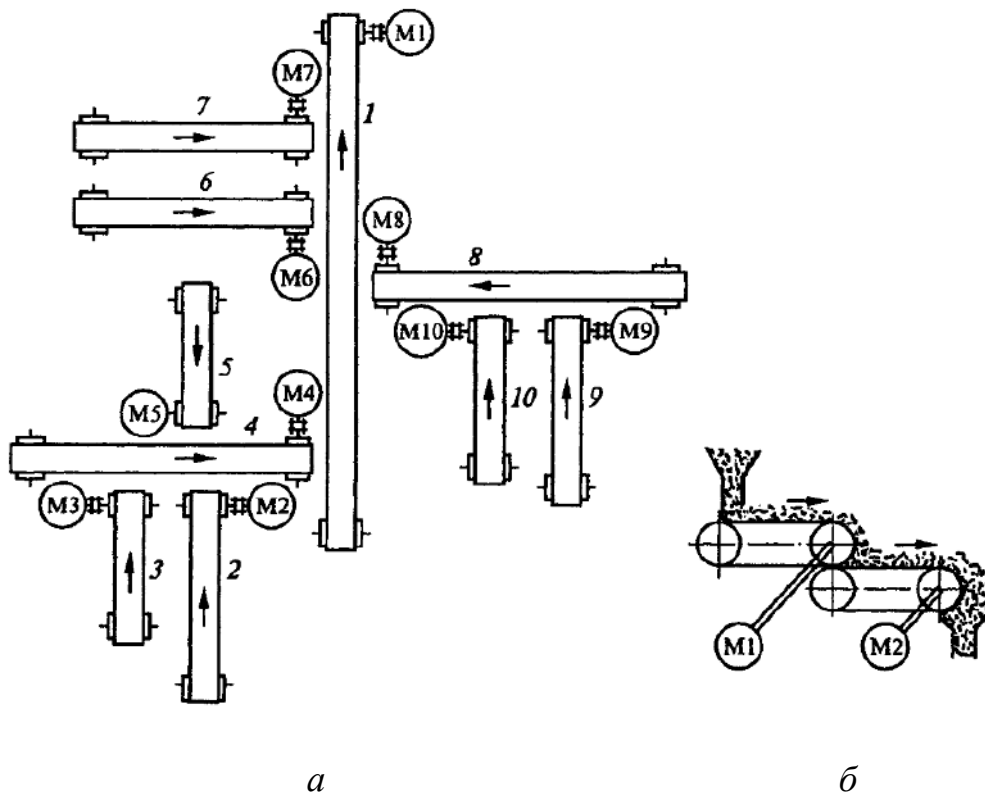


Рис. 6.6. Поточно-транспортная система

В ПТС конвейеры могут образовывать несколько параллельных (конвейеры 2 и 3, 6 и 7, 9 и 10) или последовательных (5, 4 и 1, 8) цепей. При этом движение тянущих органов конвейеров должно быть строго согласованным, в противном случае может возникнуть нарушение технологического процесса, что приведет к снижению качества выпускаемой продукции. Чтобы избежать этого, при пуске ПТС или ее остановке включение двигателей конвейеров должно производиться в определенной последовательности. Так, в схеме, представленной на рис. 6.6, а, первым должен включаться двигатель М1, а затем М4, М8, М2, М3, М5, М9, М10, М6, М7.

Остановка ПТС без образования завала и сохранения постоянного содержания компонентов обеспечивается, если двигатели будут отключаться в последовательности М3, М5, М2, М4, М9, М10, М8, М6, М7 и М1. На трассах большой протяженности используются ПТС с последовательно расположенными конвейерами (рис. 6.6, б).

Статические и динамические нагрузки приводов конвейера. Основной фактор, определяющий статическую нагрузку конвейера, – сила трения, действующая между тянущим элементом (лента, цепь и др.) и поддерживающим устройством (ролики, монорельс, канат и др.). Силы трения возникают в подшипниках вращающихся элементов, местах контакта роликов и катков с опорой, тяговом элементе при его изгибах. Вследствие значительной протяженности конвейера и большого количества движущихся элементов эти силы составляют значительную часть суммарной статической нагрузки, а для горизонтальных конвейеров определяют всю статическую нагрузку привода. Статическая нагрузка конвейера в значительной степени зависит от конструкции и массы тягового органа (масса определяется передаваемым усилием). Поэтому мощность двигателя в процессе проектирования конвейера выбирают с учетом статической нагрузки конвейера. Силы сопротивления движению конвейера можно разделить на две категории: силы, не зависящие от натяжения тягового элемента, и силы, зависящие от этого натяжения. Первые возникают на прямолинейных горизонтальных и наклонных участках и распределены по участку равномерно. Вторые возникают на участках изгиба тягового элемента и сосредоточены на дуге этого участка. В соответствии с рис. 6.7 сила сопротивления движению на прямолинейном участке:

$$\Delta F_{\pi} = C_{\pi} q l \cos \beta + q l \sin \beta = q l (C_{\pi} \cos \beta + \sin \beta),$$

где q – весовая нагрузка на 1 м пути; l – длина участка; $C_{\pi} = k_n(\mu d/D + 2f/D)$ – результирующий коэффициент сопротивления движению на пря-

молинейном участке ($k_n = 1,1 \dots 1,3$; μ – коэффициент трения в подшипниках; f – коэффициент трения качения роликов и катков); D – диаметр ролика.

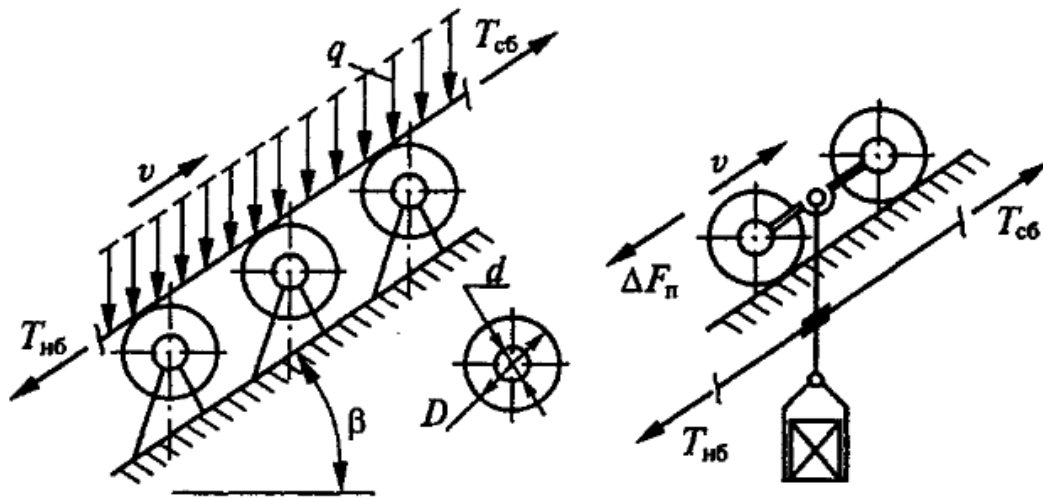


Рис. 6.7. Нагрузки приводов конвейера

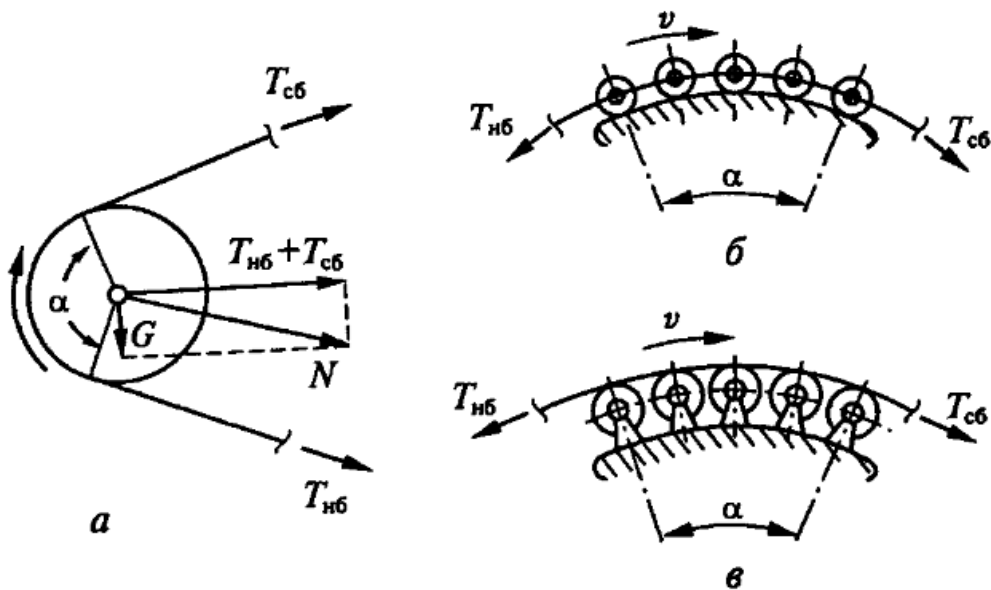


Рис. 6.8. Нагрузки приводов конвейера

На участках изгиба (рис. 6.8) сила сопротивления движению $\Delta F_{\text{из}}$ состоит из двух слагаемых: силы от изгиба тягового элемента, пропорциональной натяжению в набегающей точке участка $T_{\text{нб}}$, и силы трения в подшипниках блоков или роликов, пропорциональной равнодействующей силе N на участке.

Таким образом, сила сопротивления движению:

$$\Delta F_{\text{и}} = \xi T_{\text{нб}} + N\mu \frac{d}{D},$$

где ξ – коэффициент сопротивления от изгиба тягового элемента;
 d – внутренний диаметр ролика.

При определении равнодействующей N можно пренебречь весом блока G и принять, что натяжения в набегающей $T_{\text{нб}}$ и сбегающей $T_{\text{сб}}$ точках участка равны. Тогда имеем выражение:

$$\Delta F_{\text{и}} \approx C_{\text{и}} T_{\text{нб}},$$

$$C_{\text{и}} = \xi + 2\mu \frac{d}{D} \sin \frac{\alpha}{2}.$$

где $C_{\text{и}}$ – результирующий коэффициент сопротивления на участке изгиба.

В общем случае конвейер может состоять из большого числа участков (рис. 6.10).

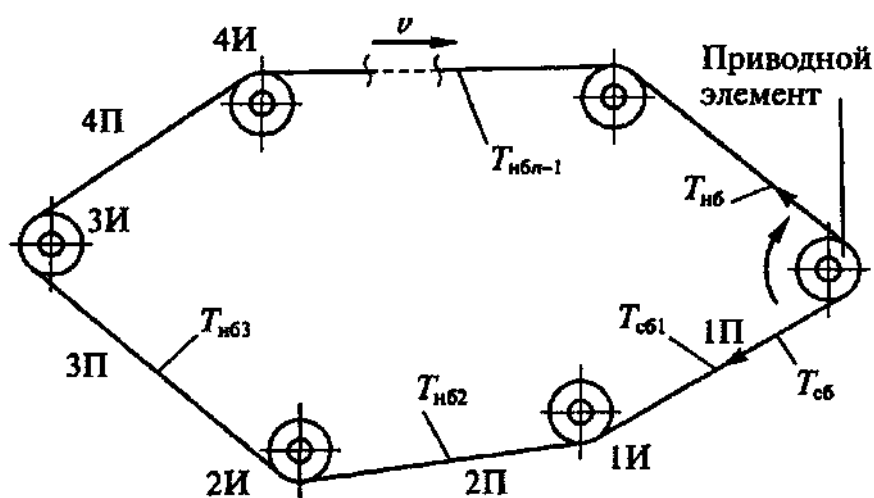


Рис. 6.9. Схема конвейера

Поскольку прямолинейные участки П отделяются друг от друга участками изгиба И, то во всей замкнутой конвейерной линии имеется одинаковое число n участков П и И. Тогда результирующая сила сопротивления движению определится как сумма сил всех участков:

$$F_{\text{ст}} = \sum_{i=1}^n \Delta F_{\text{пи}} + \sum_{i=1}^n \Delta F_{\text{ии}} = \sum_{i=1}^n q_i l_i (C_{\text{п}} \cos \beta_i + \sin \beta_i) + \sum_{i=1}^n C_{\text{ии}} T_i.$$

Динамические нагрузки привода конвейера возникают в процессе пуска и определяются движущимися массами собственно конвейера и его приводной станции:

$$F_{\text{дин}} = \sum_{i=t}^n m_i a_{\text{п}} + (J_{\text{дв}} i_{\text{р}}^2 + J_{\text{п}}) \frac{a_{\text{п}}}{R_{\text{п}}^2},$$

где $F_{\text{ин}}$ – динамическая сила на обводе приводного элемента радиусом $R_{\text{п}}$; m_i – масса движущихся элементов одного прямолинейного участка в совокупности с массой движущихся элементов предшествующего участка изгиба; $J_{\text{дв}}$, $J_{\text{п}}$ – моменты инерции двигателя и приводного элемента; $i_{\text{р}}$ – передаточное число редуктора приводной станции; $a_{\text{п}}$ – ускорение конвейера при пуске.

Определение мощности электроприводов конвейеров. Мощность электропривода конвейера определяется в соответствии с расчетной статической нагрузкой $F_{\text{ст}}$ и заданной скоростью движения конвейера V .

$$P_{\text{с}} = k_3 \frac{F_{\text{ст}} V}{\eta_{\text{р}}} = k_3 \frac{(T_{\text{нб}} - T_{\text{сб}}) V}{\eta_{\text{р}}},$$

где $\eta_{\text{р}}$ – КПД редуктора приводной станции; $k_3 = 1,1 \dots 1,3$ – коэффициент запаса, учитывающий неточности расчета силы сопротивления.

Момент сопротивления на валу двигателей приводной станции при известном передаточном числе редуктора $i_{\text{р}}$

$$M_{\text{ст}} = k_3 \frac{F_{\text{ст}} D}{2 i_{\text{р}} \eta_{\text{р}}},$$

где D – диаметр приводного элемента.

Номинальная мощность двигателей выбирается из условия

$$P_{\text{ном}} \geq P_{\text{с}}.$$

Силы трения покоя существенно больше, чем силы трения при движении конвейера, поэтому для конвейерных транспортных устройств характерны повышенные моменты трогания. Это учитывают, выбирая приводной двигатель с повышенным пусковым моментом, обеспечивающим надежный пуск конвейера при возможном снижении напряжения питающей сети.

При организации конвейерной трассы со сложной конфигурацией определить заранее однозначно оптимальное месторасположение привода не удастся. В связи с этим на практике рассматривают несколько вариантов расположения приводной станции. При выборе привода исходят из следующих условий. Привод должен устанавливаться в конце рабочего участка, что позволяет разгрузить последующую холостую ветвь конвейера от больших натяжений рабочего участка. Если в конвейере имеется несколько рабочих участков, то для рассмотрения выбирают наиболее тяжелый, на котором происходит максимальное нарастание натяжения, а также участок, предшествующий самой длинной холостой ветви. Располагая привод в конце самого тяжелого участка, можно существенно уменьшить максимальные натяжения на последующих рабочих участках. Размещение привода перед самой длинной холостой ветвью позволяет снизить среднее по трассе натяжение. Для конвейеров, работающих на спуск грузов при тормозном режиме работы привода, последний устанавливается в начале рабочего участка по ходу тягового элемента.

Для конвейерных линий значительной протяженности и с большим числом тяжелых рабочих участков может оказаться, что даже оптимальное расположение приводной станции на трассе не обеспечивает снижения максимального натяжения до допустимого уровня. В таком случае конвейер односекционного исполнения заменяют многосекционным конвейером или на тяговом элементе устанавливают несколько приводных станций.

6.3. Буровая техника

К главным механизмам буровых станков относятся буровые насосы, ротор и буровая лебедка. У буровой лебедки можно выделить систему, обеспечивающую привод лебедки при подъеме колонны бурильных труб из скважины, и систему, обеспечивающую торможение при спуске колонны, которые можно рассматривать как самостоятельные системы.

Для питания электроприводов станков используются следующие источники электроэнергии: высоковольтная электрическая линия для электрических буровых установок и автономная электростанция для установок, предназначенных для неэлектрифицированных районов. Электродвигатели для каждой конкретной установки должны быть рассчитаны на одинаковое напряжение. Главные электроприводы работают не одновременно, в основных рабочих режимах действуют буровые насосы и ротор (режим бурения) или буровая лебедка в режиме спускоподъемных операций (СПО), причем потребляемая электроприводами мощность в большой степени зависит от текущей глубины бурения. С учетом этого мощность главных электроприводов сбалансирована так, чтобы максимальная потребляемая мощность в режимах бурения и СПО была одного порядка и не превышала мощность источника энергии.

Функциональная схема электропривода показана на рис. 6.10. Буровой станок состоит из машинного отделения 4, смонтированного на гусеничном ходу 5, кабины 7 и мачты 1, закрепленной на машинном отделении посредством специальных опор 3. Для подъема мачты в рабочее положение и опускания в транспортное положение служат два гидравлических цилиндра 2. Приведение станка в горизонтальное положение осуществляется с помощью трех гидравлических домкратов 6. Для приведения в действие всех механизмов в процессе выполнения технологических операций на станке имеются системы электрического и гидравлического приводов.

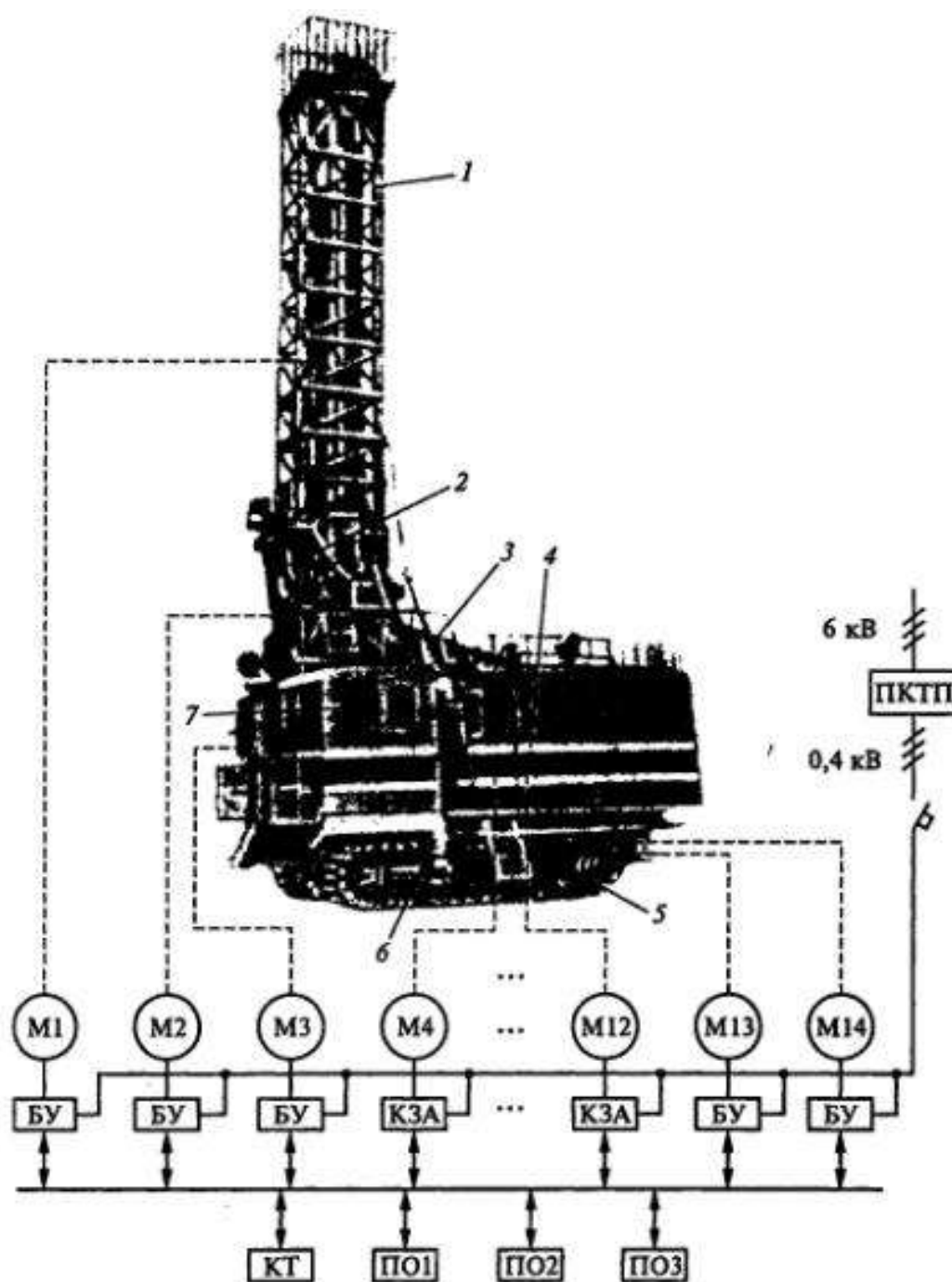


Рис. 6.10. Функциональная схема управления

Мощность электроприводов станка составляет 400 кВт, в том числе: привода ротора – 100 кВт, привода лебедки – 80 кВт, приводов водяного центробежного насоса – 17 кВт, приводов винтовых компрессоров – 20 кВт. Остальная мощность расходуется в основном электроприводами маслонасосов, гидравлических насосов, вентиляторов и электромагнитов.

Для выноса из забоя на поверхность частиц разбуренной породы (буровой мелочи) в станке, кроме насосов, используются винтовые компрессоры для создания воздушно-водяной системы. Основными являются электроприводы ротора М1, лебедки М2, М3, насоса М4, компрессора М5, М6.

Гусеничный ход станка обеспечивается электроприводами М13, М14. Электроприводы М1...М3, М13, М14 являются регулируемыми, управление ими осуществляется от блоков БУ. Остальные электроприводы – нерегулируемые. Питание их осуществляется через коммутационно-защитную аппаратуру КЗА. Электроприводы маслонасосов гидравлических систем станка, а также вентиляторов охлаждения двигателей и проветривания помещений (М7... М12) относятся к вспомогательными электроприводами станка.

Подвод электроэнергии осуществляется от передвижной комплектной трансформаторной подстанции ПКТП 6/0,4 кВ, подключаемой к ЛЭП-6 кВ воздушным или кабельным вводом независимо от других потребителей. Как правило, от одной подстанции питается один станок. Непосредственно к станку напряжение подводится гибким шланговым кабелем.

Питание электроприводов основных и вспомогательных механизмов станка и управление ими осуществляются посредством пускорегулирующей аппаратуры, расположенной на пультах и в шкафах управления. В последних находится и аппаратура защиты.

На станке имеются три пульта (пульта оператора ПО1, ПО2, ПО3 – рис. 6.10): управления процессом бурения, управления компрессором и выносной пульт управления ходом. Основной пульт, с помощью которого оператор (машинист) осуществляет управление процессом бурения и контроль за ходом этого процесса, находится в кабине машиниста. На пульте расположены: кнопки управления двигателями водяных насосов, ротора и лебедки; универсальные переключатели управления схемой гидропривода; выключатели управления подогревом воды, воздуха и масла; кнопка дис-

танционного отключения вводного автомата; устройства отображения данных о напряжении питающей сети и на двигателях, а также о токах двигателей, давлении масла, воды и воздуха в системах, осевом давлении на забой.

В кабине расположен также пульт управления винтовым компрессором, в комплект которого входят: кнопки управления двигателями компрессора, вентилятора, насоса перекачки масла, а также подогревом масла в маслобаке; приборы, показывающие температуру и давление масла и воздуха в компрессоре; тумблер подачи напряжения на пульт; тумблер включения защиты компрессора от перегрева и резкого изменения давления; кнопка снятия сигнала при срабатывании защиты, а также сигнальная арматура. Шкафы управления расположены в машинном отделении станка и предназначены для размещения вторичной (исполнительной) аппаратуры управления.

Привод лебедки (рис. 6.11, а) осуществляется от электродвигателя 2 и обеспечивает вращение барабанов 3 лебедки с нужной скоростью.

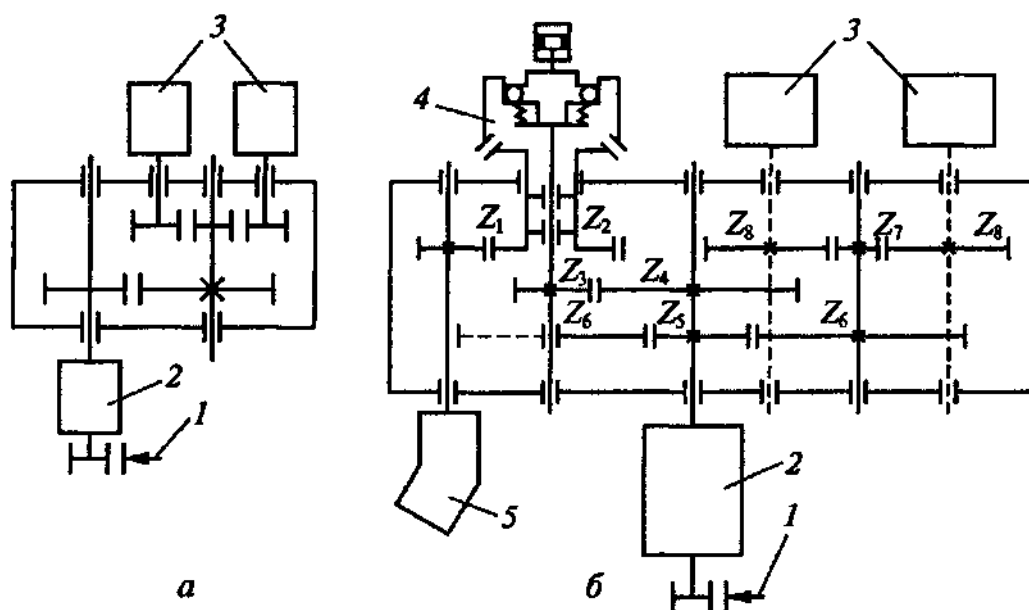


Рис. 6.11. Приводы лебедки

Применяется и комбинированный привод (рис. 6.11, б) от электродвигателя 2 и гидродвигателя 5. Гидродвигатель, развивающий большое

тяговое усилие при малой скорости подачи, включают при бурении или извлечении прихваченного в скважине бурового инструмента. Электродвигатель включают при производстве спускоподъемных операций, выполняемых на большой скорости. Гидропривод также осуществляет спускоподъемные операции, если необходимо получить малую скорость передвижения головки бурового снаряда, например, при посадке штанги на долото перед свинчиванием их между собой.

Одновременное включение электро- и гидроприводов предотвращается специальной блокировкой в схеме управления приводами. Во избежание разрыва корпусов гидродвигателей при работе электропривода в кинематической цепи лебедки предусмотрена фрикционная коническая муфта 4, управляемая с помощью гидроцилиндра. При включении электродвигателя эта муфта разомкнута и вращение на гидродвигатель не передается. Одновременно с включением гидропривода рабочая жидкость подается в цилиндр муфты, последняя включается, и вращение от гидродвигателя 5 передается на барабаны 3 лебедки подачи. Лебедки подъема оборудованы колодочным тормозом 1 с гидравлическим управлением.

6.4. Системы вентиляции и кондиционирования производственных помещений

Современные административно-производственные здания отличаются большим разнообразием помещений по видам вредных выделений и требованиям к внутреннему микроклимату. Переменный в течение суток или других временных промежутков режим работы здания определяет неравномерную нагрузку на систему вентиляции и кондиционирования воздуха (СВКВ). В часы повышенных нагрузок СВКВ должна обеспечивать необходимый воздухообмен, при пониженных нагрузках, т. е. система должна переводиться в энергосберегающий режим.

Приведем основные функции системы управления СВКВ:

1. Регулирование температуры и влажности воздуха, поступающего в систему воздуховодов приточной вентиляции; поддержание параметров воздуха в пределах санитарных норм и специальных требований в помещениях благодаря управлению кондиционерами-доводчиками.

2. Перевод систем приточной и вытяжной вентиляции в энергосберегающие режимы работы в часы пониженных нагрузок, в частности, автоматическое закрытие задвижек на воздуховодах, обслуживающих помещение при его переходе в нерабочее состояние и соответствующее снижение мощности вентиляторных установок приточной и вытяжной вентиляции, а также отработка заданных алгоритмов включения и выключения местных вентиляционно-кондиционирующих установок.

3. Перевод систем в аварийные режимы функционирования в определенных ситуациях, в частности, выключение агрегатов общеобменной приточной и вытяжной вентиляции и запуск аварийной вентиляции для удаления дыма при пожаре (осуществляется при срабатывании пожарной сигнализации).

4. Индикация технологических параметров отдельных узлов СВКВ на локальных пультах управления с возможностью настройки этих узлов и связь с уровнем диспетчерского управления; извещение оператора при отказе отдельных устройств и агрегатов (например, на двигатель вентилятора подан сигнал включения, но двигатель не работает), а также при возникновении предаварийных ситуаций (например, на фильтре слишком велик перепад давлений, что свидетельствует о его засорении).

5. Извещение оператора в случае, если какие-либо узлы СВКВ находятся в рабочем состоянии, хотя по регламенту им надлежит быть выключенными.

На рис. 6.12 показана функциональная схема СУ приточной вентиляционной установки. Атмосферный воздух закачивается в систему венти-

лятором (возможно несколькими) при открытой входной заслонке 1, управляемой электродвигателем 2. Фильтр 3 обеспечивает очистку воздуха от пыли и взвешенных частиц. Повышение перепада давления на фильтре, измеряемого датчиком 4, выше допустимой нормы отражается сигнализацией на локальном пульте управления и ПК оператора. В камере орошения 5 воздух контактирует с каплями воды, подаваемой под давлением, создаваемым насосом 6, к форсункам распределительных коллекторов. В зависимости от температуры разбрызгиваемой воды осуществляется фазовый переход воды в пар или из пара в воду, в результате чего воздух соответственно увлажняется или осушается. Целевая влажность воздуха измеряется датчиком 7 и регулируется путем изменения расхода теплоносителя в теплообменном аппарате 8 регулирующим клапаном 9. Разбрызгиваемая в камере орошения вода накапливается в баке 10, уровень в котором измеряется датчиком 11.

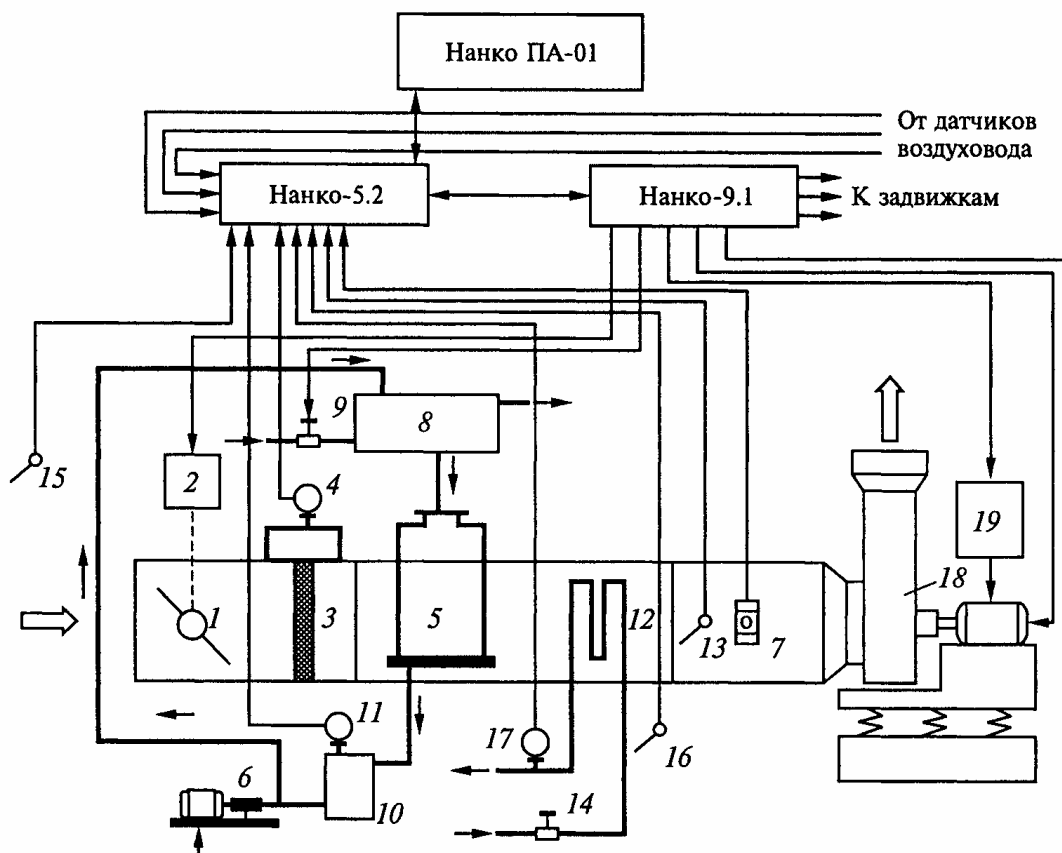


Рис. 6.12. Функциональная схема СУ приточной вентиляционной установки

При достижении водой в баке уровня нижнего или верхнего допустимого предела контроллер выдает управляющие сигналы насосу на подкачку недостающего или откачку избыточного объема воды. Обработанный в камере орошения воздух поступает в калорифер 12. Его целевая температура измеряется датчиком 13 и регулируется путем изменения расхода теплоносителя в змеевике калорифера клапаном 14. Автоматическая система управления обеспечивает меры по защите калорифера от замерзания воды (теплоносителя) в трубах. При отрицательной температуре наружного воздуха, измеряемой датчиком 15, в случае понижения температуры теплоносителя, измеряемой датчиком 16, ниже заданного предела или при падении давления в трубопроводе теплоносителя, измеряемого датчиком 17, ниже заданного предела система автоматически отрабатывает аварийный режим: выключается электродвигатель вентиляторной установки 18, перекрывается входная заслонка 1, и максимально открывается клапан 14 на трубопроводе теплоносителя. На ПК оператора выводятся соответствующие сообщения. Для снижения энергопотребления предусматривается управление электродвигателем вентиляторной установки 18 с помощью преобразователя частоты 19. При переходе отдельного помещения в нерабочее состояние контроллер подает управляющий сигнал на закрытие заслонок обслуживающих данное помещение воздухопроводов, а также управляющий сигнал на преобразователь частоты, снижающий частоту двигателя и соответственно его энергопотребление.

6.5. Манипуляторы промышленных роботов

Системы управления электроприводами манипуляторов обеспечивают движение исполнительного органа (схвата) по заданной пространственной траектории путем управления движением отдельных звеньев манипулятора. Каждое звено оснащается электроприводом и датчиками для

контроля перемещений. Задание на движение звеньев осуществляется от УЧПУ. На рис. 6.13 и 6.14 показаны функциональные схемы систем управления движением звеньев трехзвенных манипуляторов двух типов, в которых выделены только переносные координаты. Задающие воздействия q_{13} , q_{23} , q_{33} поступают на блоки управления БУ1...БУ3 электроприводами М1...М3. Передаточные механизмы ПМ1...ПМ3 обеспечивают реализацию требуемого вида движения (линейного или углового) звеньев. Это движение определяется обобщенными координатами q_1 , q_2 , q_3 . Датчики положения звеньев можно устанавливать на электродвигателях и звеньях манипулятора.

В манипуляторе первого типа (рис. 6.13) на неподвижном основании 1 размещается колонна 2, которая совершает угловые движения φ и вертикальные линейные движения z с помощью электродвигателей и передаточных механизмов, находящихся на основании. На колонне установлена рука 3, которая с помощью электродвигателя М3 совершает горизонтальные линейные движения r схвата 4 с грузом 5. Точкой P отмечен центр масс схвата с грузом. Работа манипулятора происходит в цилиндрической системе координат.

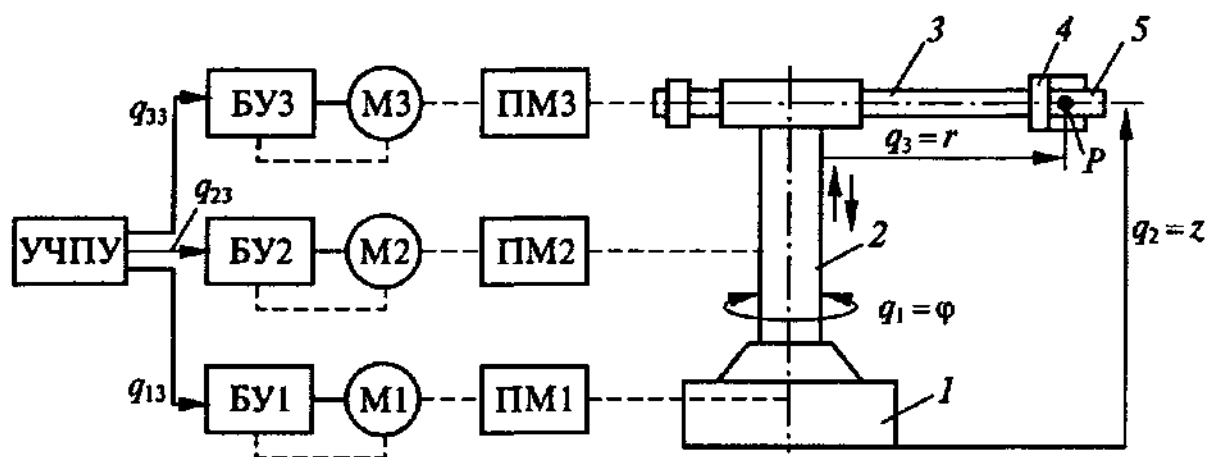


Рис. 6.13. Функциональная схема системы управления движением звеньев трехзвенного манипулятора первого типа

В манипуляторе второго типа (рис. 6.14) на неподвижном основании 1 установлена колонна 2, совершающая угловые движения φ_1 вокруг вер-

тикальной оси, а звенья 3 и 4 совершают угловые движения φ_2 и φ_3 вокруг осей, перпендикулярных плоскости рисунка.

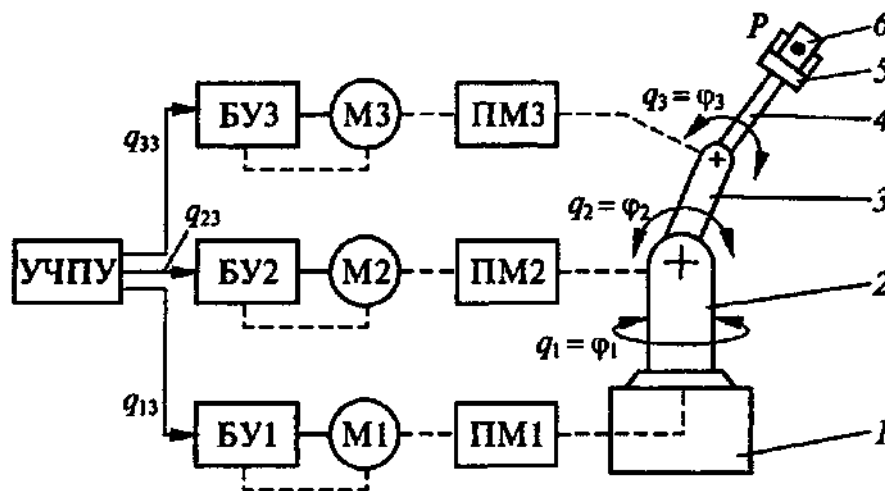


Рис. 6.14. Функциональная схема системы управления движением звеньев трехзвенного манипулятора второго типа

Структурная схема системы управления манипулятором, соответствующая обобщенной структурной схеме, показана на рис. 6.15.

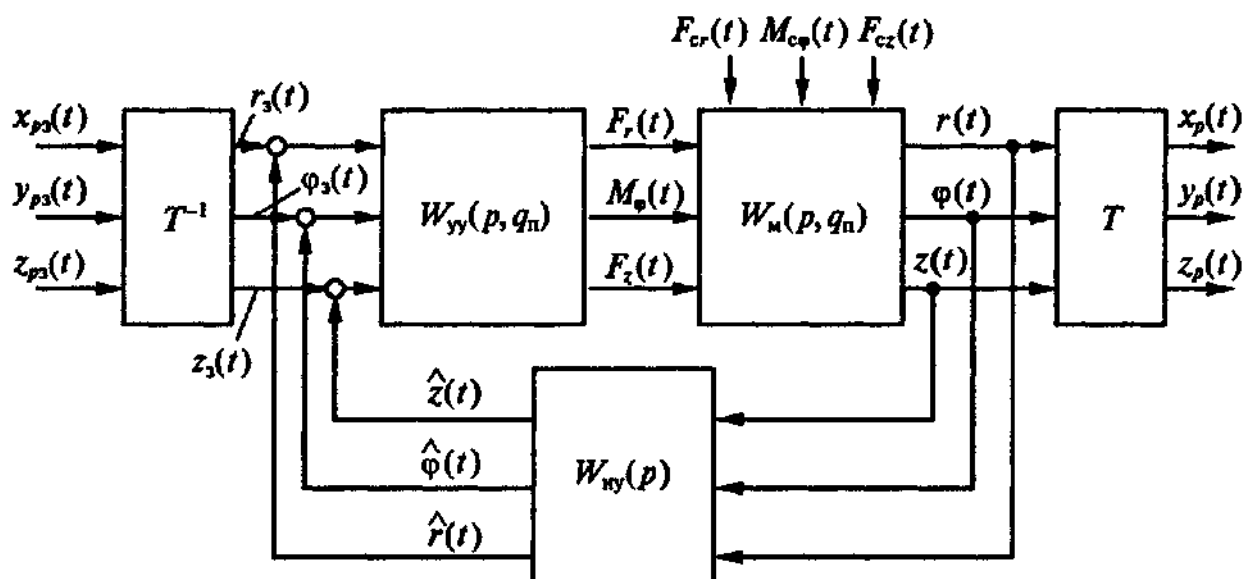


Рис. 6.15. Структурная схема системы управления манипулятором

Манипулятор как объект управления имеет взаимосвязи по координатам $r(t)$ и $\varphi(t)$ и автономную координату $z(t)$, что хорошо объясняется физикой процессов одновременного движения звеньев. Система уп-

равления обеспечивает перемещение центра масс схвата по заданной пространственной траектории в виде траекторий координат $x_p(t)$, $y_p(t)$, $z_p(t)$. Последние связаны с координатами $r(t)$, $\varphi(t)$ и $z(t)$ звеньев уравнениями прямой задачи кинематики.

Задающие воздействия $r_3(t)$, $\varphi_3(t)$ и $z_3(t)$ формируются в УЧПУ исходя из заданных координат $x_{p3}(t)$, $y_{p3}(t)$, $z_{p3}(t)$ и решения уравнений обратной задачи кинематики. В идеальном случае необходимо обеспечить условия автономности для трех сепаратных систем управления звеньями и условия, при которых по отношению к траектории $P(t)$ можно было бы считать заданные и действительные переменные примерно одинаковыми: $r(t) = r_3(t)$, $\varphi(t) = \varphi_3(t)$, $z(t) = z_3(t)$. Контурные регулирования токов в каждой системе замкнуты и учитываются в составе эквивалентных передаточных функций. Без учета упругих связей приводов, передаточных механизмов и звеньев входными переменными манипулятора являются переменные $F_r(t)$, $M_\varphi(t)$, $F_z(t)$.

Если манипулятор работает в позиционном режиме, выполняя цикловые движения при последовательном движении отдельных звеньев, то взаимосвязь координат q_1 и q_3 не возникает. Управление движением каждого звена автономно. В комплектном приводе каждого звена реализуется алгоритм позиционного управления.

6.6. Перечень контрольных вопросов к главе 6

1. В чем особенности автоматизированного электропривода, используемого в металлообрабатывающем оборудовании?
2. Электродвигатели какого типа используются для реализации главного и вспомогательного движений станочного оборудования?
3. Опишите организацию электроприводной группы на примере многооперационного сверлильно-фрезерно-расточного станка с горизонтальным шпинделем.

4. Что такое устройство автоматической смены инструмента, какой тип привода и форма его организации используются в станках с ЧПУ?
5. Охарактеризуйте многоскоростные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором со ступенчатым регулированием угловой скорости.
6. В чем заключаются особенности применения электропривода шлифовальных станков?
7. В чем суть стабилизации мощности и усилия резания в автоматизированных электроприводах металлообрабатывающих станков?
8. В чем особенности автоматизированного электропривода, используемого в транспортных и подъемно-транспортных устройствах?
9. В чем особенности автоматизированного электропривода, используемого в буровой технике?
10. В чем особенности автоматизированного электропривода, используемого в системах вентиляции и кондиционирования воздуха производственных помещений?
11. В чем особенности автоматизированного электропривода, используемого в манипуляторах промышленных роботов?
12. Дайте краткую характеристику транспортных и подъемно-транспортных устройств.
13. Каким образом организуется поточно-транспортная система конвейерных систем?
14. Как производится расчет мощности электроприводов конвейеров?
15. Опишите особенности построения приводов для буровых установок.
16. Охарактеризуйте функции систем вентиляции и кондиционирования производственных помещений.
17. Приведите функциональные схемы систем управления движением звеньев трехзвенного манипулятора различных типов.
18. Опишите структурную схему системы управления манипулятором.

ГЛАВА 7. МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В MATLAB SIMULINK

Программный комплекс *MATLAB* (от слов *Matrix Laboratory* – матричная лаборатория) состоит из ряда специальных программ, позволяющих решать широкий спектр математических и технических задач из разных областей науки и техники.

Simulink – это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы.

Интерактивная среда *Simulink* позволяет использовать уже готовые библиотеки блоков для моделирования электросиловых, механических и гидравлических систем, а также применять развитый модельно-ориентированный подход при разработке систем управления, средств цифровой связи и устройств реального времени.

Графическая среда *Simulink*, помимо собственной библиотеки, содержит еще множество дополнительных библиотек, которые используются для моделирования всевозможных объектов и процессов. Основные из них: *Simulink*; *Fuzzy Logic Toolbox*; *Neural Network Toolbox*; *Simscape* (*SimHydraulics*, *SimMechanics*, *SimPowerSystems*); *Simulink Coder*; *Stateflow*.

Библиотека *Simulink* (рис. 7.1) содержит в себе множество блоков, которые представлены в системе группами:

- *Continuous* – группа содержащая блоки непрерывного выполнения;
- *Discontinuous* – нелинейные элементы;
- *Discrete* – дискретные (цифровые) системы управления;
- *Logic and Bit Operations* – логические операторы;
- *Math Operations* – математические операторы;

- *Ports And Subsystems* – порты и подсистемы;
- *Sinks* – приёмники сигналов;
- *Sources* – источники сигналов;
- *User-Defined Functions* – пользовательские функции.

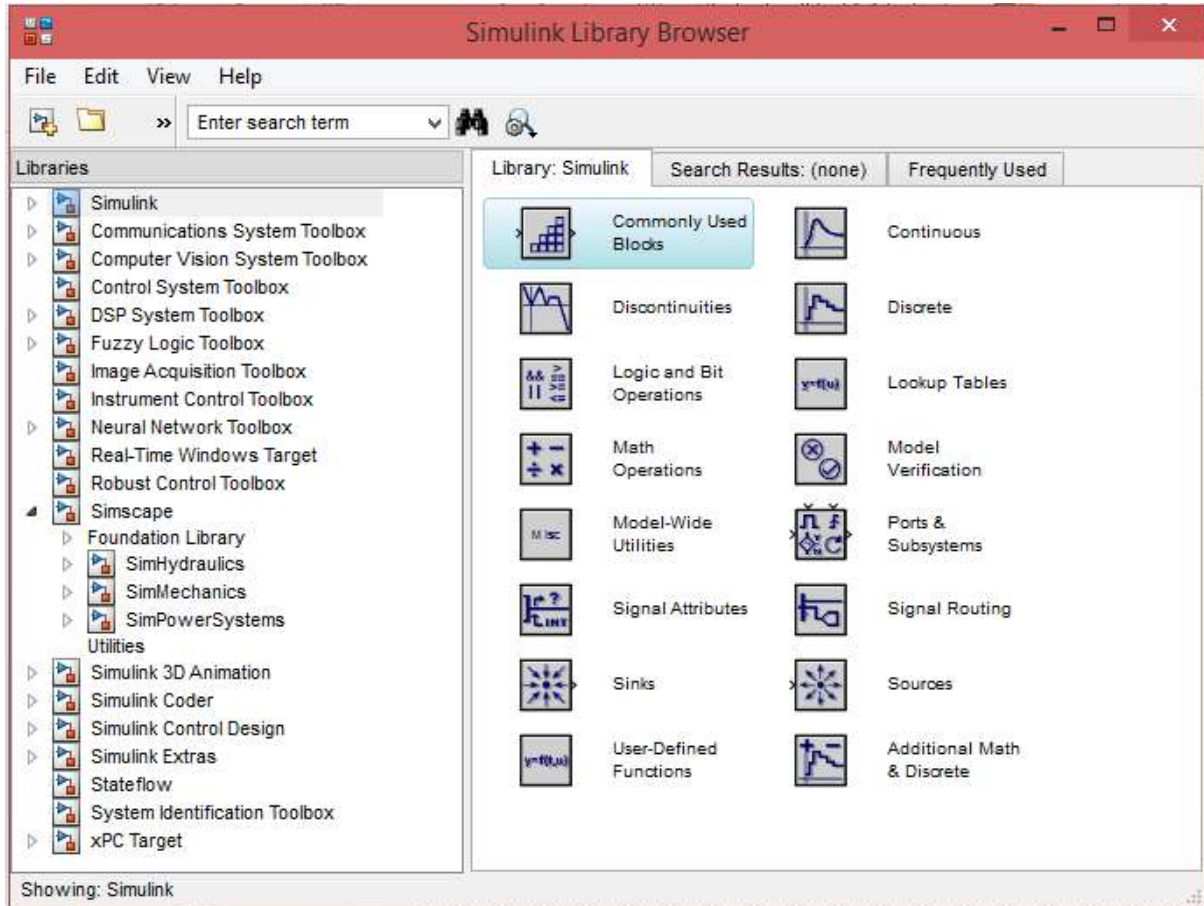


Рис. 7.1. Окно библиотеки *Simulink*

7.1. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по данным каталога

Рассмотрим основные параметры схемы замещения асинхронного электродвигателя, которые могут быть определены по данным из каталога.

1. Номинальное скольжение:

$$s_H = \frac{n_s - n_H}{n_s},$$

где n_s – синхронная скорость (скорость вращения магнитного поля);

n_H – номинальная скорость вращения двигателя.

2. Критическое скольжение:

$$s_k = \left(m_{\max} + \sqrt{m_{\max}^2 - 1} \right) s_H,$$

где $m_{\max} = M_{\max}/M_H$ – отношение максимального момента (критического) к номинальному моменту.

3. Конструктивный коэффициент:

$$c_1 = 1 + \frac{L_{1s}}{L_m}.$$

Изначально конструктивный коэффициент задается в диапазоне $c_1 = 1,02 \dots 1,05$ для предварительного расчета параметров схемы замещения. После расчета индуктивностей, входящих в уравнение, необходимо сравнить полученное значение с первоначально выбранным и уточнить расчет. Обычно за две – три итерации удается достичь совпадения принятого и рассчитанного значений конструктивного коэффициента.

4. Коэффициент вязкого трения:

$$B_T = \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{(2\pi n_H / 60)^2}.$$

5. Механические потери.

Если предположить, что полные потери состоят из постоянных и переменных потерь и постоянные примерно равны 1/3 полных потерь, а механические потери составляют половину постоянных потерь, то механические потери $\Delta P_{\text{мех}}$ определяются из уравнения:

$$\Delta P_{\text{мех}} = P_H \left(\frac{1}{\eta_H} - 1 \right) \frac{1}{6}.$$

6. Сумма $P_H + \Delta P_{\text{мех}}$ может быть определена как

$$P_H + \Delta P_{\text{мех}} = P_H \left[1 + \left(\frac{1}{\eta_H} - 1 \right) \frac{1}{6} \right].$$

7. Сопротивление статора

$$R_s = \frac{1}{2} \frac{U_H^2 (1 - s_H)}{c_1 \left(1 + \frac{c_1}{s_k} \right) m_k (P_H + \Delta P_{\text{мех}})},$$

где $m_k = M_k / M_H$ – кратность пускового момента (каталожный параметр).

8. Сопротивление ротора

$$R_s = \frac{1}{3} \frac{(P_H + \Delta P_{\text{мех}}) m_k}{(1 - s_H) i_k^2 I_H^2},$$

где $i_k = I_k / I_H$ – отношение тока короткого замыкания (пускового) к номинальному току.

9. Индуктивность статора и ротора

$$L_s \cong L_r = \frac{1}{2 p f_H} \frac{U_H}{\sqrt{3} I_H \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi_H)^2} - \frac{s_H \cos \varphi_H}{s_k} \right)}.$$

10. Индуктивность рассеяния статора и ротора

$$L_{1s} \cong L_{1r} = \frac{1}{4 p f_H} \sqrt{\left[\frac{U_H}{\sqrt{3} (i_k I_H)} \right]^2 - (R_s + R_r)^2}.$$

11. Взаимоиндукция

$$L_m = L_s - L_{1s}.$$

В табл. 7.1 приведены параметры некоторых асинхронных двигателей, выпуск которых освоен Ярославским электротехническим заводом. Асинхронные двигатели являются развитием ранее существовавшей серии асинхронных машин типа 4А. Номинальное напряжение машин составляет 220, 380, 660, 220/380, 380/660 В. Токи указаны для линейного напряжения 380 В. Частота питающей сети – 50 Гц.

Таблица 7.1

Параметры асинхронных двигателей

Тип двигателя	P_n , кВт	Масса, кг	n_n , об/мин	η , %	$\cos\phi$	I_n , А	$I_{\text{пуск}}/I_n$	$M_{\text{пуск}}/M_n$	$M_{\text{мах}}/M_n$	J , кг м ²
RA71A2	0,37	5	2800	71	0,81	1,5	5	2,3	2,4	0,0004
RA80A2	0,75	9	2820	74	0,83	2	5,3	2,5	2,7	0,0008
RA90S2	1,5	13	2835	79	0,87	3	6,5	2,8	3	0,0010
RA100L2	3,0	20	2895	83	0,86	6	7	2,4	2,6	0,0038
RA112M2	4	41	2895	84	0,87	9	6,8	2,2	3,3	0,0082
RA132SA2	5,5	43	2880	89	0,89	11	6,5	2,4	3	0,0155
RA160MA2	11	112	2940	87,5	0,89	22	6,8	2	3,3	0,0438
RA180M2	22	147	2940	90,5	0,89	42	7,5	2,1	2,4	0,1443
RA200LA2	30	170	2950	92	0,89	55	7,5	2,4	3	0,1164

7.2. Исследование модели асинхронного двигателя в Matlab Simulink

По умолчанию модель асинхронного двигателя из раздела библиотеки *SimPowerSystems* даётся для фазного ротора (рис. 7.2, а).

Клеммы *A, B, C* служат для подключения к трёхфазному напряжению, клеммы *a, b, c* – выходы обмотки ротора. Параметры двигателя для модификации *SI Units* в абсолютных единицах вводятся через диалоговое окно, которое вызывается двойным щелчком по изображению двигателя (рис. 7.3). В строке *Rotor type* предлагается два варианта: *Wound* – двигатель с фазным ротором и *Squirrel-cage* – короткозамкнутый двигатель (с беличьей клеткой). В строке *Reference frame* предлагается три варианта выбора системы координат: *Rotor* – вращающаяся с ротором с одинаковой частотой; *Stationary* – неподвижная, наиболее естественная для нас; *Synchronous* – система координат, синхронно вращающаяся с частотой сетевого напряжения. Параметры асинхронного двигателя вводятся в следующие строки в абсолютных единицах.

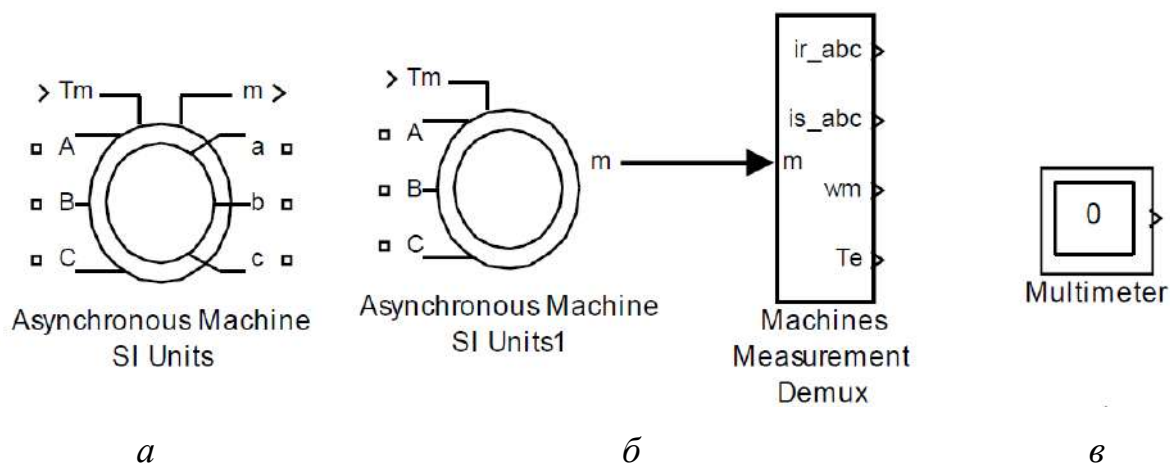


Рис. 7.2. Виртуальная модель асинхронной машины:

a – модель в абсолютных единицах двигателя с фазным ротором;

б – модель короткозамкнутого двигателя; *в* – измерительный инструмент

Следует иметь в виду, что эти параметры в справочниках и каталогах не приводятся, а рассчитываются с помощью различных методик, например так, как это рассмотрено в предыдущем пункте.

Figure 7.3 shows the 'Block Parameters: Asynchronous Machine SI Units' dialog box. The description states: 'Asynchronous Machine (mask) (parameterized link). Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in the dq rotor reference frame. Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point. You can specify initial values for stator and rotor currents or for the stator current only.' The parameters section includes: Preset model (No), Show detailed parameters (checked), Rotor type (Wound), Reference frame (Stationary), Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(WA), Vn(Vrms), fn(Hz)] ([3730 460 60]), Stator resistance and inductance [Rs(ohm) Lls(H)] ([1.115 0.005974]), Rotor resistance and inductance [Rr(ohm) Llr(H)] ([1.083 0.005974]), Mutual inductance Lm (H) (0.2037), Inertia, friction factor and pairs of poles [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()] ([0.04 0 2]), and Initial conditions ([1.0 0.0 0 0.0]).

Рис. 7.3. Окно ввода параметров двигателя в абсолютных единицах

Чаще всего применяется короткозамкнутый двигатель (рис. 7.2, б). К выходу m подключается специальный демультиплексор *Machines Measurement Demux*, находящийся в разделе *SimPowerSystems* в подразделе *Machine*. Тип машины переменного тока отражается в строке *Machine type*, открываемой двойным щелчком левой кнопки мыши (рис. 7.3, 7.4).

По входу T_m задаётся активный момент нагрузки в Н·м. По требованию программы *Simulink* на рабочем поле модели должен быть размещен блок *Multimeter* (рис. 7.2, в), иначе процесс моделирования блокируется.

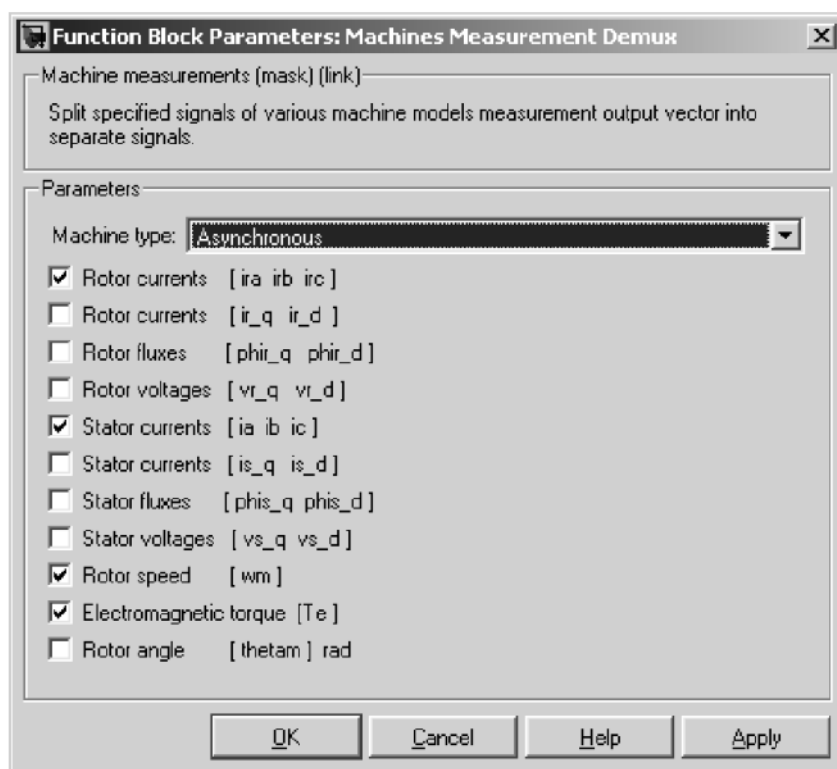


Рис. 7.4. Окно выбора типа машины и перечня выходных переменных

На рис. 7.5 представлена схема моделирования процессов пуска и реверса асинхронного короткозамкнутого двигателя при включении на фазное напряжение 220 В, 50 Гц (380 В линейное) с реверсом путем изменения порядка чередования фаз с помощью переключателей *Switch* и *Switch1*. Время моделирования принято 0,6 с и реверса – через 0,3 с. Активный момент нагрузки задан 30 Н·м. Для построения динамической механической характеристики использован графопостроитель *XY Graph*.

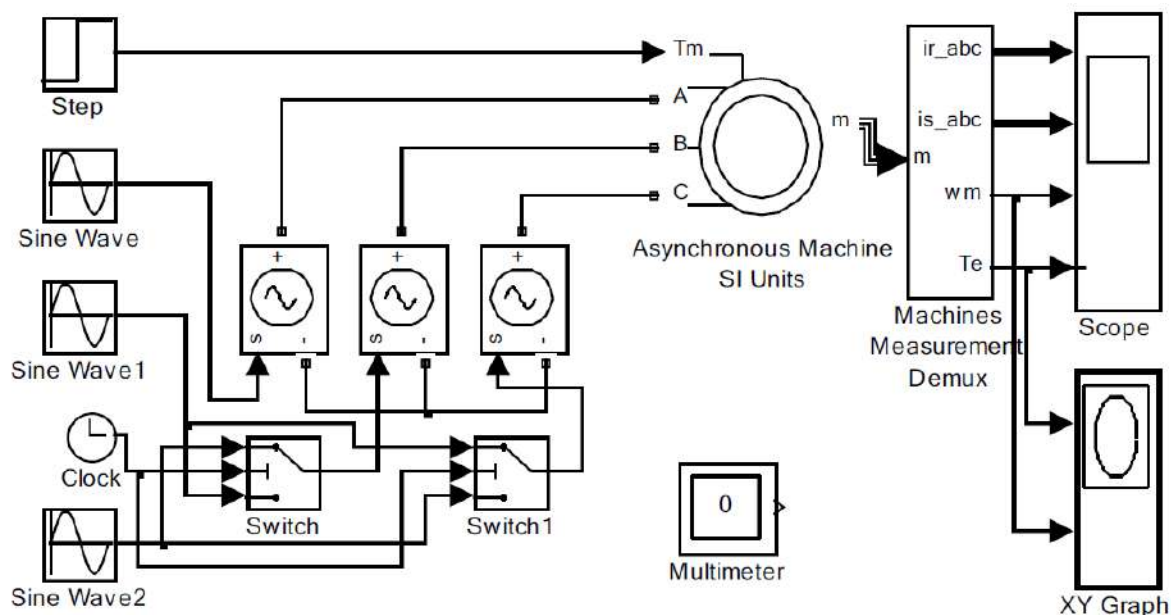


Рис. 7.5. Модель реверсивного электропривода переменного тока
с прямым включением двигателя в сеть

Настройка задающих генераторов синусоидального сигнала, управляемых источников напряжения и переключателей показана на рис. 7.6.

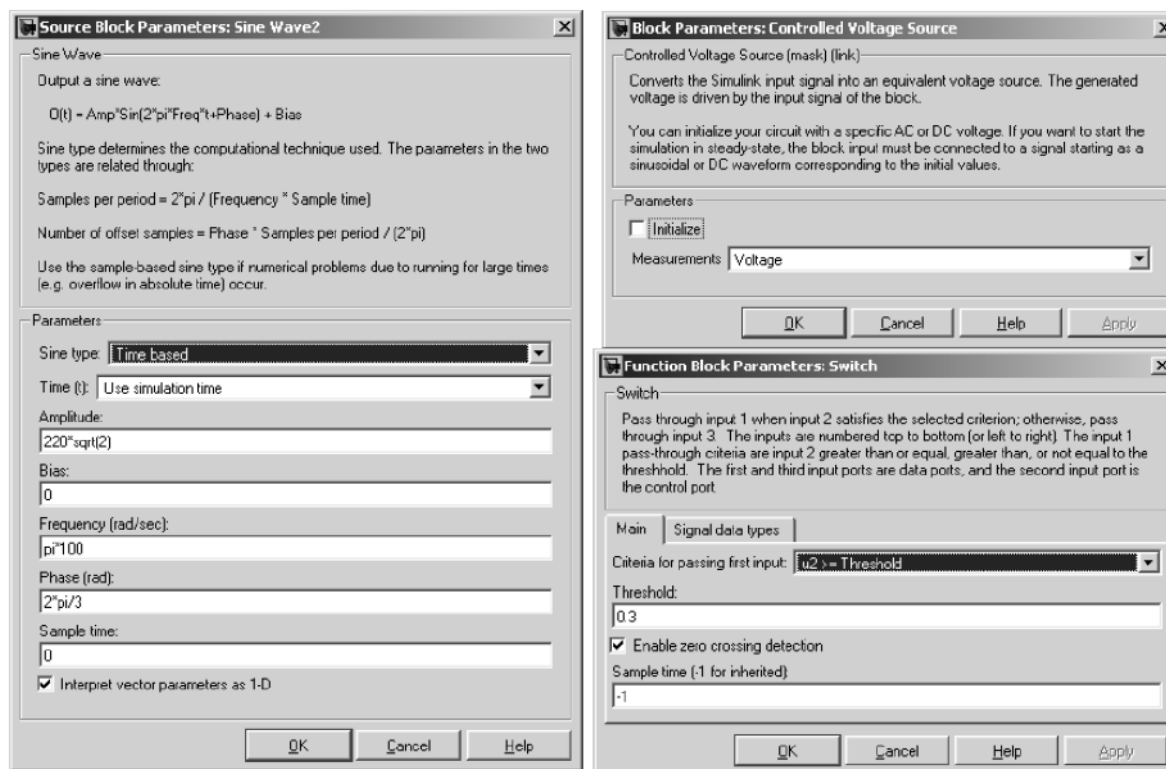


Рис. 7.6. Настройка блоков управления модели привода переменного тока

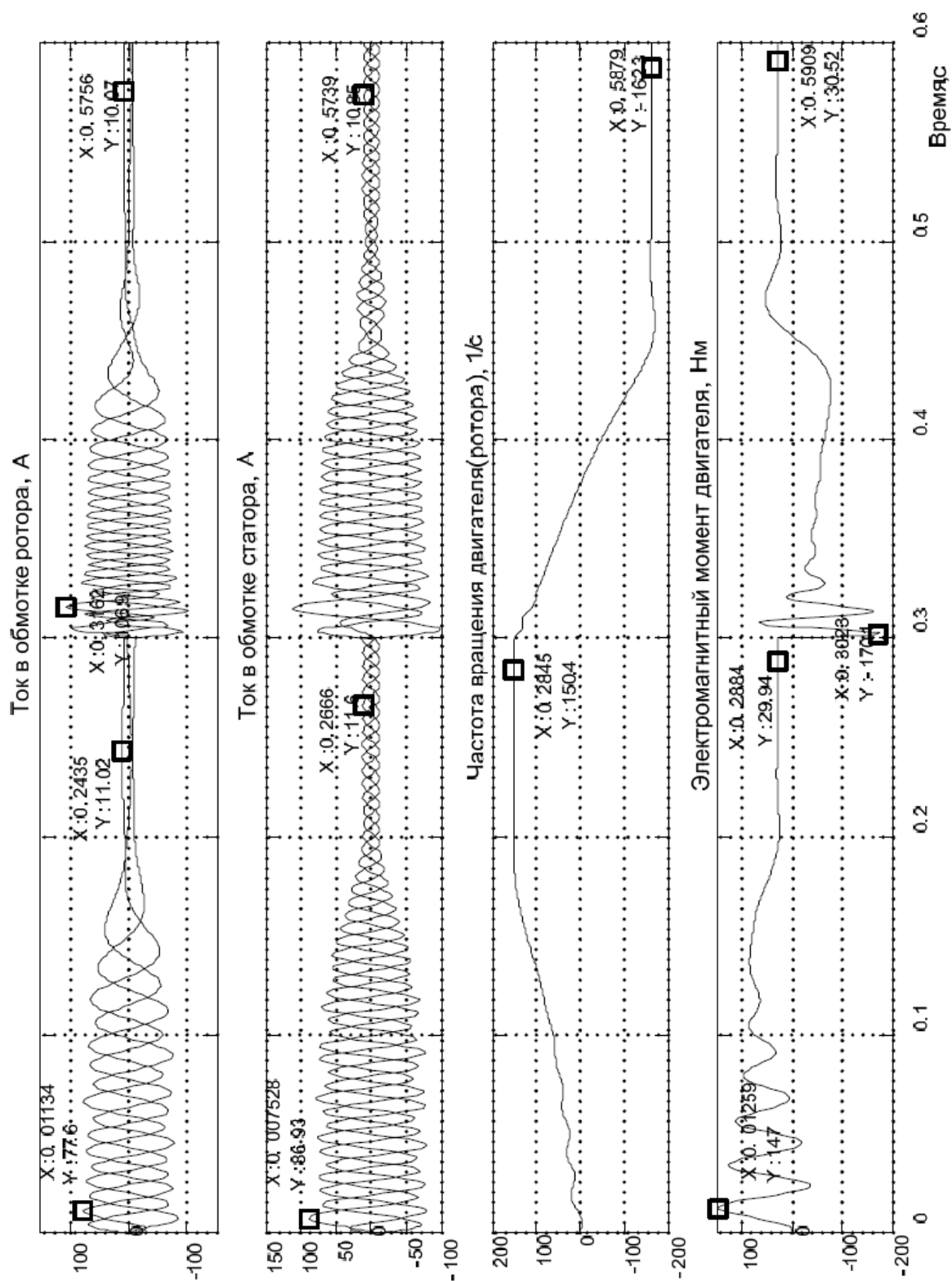


Рис. 7.7. Переходные процессы пуска и реверса асинхронного двигателя

Результаты моделирования процессов пуска и реверса представлены на рис. 7.7. Текущее значение токов представлено в каждой фазе. На первом временном отрезке от 0 до 3 с на двигатель подается напряжение с прямым чередованием фаз. Двигатель разгоняется под нагрузкой 30 Н·м «вперед» (положительный знак частоты вращения). Пусковой ток в обмотке статора достигает амплитудного значения 86,93 А. Примерно такого же значения достигает ток в обмотке ротора 77,6 А, так как выводится значение тока ротора в обмотке ротора, приведенное к обмотке статора.

Электромагнитный момент двигателя носит колебательный характер, что приводит к ухудшению пусковых свойств двигателя и является недостатком асинхронного двигателя. Максимальное значение текущего значения момента составило при пуске «вперед» 147 Н·м. При увеличении частоты вращения колебания момента двигателя затухают, интенсивность роста частоты вращения возрастает. При этом ток статора уменьшается при неизменной частоте 50 Гц, в то же время ток в обмотке ротора тоже уменьшается, но с уменьшением частоты тока ротора. Это объясняется выбором неподвижной системы координат. В установившемся режиме (текущее время чуть менее 3 с) частота вращения достигает значения $150,4 \text{ с}^{-1}$ (при $\omega_0 = (1500 \cdot 2\pi)/60 = 157 \text{ с}^{-1}$), момент двигателя – 29,94 Н·м (при нагрузке 30 Н·м), амплитудное значение тока статора – 11,6 А, амплитудное значение тока ротора – 11,02 А.

В момент времени 3 с производится реверс двигателя путем изменения порядка чередования фаз. Эту задачу выполняют переключатели *Switch*. Идет переходный процесс реверса: ток в обмотке ротора достигает 106,9 А амплитудного значения (рис. 7.7), частота тока в обмотке ротора чуть менее 100 Гц. Происходит противоточное торможение (двигатель включен «назад», а еще вращается «вперед»). Момент двигателя по-прежнему имеет колебательный характер, максимальное значение составляет –170,1 Н·м.

По мере уменьшения частоты вращения колебательность момента затухает, частота вращения достигает нуля и начинает расти в отрицательной области, которую мы называли «назад». Частота вращения достигает значения $-162,3 \text{ с}^{-1}$ (рис. 7.7), превышающего частоту идеального холостого хода 157 с^{-1} , что свидетельствует о том, что двигатель работает в режиме генераторного торможения и развивает положительный момент $30,52 \text{ Н}\cdot\text{м}$, равный заданному моменту нагрузки $30 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Ток ротора и статора уменьшился до установившегося значения, соответствующего нагрузке $30 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

На рис. 7.8 приведена снятая при пуске и реверсе механическая характеристика двигателя. Колебательный характер момента при пуске и реверсе существенно изменяет вид механической характеристики.

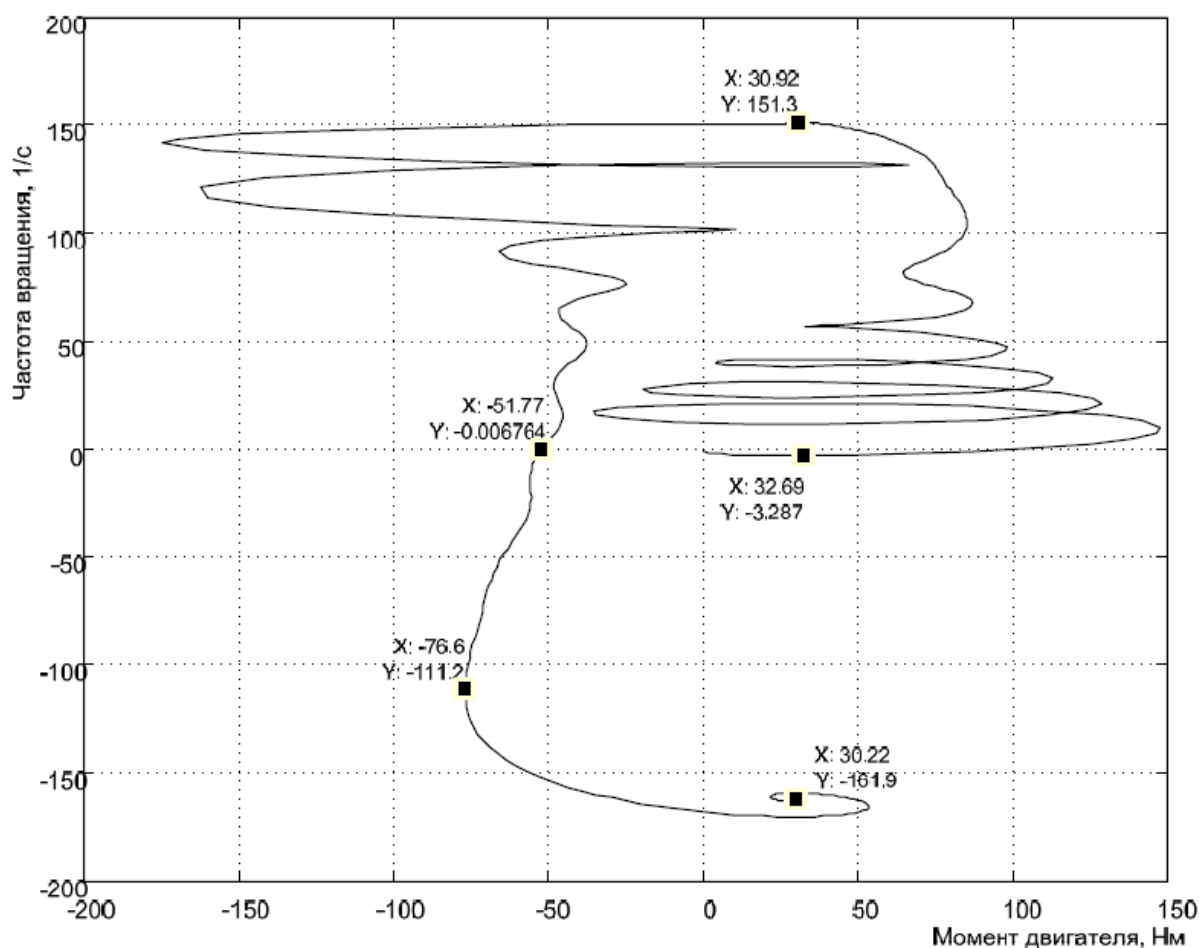


Рис. 7.8. Динамическая механическая характеристика асинхронного двигателя при пуске и реверсе с активным моментом нагрузки $30 \text{ Н}\cdot\text{м}$

При пуске максимальный момент достигает значения 150 Н·м, однако среднее значение, определяющее интенсивность пуска, невелико. Наиболее близка к статической механическая характеристика, рассчитанная при пуске двигателя «назад».

Двигатель развивает пусковой момент $-51,77$ Н·м (рис. 7.8), максимальный момент $-76,6$ Н·м при частоте вращения $-111,2$ с⁻¹ и разгоняется до частоты вращения, большей, чем частота идеального холостого хода.

7.3. Мягкие частотный пуск и остановка асинхронного двигателя

На рис. 7.9 показана модель частотного асинхронного привода, управляемого от задатчика интенсивности *1Chirp 3Signal*.

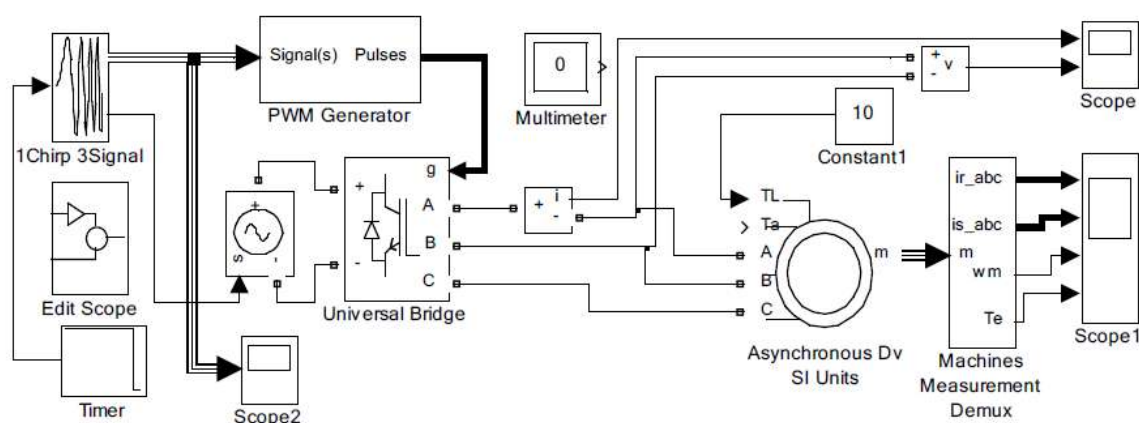


Рис. 7.9. Модель разомкнутого частотно-управляемого асинхронного электропривода

Асинхронный двигатель запитан от преобразователя частоты *Universal Bridge*, управляемого блоком *PWM Generator*. Задатчик интенсивности *1Chirp 3Signal* оригинальной разработки вырабатывает трехфазный сигнал от начальной частоты до конечной по закону $U/f = \text{const}$. Предусмотрено формирование как нарастания сигнала по указанному закону, так и уменьшения. Кроме того, предусмотрены расчет напряжения питания инвертора по максимальному значению частоты и паспортным данным двигателя и управления источником питания соответствующим сигналом.

На рис. 7.10 приведено окно ввода параметров задатчика интенсивности. Начальная частота *Initial frequency* (H_z) может быть установлена любого значения, но меньшего, чем конечное значение *Frequency at target time* (H_z). Время нарастания и спада сигнала *Target time* (с) задается одного значения. При использовании входящей в состав библиотеки *Simulink* схемы управления инвертором *PWM Generator* максимальную амплитуду сигнала задатчика интенсивности (*Amplituda*) следует принять 1 В. Также указываются номинальное линейное напряжение и частота двигателя.

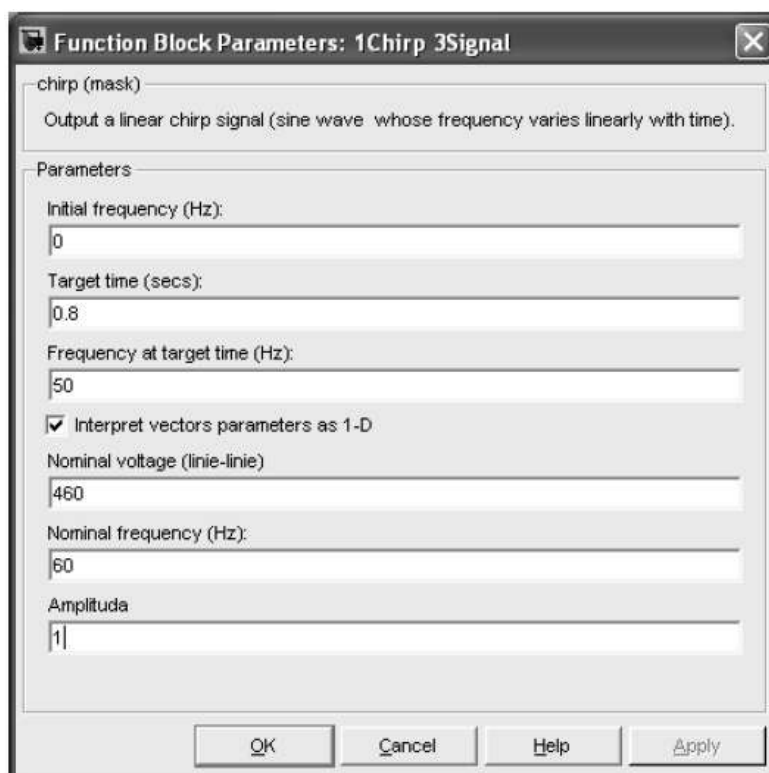


Рис. 7.10. Окно ввода параметров задатчика интенсивности

Управление задатчиком интенсивности осуществляется сигналами амплитудой 1В (*Timer*). 1 В – процесс нарастания напряжения и частоты питания и вращения двигателя, при отрицательном значении единичного сигнала управления задатчиком формируется процесс спада напряжения и частоты питания двигателя. На рис. 7.11 продемонстрировано окно ввода параметров блока *Timer*. Введены параметры, в соответствии с которыми процесс нарастания частоты начинается с нулевого момента времени, про-

цесс спада – с момента времени 1,1 с. Полное время моделирования должно учитывать время нарастания, время спада и время работы на максимальной частоте вращения двигателя.

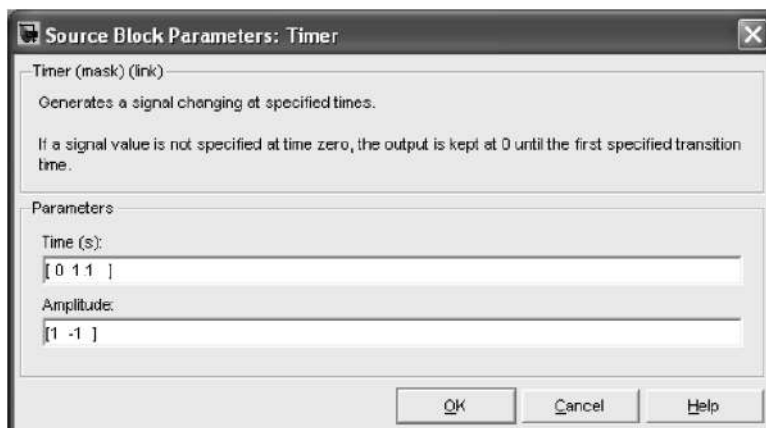


Рис. 7.11. Окно ввода параметров блока Timer

Блок *Edit Scope* позволяет открывать главное меню редактирования диаграмм, отражающих результаты моделирования на экране осциллографа *Scope*. Для этого необходимо запустить процесс моделирования с открытым окном *Scope*.

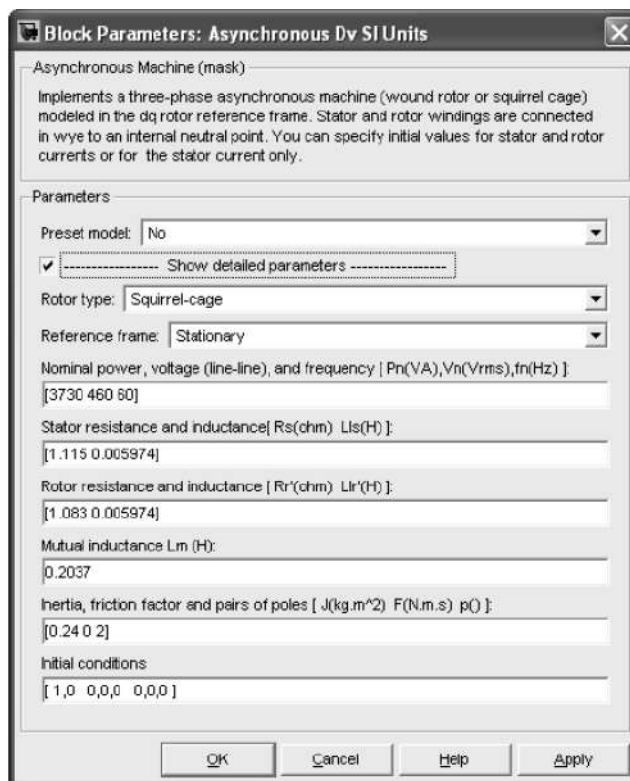


Рис. 7.12. Окно ввода параметров двигателя

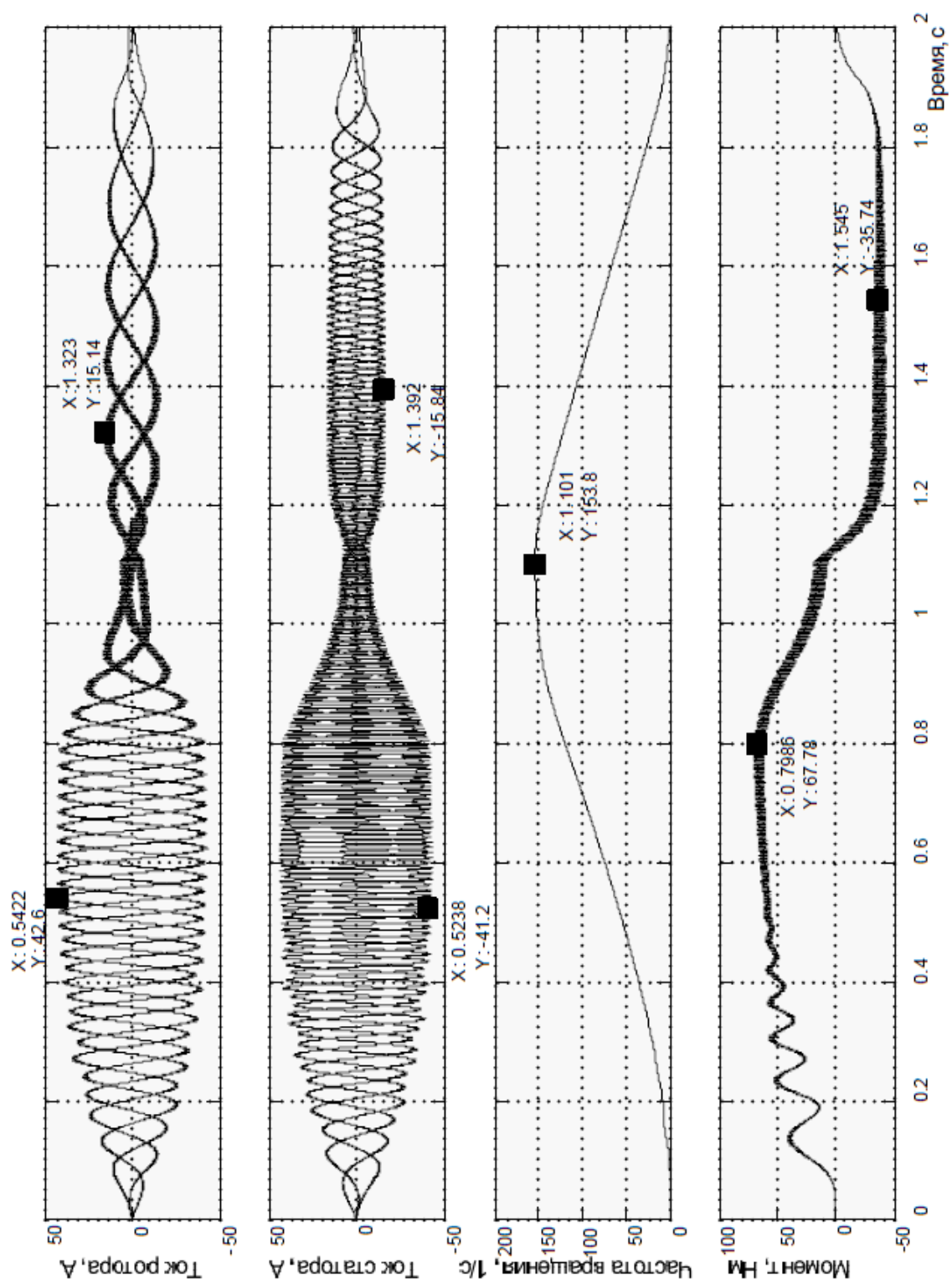


Рис. 7.13. Результаты моделирования пуска и остановки асинхронного электропривода с временем 0,8 с

На рис. 7.12 представлены введенные параметры асинхронного двигателя. Особенностью является повышенное значение момента инерции. Реактивный момент сопротивления задается в блоке *Constant1* и равен 10 Н·м.

На рис. 7.13 проиллюстрированы результаты моделирования переходных процессов пуска и остановки асинхронного двигателя при частотном управлении от задатчика интенсивности по закону $U/f = \text{const}$. Процесс пуска протекает с ограничением тока статора до $41,2/\sqrt{2}$ А. Однако рост частоты вращения значительно запаздывает, что, возможно, объясняется большим моментом инерции. В то же самое время качество переходного процесса торможения хорошее: двигатель при токе статора $15,84/\sqrt{2}$ А развивает момент 35,74 Н·м, незначительно меняющийся на протяжении всего процесса торможения.

7.4. Частотно-токовый электропривод с векторным управлением

Для разработки электропривода с векторным управлением и выполнения исследований на имитационных моделях в *Simulink* произвольно выберем асинхронный двигатель (АД), например, типа RA90S6 (табл. 7.2). Используем модель расчета параметров схемы замещения и подготовим параметры схемы замещения двигателя RA90S6. Паспортные данные двигателя приведены в табл. 7.3, а результаты расчета сведены в табл. 7.4.

Для построения имитационных моделей необходимо принять определенный уровень идеализации свойств АД и ПЧ. В теории электропривода переменного тока общепринятыми допущениями являются:

- рассматривается трехфазный симметричный режим работы;
- пренебрегают насыщением магнитной цепи АД;
- принимаются напряжения на выходе ПЧ синусоидальной формы;
- пренебрегают энергетической связью между АД и ПЧ.

Таблица 7.2

Преобразователи частоты серии VFB40 1,5...7,5 кВт

Параметры	Показатели					
Тип VFB40	–004	–006	–008	–010	–012	–016
Номинальная мощность, кВт	1,5	2,2	3	4	5,5	7,5
Номинальный выходной ток, А	4	6	7,5	9,5	12	16
Ограничение тока I_{GL} , 120 с, А	6	9	11,3	14,3	18	24
Пиковый ток двигателя, А	10,7	16,1	20,2	25,5	32,2	42,9
Входной ток, А	4,5	6,8	8,5	10,5	13,3	17,8
Окружающая температура при номинальной мощности, °С	0...40					
Частота коммутации f_s , кГц	Максимум 3 кГц					
КПД ($P_{ном}$ при $f_s = 1,5$ кГц), %	97					
Потери ($P_{ном}$ при $f_s = 1,5$ кГц), Вт	45	66	90	120	165	225
Степень защиты	IP20					
Размер	В1					
Размеры, В×Ш×Г, мм	360×126×260					
Вес, кг	7					

Таблица 7.3

Технические данные двигателя RA90S6

$P_{ном}$, кВт	Масса, кг	$n_{ном}$, об/мин	η , %	$\cos \phi$, отн.ед.	I_H , А	I_{II} / I_H , отн. ед.	M_{II} / M_H , отн. ед.	M_{max} / M_H , отн.ед.	J , кг·м ²
0,75	13	935	70	0,72	2,2	4	2,2	2,5	0,004

Таблица 7.4

Параметры двигателя в абсолютных единицах

Параметр	Значение	Параметр	Значение
U_b , В	311,1	K_r , о.е.	0,9344
I_b , А	3,394	R , Ом	5,503
M_b , Н·м	15,08	L'_s , Гн	0,06796
R_s , Ом	2,681	T_r , с	0,1655
R_r , Ом	3,233	$1/J$	125
$L_s = L_r$, Гн	0,5352	M_n , Н·м	7,66
L_m , Гн	0,5	L_{ls} , мГн	35,2
T'_s , с	0,0123	L_{lr} , мГн	35,2

В соответствии с методами проектирования средств управления принимаем максимальные уровни входных сигналов управления и выходных напряжений управления (регуляторов) на уровне ± 10 В. Поэтому:

- коэффициент обратной связи по току

$$K_{oc1} = \frac{10}{I_{\text{пик.пч}} \sqrt{2}} = \frac{10}{10,7 \sqrt{2}} = 0,66.$$

- коэффициент обратной связи по потоку

$$K_{oc2} = \frac{10}{\Psi_{R\chi\max}} = \frac{10}{1} = 10.$$

- коэффициент обратной связи по частоте вращения

$$K_{oc3} = \frac{10}{\omega_{m\max}} = \frac{10}{100} = 0,1.$$

где $I_{\text{пик.пч}} = 10,7$ А – максимальный ток преобразователя частоты;

$\Psi_{R\chi\max} = 1\text{Вб}$ – максимальный поток двигателя;

$\omega_{m\max} = 100 \text{ с}^{-1}$ – максимальная частота вращения двигателя (ротора).

Номинальный момент двигателя – 7,66 Н·м.

Номинальный поток обмотки ротора определим по формуле:

$$\Psi_{R\text{ном}} = \frac{M_{\text{ном}}}{1,5 p K_r \sqrt{2} I_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}} = \frac{7,66}{1,5 \cdot 3 \cdot 0,9344 \cdot 1,4142 \cdot 2,2 \cdot 0,72} = 0,8\text{Вб}.$$

Математическое описание векторного управления двигателем

Запишем систему уравнений, описывающих процесс векторного управления двигателем, в операторной форме для системы координат, вращающейся с произвольной частотой ω_k :

$$\begin{aligned}
i_{Sx} &= \left(U_{Sx} + L'_S \omega_k i_{Sy} + \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx} + p \omega_m k_R \psi_{Ry} \right) \frac{1/R}{(1 + T'_S s)}; \\
i_{Sy} &= \left(U_{Sy} + L'_S \omega_k i_{Sx} + \frac{k_R}{T_R} \psi_{Ry} + p \omega_m k_R \psi_{Rx} \right) \frac{1/R}{(1 + T'_S s)}; \\
\psi_{Rx} &= \left(k_R R_R i_{Sx} + (\omega_k - p \omega_m) \psi_{Ry} \right) \frac{T_R}{(1 + T_R s)}; \\
\psi_{Ry} &= \left(k_R R_R i_{Sy} + (\omega_k - p \omega_m) \psi_{Rx} \right) \frac{T_R}{(1 + T_R s)}; \\
T_e &= \frac{3}{2} p k_R (\psi_{Rx} i_{Sy} - \psi_{Ry} i_{Sx}); \\
\omega_m &= \frac{1}{s} \left(\frac{1}{J} \right) (T_e - T_a - T_L); \\
\gamma &= \frac{1}{s(\omega_k)}.
\end{aligned}$$

Смысл векторного управления состоит в ориентации потока ротора по оси x вращающейся системы координат:

$$\psi_{R\text{ном}} = \psi_{Rx}, \quad \psi_{Ry} = 0. \quad (7.1)$$

Применим условие (7.1) к выражению

$$\psi_{Ry} = \left(k_R R_R i_{Sy} + (\omega_k - p \omega_m) \psi_{Rx} \right) \frac{T_R}{(1 + T_R s)}$$

и получим условие ориентации потока по оси x :

$$\omega_u = \omega_k = p \omega_m + k_R R_R \frac{i_{Sy}}{\psi_{Rx}}, \quad (7.2)$$

где ω_u – частота источника тока (например, инвертора); ω_k – частота вращения подвижной системы координат x, y ; ω_m – частота вращения ротора; k_R, R_R – параметры двигателя; i_{Sy} – составляющая тока статора по оси y .

Из условия (7.2) следует, что поток ротора $\psi_{R\text{ном}} = \psi_{Rx}$ ориентирован по оси x , если частота инвертора ω_u (источника тока) соответствует частоте вращения координат ω_k . Кроме того, из выражения (7.2) следует,

что заданием на формирование необходимой частоты источника тока является ток статора i_{Sy} и поток ротора ψ_{Rx} .

Выражение

$$\psi_{Rx} = (k_R R_R i_{Sx} + (\omega_k - p\omega_m) \psi_{Ry}) \frac{T_R}{(1 + T_R s)},$$

с учетом условия (7.1) упрощается и принимает вид:

$$\psi_{Rx} = (k_R R_R i_{Sx}) \frac{T_R}{(1 + T_R s)},$$

где T_R – постоянная времени цепи обмотки ротора; i_{Sx} – составляющая тока статора по оси x .

Формула для определения момента асинхронного двигателя также с учетом (7.1) упрощается и становится по структуре такой же, что для двигателя постоянного тока:

$$T_e = \frac{3}{2} p k_R (\psi_{Rx} i_{Sy}),$$

где i_{Sy} – составляющая тока статора двигателя по оси y , определяющая совместно с потоком ротора ψ_{Rx} электромагнитный момент двигателя T_e ; p – число пар полюсов двигателя.

Определение составляющих тока статора по осям x и y осуществляется по выражениям

$$i_{Sx} = \left(U_{Sx} + L'_S \omega_k i_{Sy} + \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx} + p\omega_m k_R \psi_{Ry} \right) \frac{1/R}{(1 + T'_S s)};$$

$$i_{Sy} = \left(U_{Sy} + L'_S \omega_k i_{Sx} + \frac{k_R}{T_R} \psi_{Ry} + p\omega_m k_R \psi_{Rx} \right) \frac{1/R}{(1 + T'_S s)};$$

с учетом условия (7.1):

$$i_{Sx} = \left(U_{Sx} + L'_S \omega_k i_{Sy} + \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx} \right) \frac{1/R}{(1 + T'_S s)};$$

$$i_{Sy} = \left(U_{Sy} - L'_S \omega_k i_{Sx} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Ry} + p\omega_m k_R \psi_{Rx} \right) \frac{1/R}{(1 + T'_S s)},$$

где L'_S , T'_S , R – параметры схемы замещения асинхронного двигателя;
 U_{Sx} , U_{Sy} – составляющие напряжения источника тока по осям x и y .

Уравнения движения электропривода

$$\omega_m = \frac{1}{s} \left(\frac{1}{J} \right) (T_e - T_a - T_L)$$

и вращающейся системы координат

$$\gamma = \frac{1}{s(\omega_k)}$$

остаются без изменения.

Сведем полученные уравнения в систему:

$$\begin{aligned} i_{Sx} &= \left(U_{Sx} + L'_S \omega_k i_{Sy} + \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx} \right) \frac{1/R}{(1 + T'_S s)}; \\ i_{Sy} &= \left(U_{Sy} - L'_S \omega_k i_{Sx} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Ry} + p \omega_m k_R \psi_{Rx} \right) \frac{1/R}{(1 + T'_S s)}, \\ \psi_{Rx} &= (k_R R_R i_{Sx}) \frac{T_R}{(1 + T_R s)} \\ T_e &= \frac{3}{2} p k_R (\psi_{Rx} i_{Sy}), \\ \omega_m &= \frac{1}{s} \left(\frac{1}{J} \right) (T_e - T_{\text{нагр}}), \\ \omega_k &= p \omega_m + k_R R_R \frac{i_{Sy}}{\psi_{Rx}}, \\ \gamma &= \frac{1}{s(\omega_k)}. \end{aligned} \tag{7.3}$$

Полученная система уравнений (7.3) описывает поведение неоптимизированной структуры электропривода с векторным управлением.

Разработаем эту структуру с целью определения путей ее оптимизации (рис. 7.14). Структура включает реализацию уравнений (7.3) и моделирование реактивного момента.

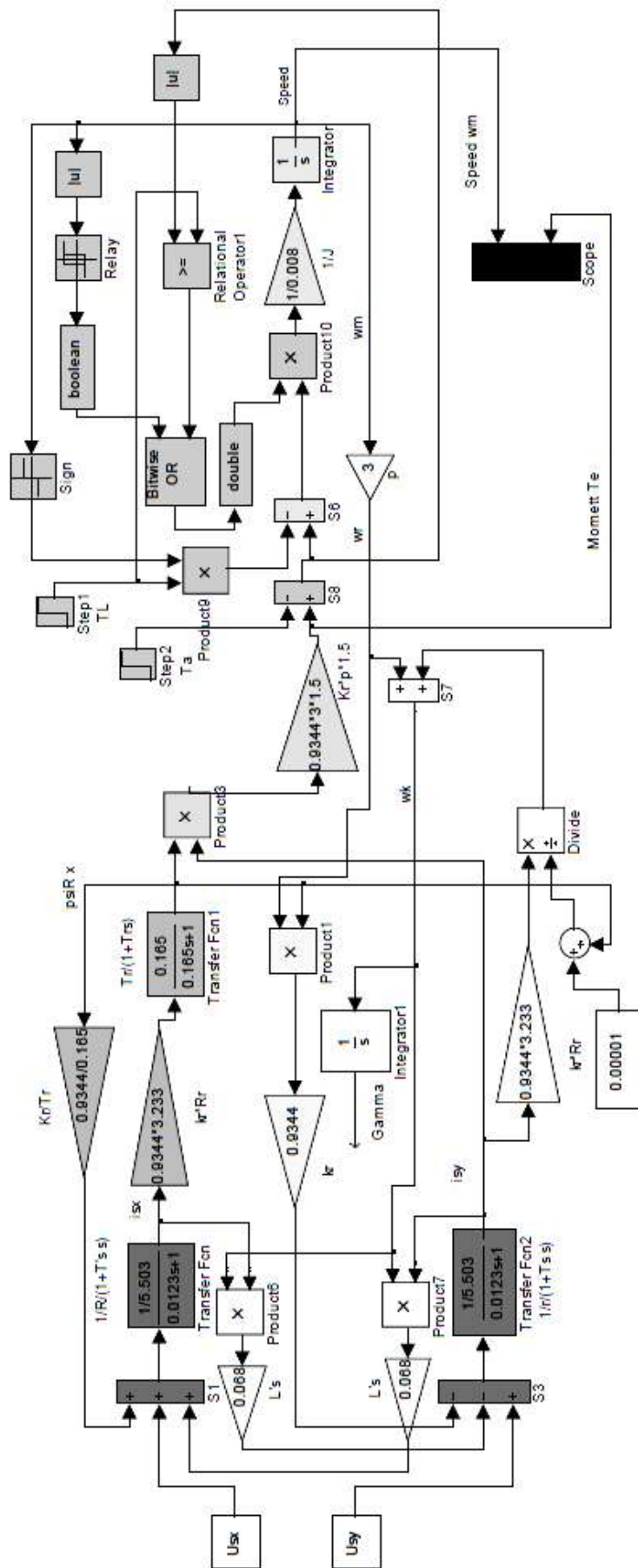


Рис. 7.14. Неоптимизированная структура векторного управления

Анализ выражений (7.3) позволяет сделать следующие заключения:

1) управление электроприводом осуществляется путем задания тока статора по соответствующим осям. По оси x задается ток, определяющий поток ротора, по оси y – ток, определяющий момент двигателя.

2) для придания проектируемому приводу свойств привода постоянного тока эти составляющие тока статора i_{sx} и i_{sy} не должны изменяться при воздействии поступающих при работе двигателя возмущений;

Реализация режима источника тока в автономном инверторе осуществляется введением дополнительных контуров управления с астатическими регуляторами, на вход которых подается разность задающего сигнала и сигнала с датчика реального тока двигателя.

На рис. 7.15 показана структура асинхронного двигателя с векторным управлением с применением преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией. В отличие от структуры на рис. 7.14 введен контур тока с реальным преобразователем. Все возмущения, действующие в реальном двигателе и описанные системой уравнений (7.3) учтены.

На рис. 7.16 демонстрируется структура с релейным управлением тока. Все особенности математического описания (7.3) также учтены. Для оптимизации процессов векторного управления асинхронным двигателем необходимо спроектировать два управляющих контура: потоком и скоростью с внутренними подчиненными контурами тока.

На рис. 7.17 представлена структура контура формирования потокосцепления (магнитного потока) ротора. Структура включает два контура: внешний (главный) контур потока и внутренний (подчиненный) контур тока. Управление процессом формирования тока статора во вращающейся системе координат по оси x ведет регулятор тока *Current PI Controller*. Ток в контуре I_{sx} создается с помощью управляемого преобразователя (инвертора) в виде идеального апериодического звена первого порядка.

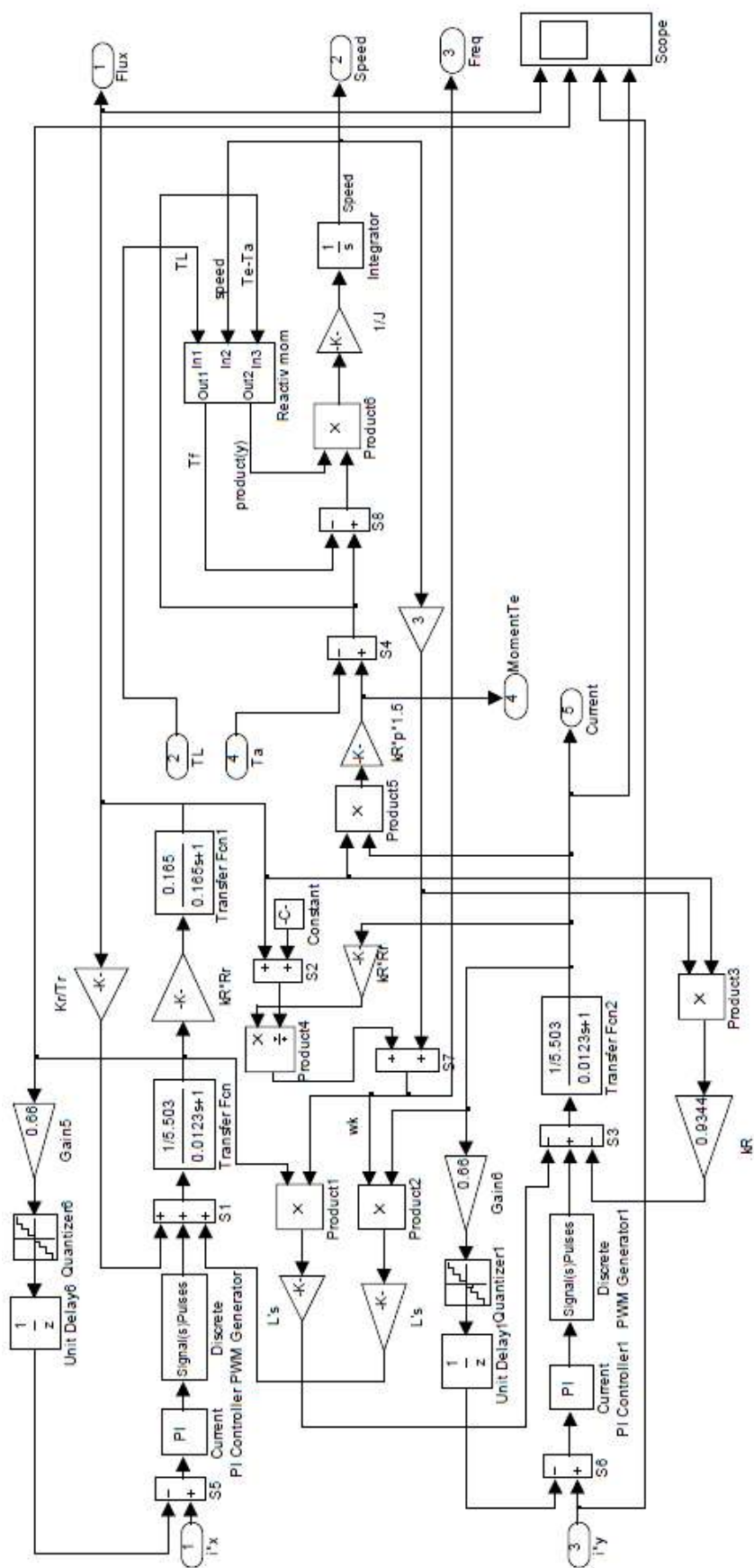


Рис. 7.15. Структура асинхронного двигателя с векторным управлением с применением преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией

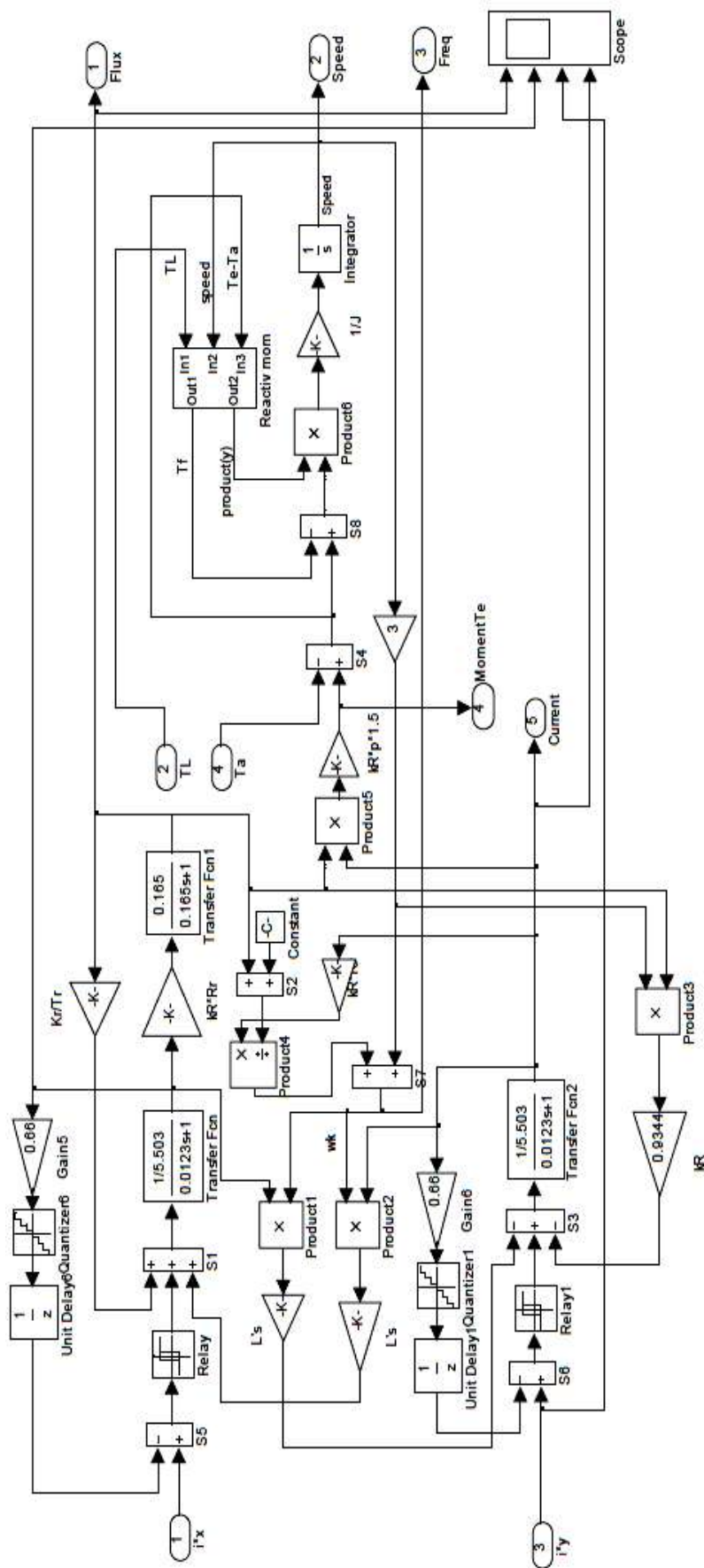


Рис. 7.16. Структура асинхронного двигателя с векторным управлением с применением преобразователя частоты с релейным управ-

лением

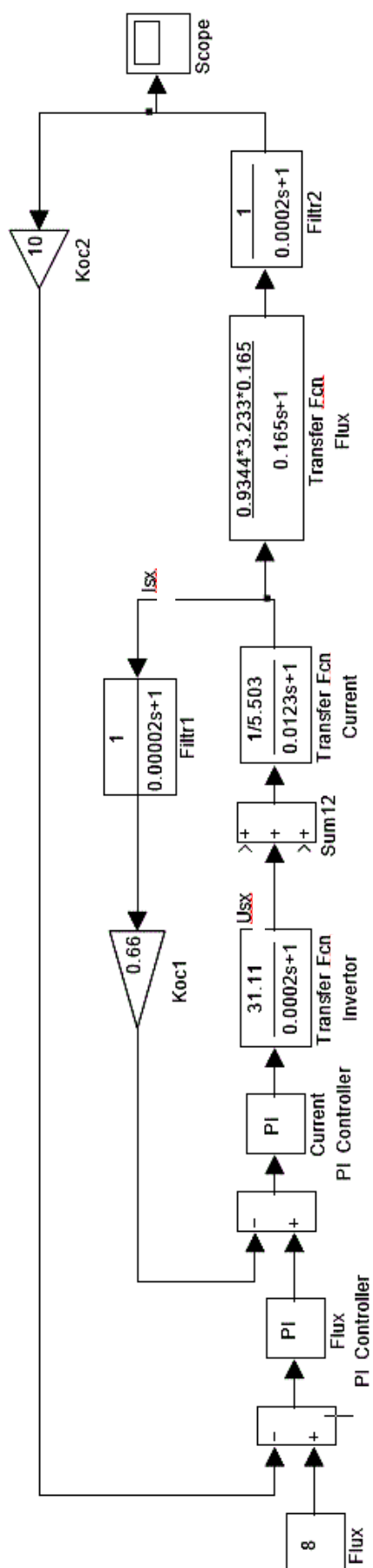


Рис. 7.17. Структура контура управления магнитным потоком

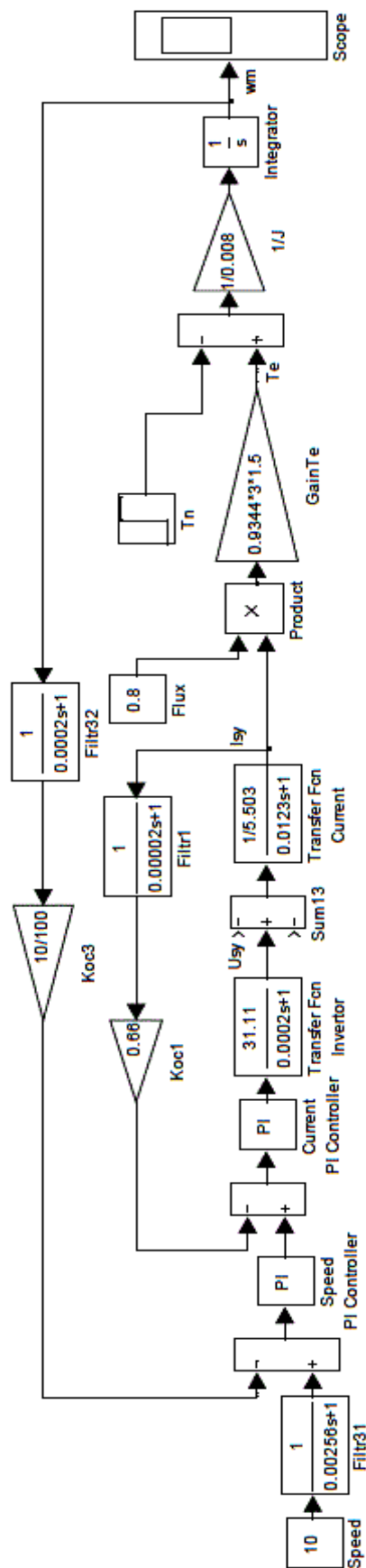


Рис. 7.18. Структура контура управления скоростью

Силовая часть двигателя, введенная в контур тока *Transfer Fcn Current*, представлена апериодическим звеном первого порядка с постоянной времени T'_s . Цепь обратной связи содержит фильтр *Filtr1*. В прямой цепи контура тока показан сумматор *Sum12*, через который вводятся возмущения, действующие от реального электропривода. В расчетной схеме возмущения исключены в предположении компенсации их при использовании астатического управления.

Внешний контур управляется регулятором потока *Flux PI Controller*. Выходной сигнал регулятора является входным для контура тока. Формирование магнитного потока в структуре асинхронного двигателя осуществляется апериодическим звеном первого порядка *Transfer Fcn Flux* с постоянной времени T_r . В прямую цепь контура потока введен фильтр *Filtr2* в предположении, что в реальном электроприводе поток будет вычисляться, так как прямого доступа к этому параметру нет.

Данная структура смоделирована в *Simulink*. В модель введены параметры, полученные ниже, и при желании можно наблюдать оптимальный процесс управления потоком.

Структура контура управления частотой вращения ротора представлена на рис. 7.18.

Структура включает два контура: внешний (главный) контур скорости и внутренний (подчиненный) контур тока. Управление процессом формирования тока статора во вращающейся системе координат по оси u ведет регулятор тока *Current PI Controller*. Ток в контуре I_{Sy} создается с помощью управляемого преобразователя (инвертора), представленного идеальным (непрерывным) апериодическим звеном первого порядка. Силовая часть двигателя, введенная в контур тока *Transfer Fcn Current*, представлена апериодическим звеном первого порядка с постоянной времени T'_s . Цепь обратной связи содержит фильтр *Filtr1*. В прямой цепи контура

тока показан сумматор *Sum13*, через который вводятся возмущения, действующие от реального электропривода. В расчетной схеме возмущения исключены в предположении компенсации их при использовании астатического управления. В отличие от контура потока характер возмущений другой, требующий запаса напряжения от инвертора.

Внешний контур управляется регулятором скорости *Speed PI Controller*. Выходной сигнал регулятора является входным для контура тока. Электромагнитный момент T_e создается током I_{Sy} после умножения его на поток и коэффициент *Gain* T_e . Для упрощения структуры поток введен в виде номинального значения. Формирование частоты вращения в структуре асинхронного двигателя осуществляется интегральным звеном *Integrator* с постоянной времени J . В прямую цепь контура скорости введен фильтр *Filtr31*, оптимизирующий переходный процесс в структуре при ступенчатом управлении. В цепь обратной связи контура скорости введен фильтр *Filtr32* в предположении, что в реальном электроприводе частота вращения будет вычисляться при безсенсорном управлении, либо формироваться от цифрового датчика положения.

7.5. Перечень контрольных вопросов к главе 7

1. Какими возможностями обладает графическая среда *Simulink* и пакет *MATLAB* для моделирования автоматизированного электропривода?
2. Для чего определяются параметры схемы замещения асинхронного электродвигателя по данным каталога?
3. Какие блоки включает в себя библиотека *Simulink*?
4. Из каких элементов строится модель асинхронного двигателя в пакете *MATLAB*?
5. Назовите основные параметры асинхронного электродвигателя.

6. Что такое явление самоиндукции?
7. Как строится вертикальная модель электрической машины в пакете *MATLAB*?
8. Охарактеризуйте структуру контура формирования потокоцепления (магнитного потока) ротора в пакете *MATLAB*.
9. Как осуществляется ввод параметров двигателя в пакете *MATLAB*?
10. Как определить тип электрической машины программы в *MATLAB Simulink*?
11. Как выглядит модель реверсивного электропривода переменного тока в пакете *MATLAB*?
12. Как моделируется мягкий частотный пуск и остановка асинхронного двигателя в пакете *MATLAB*?
13. Как производится настройка блоков управления модели электропривода переменного тока?
14. Опишите схему модели разомкнутого частотно-управляемого асинхронного электропривода в пакете *MATLAB*.
15. Как реализуется схема управления инвертором в *MATLAB*?
16. Как реализуется электропривод с векторным управлением и выполняются исследования на имитационных моделях в *MATLAB Simulink*?
17. В чем особенность реализации электропривода с векторным управлением в *Simulink*?
18. В каком виде представляются результаты моделирования пуска и остановки асинхронного электропривода в *MATLAB Simulink*?
19. Какие допущения применяются при создании имитационных моделей работы электропривода?
20. Как производится оптимизация процессов векторного управления асинхронным двигателем?

Список использованной литературы

1. Автоматизированный электропривод промышленных установок – под ред. Г. Б. Онищенко. – М. : РАСХН-2001. – 520 с.
2. *Алиев, И. И.* Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах : учеб. / И. И. Алиев. – М. : ИП РадиоСофт, 2004. – 128 с.
3. *Алиев, И. И.* Электрические машины : учеб. пособие / И. И. Алиев. – М. : ИП «РадиоСофт», 2011. – 446 с.
4. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – 3-е изд., испр. – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 576 с.
5. Автоматизированный электропривод : учеб. пособие / Ю. Н. Дементьев, А. Ю. Чернышев, И. А. Чернышев. – Томск : Издательство ТПУ, 2009. – 224 с.
6. Релейно-контакторные схемы управления : метод. указания для самостоятельной работы студентов по курсу «Системы управления электроприводами» / сост. П. В. Вилков. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина, 2009. – 40 с.
7. *Виноградов, А. Б.* Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.
8. *Епифанов, А. П.* Основы электропривода : учеб. пособие / А. П. Епифанов. – СПб. : Лань, 2009. – 191 с.
9. *Исаев, А. В.* Электромеханические системы. Электропривод : учеб. пособие / А. В. Исаев, Г. А. Косулин; ВолгГТУ. – Волгоград : РПК «Политехник», 2005. – 110 с.
10. Каталог электродвигателей / электронный ресурс; URL: <http://www.elektrodvigatel.net> (дата обращения: 05.05.2015).
11. Каталог электродвигателей / электронный ресурс; URL: http://www.roel-etk.ru/motors/mot_cat.shtml (дата обращения: 05.05.2015).
12. *Кацман, М. М.* Электрический привод : учеб. пособие / М. М. Кацман. – М. : Издательский центр «Академия», 2005. – 383 с.

13. *Кацман, М. М.* Справочник по электрическим машинам : учеб. пособие / М. М. Кацман. – М. : Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с.
14. *Козярук, А. Е.* Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов : учеб. / А. Е. Козярук, В. В. Рудаков. – СПб. : Санкт-Петербургская электротехническая компания, 2004. – 127 с.
15. *Лихачев, В. Л.* Электродвигатели асинхронные / В. Л. Лихачев. – М. : Соломон-Р, 2002. – 304 с.
16. *Михайлов, О. П.* Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов : учеб. для студ. машиностр. спец. вузов / О. П. Михайлов. – М. : Машиностроение, 1990. – 302 с.
17. *Москаленко, В. В.* Электрический привод : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / В. В. Москаленко. – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.
18. Применение преобразователей частоты для управления электроприводами / Д. М. Богданов. – Томский политехнический университет.
19. *Радимов, С. Н.* Частотно-регулируемый асинхронный электропривод : учеб. пособие / С. Н. Радимов ; Одесский национальный политехнический университет. – Одесса : Авторизованный учебный центр компании «Шнайдер электрик», 2007. – 38 с.
20. *Рудаков, В. В.* Системы управления электроприводов (прямое управление моментом в электроприводах переменного тока) : учеб. пособие / В. В. Рудаков, А. Е. Козярук ; Санкт-Петербургский государственный горный институт. – СПб. : Санкт-Петербургское науч. изд-во, 2007. – 75 с.
21. *Сергеев, А. С.* Основы автоматизированного электропривода : учеб. пособие / А. С. Сергеев, А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев ; ВолГГТУ. – Волгоград, 2013. – 114 с.
22. Системы автоматизированного управления электроприводами : учеб. пособие / Г. И. Гульков, Ю. Н. Петренко, Е. П. Раткевич, О. Л. Симоненкова ; под общ. ред. Ю. Н. Петренко. – 2-е изд., испр. и доп. – Минск : Новое знание, 2007. – 394 с.
23. *Соколовский, Г. Г.* Электроприводы переменного тока с частотным регулированием : учеб. / Г. Г. Соколовский. – М. : АCADEMA, 2006. – 265 с.
24. *Терехов, В. М.* Системы управления электроприводов : учеб. для вузов / В. М. Терехов, О. И. Осипов. – М. : Академия, 2006. – 299 с.
25. *Терёхин, В. Б.* Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1) : учеб. пособие / В. Б. Терёхин ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.

26. *Удут, Л. С.* Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. В 6 ч.: учеб. пособие / Л. С. Удут, О. П. Мальцева, Н. В. Кояин. – Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2007.

27. *Усынин, Ю. С.* Системы управления электроприводов : учеб. пособие / Ю. С. Усынин. – 2-е изд., испр. и доп. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328 с.

28. *Хоперскова, Л. В.* Электромеханические системы : учеб. пособие / Л. В. Хоперскова; ВолгГТУ. – Волгоград, 2002. – 69 с.

29. Электрические машины : Словарь-справочник / сост. В. А. Лавриненко. – Чебоксары, 2006. – 114 с.

30. Электроприводы: электродвигатели, устройства управления / электронный ресурс; URL: www.electroprivod.ru (дата обращения: 27.05.2015).

31. Электротехническая компания Электропривод / электронный ресурс; URL: www.e-privod.ru (дата обращения: 18.05.2015).

Учебное издание

Алексей Михайлович **Макаров**
Александр Сергеевич **Сергеев**
Евгений Геннадьевич **Крылов**
Юрий Павлович **Сердобинцев**

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Учебное пособие

Редактор *Н. Н. Кваша*

Темплан 2016 г. (учебники и учебные пособия). Поз. № 155.
Подписано в печать 26.05.2016. Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,6. Уч.-изд. л. 9,53.
Тираж 100 экз. Заказ

Волгоградский государственный технический университет.
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 1.

Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ.
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.