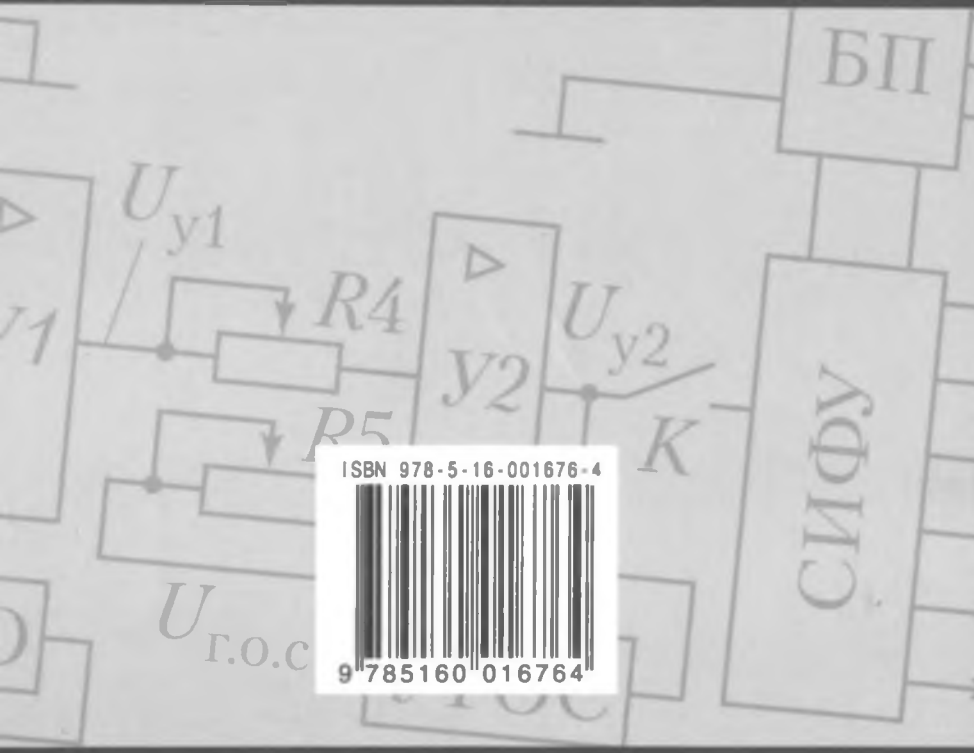
PDF Compressor Free Version

www.infra-m.ru



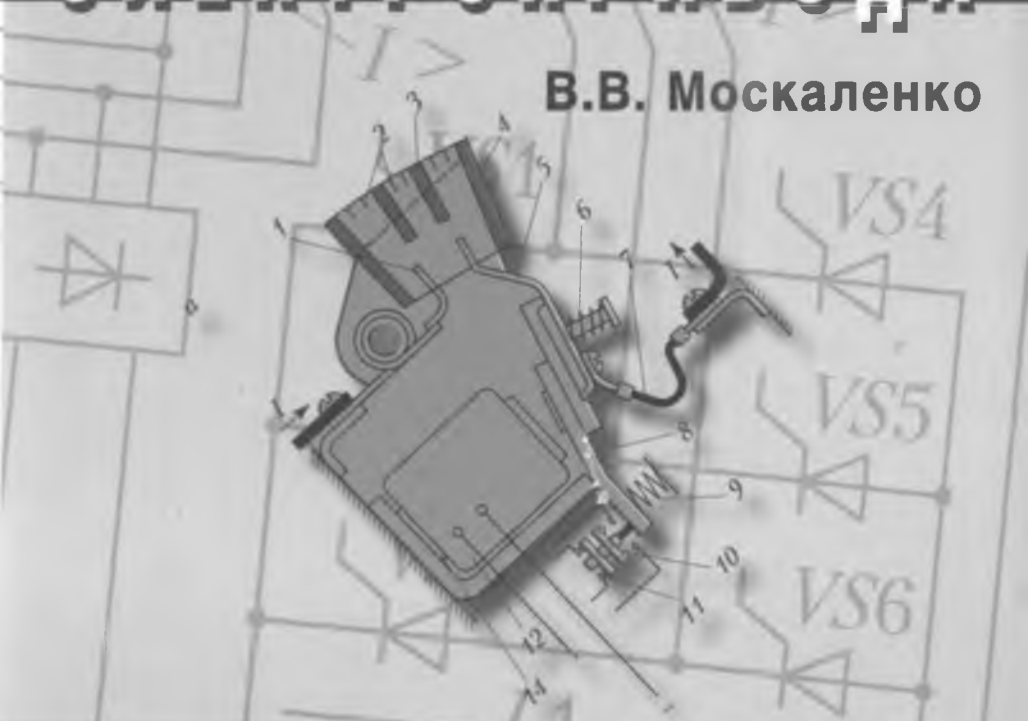
ISBN 978-5-16-001676-4
9 785160 016764

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

СРЕДНЕЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В.В. Москаленко



УЧЕБНИК

СРЕДНЕЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

PDF Compressor Free Version

В.В. МОСКАЛЕНКО

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УЧЕБНИК

Рекомендовано Государственным комитетом Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу в качестве учебника для студентов средних специальных учебных заведений, обучающихся по специальности 2913 «Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования промышленных и гражданских зданий»

Москва
ИНФРА-М
2007

УДК 62.83(075.8)
ББК 31.291я723
М 82

PDF Compressor Free Version

Москаленко В.В.

М 82 **Системы автоматизированного управления электропривода:** Учебник. — М.: ИНФРА-М, 2007. — 208 с. — (Среднее профессиональное образование).

ISBN 978-5-16-001676-4

Рассмотрены общие принципы построения и структуры систем управления электропривода. Приведено описание элементов и устройств схем управления, и рассмотрены разомкнутые и замкнутые схемы электроприводов с двигателями постоянного и переменного тока. Изложены вопросы применения электроприводов в системах автоматизации технологических процессов. Даны основные понятия и методы расчета и повышения надежности электроприводов.

Для студентов учебных заведений среднего профессионального образования.

УДК 62.83(075.8)
ББК 31.291я723

ISBN 978-5-16-001676-4

© Москаленко В.В., 2004

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 5
ВВЕДЕНИЕ 7

ГЛАВА 1
ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

1.1. Основные понятия, термины и определения 9
1.2. Понятие о регулировании координат (переменных) электропривода 12
1.3. Структуры и принципы построения схем управления электропривода 14

ГЛАВА 2
ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

2.1. Силовые полупроводниковые преобразователи электроэнергии 22
2.2. Электрические аппараты ручного и дистанционного управления 29
2.3. Аналоговые элементы и устройства управления 39
2.4. Дискретные элементы и устройства управления 44
2.5. Полупроводниковые логические элементы 47
2.6. Микропроцессорные средства управления 49
2.7. Датчики времени и координат электропривода 54
2.8. Электромагнитные муфты и тормозы 67
2.9. Защита, блокировки и сигнализация в электроприводах 70
2.10. Выбор силовых преобразователей, аппаратов управления, коммутации и защит 80

ГЛАВА 3
РАЗОМКНУТЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

3.1. Общая характеристика разомкнутых схем управления 87

3.2. Типовые узлы и схемы управления электроприводов с двигателями постоянного тока 88
3.3. Типовые узлы и схемы управления электроприводов с асинхронными двигателями 101
3.4. Типовые узлы и схемы управления электроприводов с синхронными двигателями 114

ГЛАВА 4
ЗАМКНУТЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

4.1. Общая характеристика замкнутых схем управления 119
4.2. Замкнутые схемы управления электропривода с двигателями постоянного тока 119
4.3. Замкнутые схемы управления электропривода с асинхронными двигателями 136
4.4. Замкнутые схемы управления электропривода с синхронными двигателями 146
4.5. Следящие электроприводы 155
4.6. Электроприводы с программным управлением 162
4.7. Электроприводы с адаптивным управлением 173
4.8. Комплектные и интегрированные электроприводы 175

ГЛАВА 5
ЭЛЕКТРОПРИВОД В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

5.1. Структуры систем автоматизации производства 179
5.2. Регулируемый электропривод как средство энергосбережения в технологических процессах 186
5.3. АСУ строительством 190

ГЛАВА 6
НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

6.1. Основные понятия и определения теории надежности 193
6.2. Методы расчета надежности электроприводов 195
6.3. Повышение надежности электроприводов 199

Список литературы 206

PDF Compressor Free Version

ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие и совершенствование современных технологических и производственных процессов в промышленности, сельском хозяйстве, строительстве и в других областях народного хозяйства характеризуются широким использованием средств автоматизации и комплексной механизации. Это позволяет освободить человека от однообразного и тяжелого физического труда, повысить производительность, надежность функционирования технологического оборудования и качество выпускаемой им продукции. Автоматические системы управления позволяют также заменить человека при работе технологического оборудования во вредных и опасных для его здоровья условиях окружающей среды — космосе, среде агрессивных газов, запыленных помещениях и т.д.

В общем случае автоматизация [1] — это применение технических средств, экономико-математических методов и систем управления, освобождающих человека частично или полностью от непосредственного участия в процессах получения, преобразования, передачи и использования энергии, материалов или информации. Автоматизироваться могут технологические процессы, научные и экспериментальные инженерные исследования, проектирование различных объектов, организация, планирование и управление различных предприятий и организаций. Предметной областью этой книги являются системы управления автоматизированного электропривода и выполняемые с его использованием системы автоматизации рабочих машин и механизмов и технологических комплексов.

Электрический привод (ЭП) является энергетической основой технологических и производственных процессов, которые реализуются за счет механической энергии. Приводя в движение исполнительные органы рабочих машин и механизмов и управляя этим движением с заданным качеством, ЭП обеспечивает добычу полезных ископаемых, изготовление и обработку различных изделий и материалов, перемещение людей и грузов и выполнение многих других технологических операций с наилучшими техническими и экономическими показателями. Тем самым современный ЭП представляет собой важнейшее устройство систем автоматического управления технологическими процессами.

Многообразие и сложность выполняемых ЭП функций, использование в его структурах новых, в первую очередь полупроводниковых элементов и устройств, постоянное увеличение числа и видов автоматизированных ЭП требуют высокого уровня подготовки специалистов, занимающихся их монтажом, наладкой и эксплуатацией. Они должны хорошо знать элементную базу автоматизированных ЭП, понимать основные принципы построения и работу разомкнутых и замкнутых схем управления ЭП, владеть информацией о комплектных и интегрированных ЭП, системах автоматического управления технологическими процессами и предприятиями. Важный элемент образования в этой сфере составляют и знания о надежности ЭП.

PDF Enhanced Trial Version

Книга написана в соответствии с Государственным образовательным стандартом среднего профессионального образования и Государственными требованиями к минимуму содержания и уровню подготовки выпускников по специальности 2913 «Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования промышленных и гражданских зданий», введенными в действие с 1 сентября 2002 г. В ней приводятся основные сведения из теории автоматического управления, рассматриваются элементная база ЭП и выполненные на ее основе разомкнутые и замкнутые схемы управления автоматизированного ЭП, а также автоматизация технологических процессов. В нее включены также сведения по надежности работы ЭП, методам ее расчета и повышения.

Изучение дисциплины «Системы автоматизированного управления электропривода» основывается на знаниях учащихся по информатике, теоретическим основам электротехники, основам электронной и микропроцессорной техники, электрическим машинам и основам электропривода. В книгу включен материал по силовой преобразовательной технике, электрическим аппаратам, элементам и устройствам систем управления, необходимый для лучшего понимания работы автоматизированного ЭП.

Для лучшего усвоения материала и освоения учащимися навыков практических расчетов книга содержит задачи и примеры их решения, а с целью проверки степени усвоения материала в конце каждой главы приведены контрольные вопросы.

ВВЕДЕНИЕ

В своей практической деятельности человек использует самые разнообразные технологические процессы и операции, реализация которых осуществляется с помощью различных рабочих машин и производственных механизмов. Во многих случаях для выполнения технологического процесса эти рабочие машины и механизмы объединяются в единый производственный комплекс, образуя предприятия различного назначения.

Характерной чертой совершенствования как отдельных рабочих машин, так и технологических комплексов в целом является автоматизация их работы, что позволяет повысить их производительность и качество выпускаемой продукции и обеспечить наилучшие показатели по экономичности и надежности при эксплуатации. Важным фактором является и то, что автоматизация позволяет освободить человека от тяжелого и однообразного труда, а во многих случаях обеспечить управление технологическими процессами с показателями, недоступными человеку по его физиологическим возможностям.

Примерами автоматизации отдельных рабочих машин и технологических комплексов могут служить автоматические линии и гибкие автоматизированные производства, числовое программное управление станками, системы автоматического поддержания угловой скорости вращения (далее в тексте — скорость вращения) двигателей, системы поддержания уровня жидкости в резервуаре и т.д.

Большое число рабочих машин и производственных механизмов: лифтов, конвейеров, насосов, подъемных кранов и т.д. — для выполнения технологических операций используют механическую энергию, которую они получают от ЭП. Приводя в движение исполнительные органы этих рабочих машин и механизмов: кабину лифта, ленту конвейера, рабочее колесо насоса, грузозахватное приспособление подъемного крана — и управляя этим движением, ЭП становится важнейшей частью общей схемы автоматизации, от функционирования которой зависит в конечном итоге качество реализации технологических процессов.

Характерной чертой развития современного ЭП является постоянное расширение и усложнение выполняемых им функций, что в первую очередь достигается за счет все более широкого использования регулируемых и автоматизированных ЭП. Их применение позволяет повысить качественные и количественные показатели технологических процессов, увеличить надежность функционирования технологического оборудования и самого ЭП, улучшить условия работы обслуживающего персонала.

PDF Complete Free Version

Глава 1
ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Управление представляет собой организацию того или иного процесса, которая обеспечивает достижение определенных целей.

Система управления — совокупность всех устройств, обеспечивающих управление каким-либо объектом или процессом. Если управление осуществляется без непосредственного участия человека, то система управления называется *автоматической. Систему автоматического управления* (САУ) *образуют устройство управления и объект управления.*

Если отдельные операции управления осуществляет человек или группа людей, то такие системы управления называются автоматизированными. Для выполнения этих операций человек должен получать информацию о процессе управления и иметь в своем распоряжении соответствующие органы управления объектом или процессом.

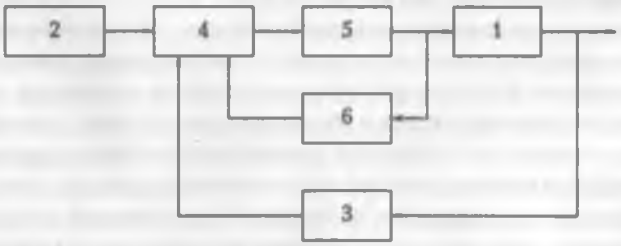


Рис. 1.1. Схема системы автоматического управления

Обобщенная схема САУ показана на рис. 1.1. На ней обозначены: *1* — объект управления; *2* — источник информации о задачах управления; *3* — устройства информации о ходе и результатах управления; *4* — устройство обработки информации и выработки сигнала управления; *5* — исполнительное устройство;

б — устройства информации о функционировании исполнительного устройства.

PDF Compressor Free Version

В некоторых случаях задачей управления является обеспечение постоянства некоторой физической переменной: температуры, скорости вращения, давления — или ее изменение во времени по некоторому закону. Такой частный вид управления обычно называется *регулированием*. *Система автоматического регулирования* (САР) по аналогии с системой автоматического *управления* состоит из *регулируемого объекта* и *регулятора*. В состав систем автоматического регулирования, кроме регулятора, входят и другие необходимые для их функционирования устройства. К ним относятся:

- датчики регулируемых переменных, с помощью которых получают информацию об их текущих значениях;
- задатчики регулируемых переменных, с помощью которых системе задается требуемый уровень регулируемой переменной;
- измерительные устройства, с помощью которых определяется отклонение текущего (фактического) значения регулируемой переменной от ее заданного значения;
- устройства сопряжения, позволяющие соединить все элементы и устройства системы регулирования в единый комплекс.

Помимо этого, в состав системы регулирования входят элементы и устройства, обеспечивающие защиту, блокировки и сигнализацию при ее работе, а в современных системах регулирования — дополнительно тестирование, диагностику и резервирование.

Различают следующие виды САР:

- *системы автоматической стабилизации*, обеспечивающие поддержание регулируемой величины на заданном уровне с требуемой точностью. К таким системам относятся, например, системы поддержания температуры в нагревательной печи, система регулирования скорости вращения двигателей и многие другие. Системы стабилизации делятся на астатические и статические. *Астатические системы стабилизации* обеспечивают поддержание регулируемой переменной в статическом режиме на неизменном уровне при изменениях возмущающего воздействия. *Статическими системами* называются такие, в которых в установившемся режиме происходит изменение регулируемой переменной при изменении возмущающего воздействия. Другими словами, астатические САР обеспечивают регулирование переменных в установившемся режиме без ошибки, т.е. осуществляют регулирование переменной строго с заданным уровнем, а статические САР — с некоторой ошибкой;

• *следящие системы*, которые осуществляют изменение регулируемой величины во времени по произвольному закону. Примерами такой системы могут служить системы слежения локатором за целью или система радиоантенны, обеспечивающая связь с космическими объектами;

• *системы программного регулирования*, которые обеспечивают изменение регулируемой переменной во времени по определенной программе. К таким системам относятся, в частности, системы числового программного управления станками;

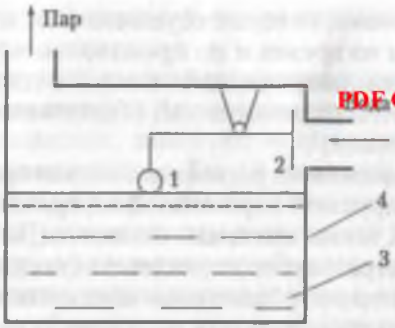
• *системы адаптации*, обеспечивающие оптимальное регулирование переменной по заданному показателю качества при изменяющихся условиях работы объекта регулирования. К таким системам относятся *самонастраивающиеся, самоорганизующиеся и самообучающиеся системы.*

Системы с одним входным каналом и одной регулируемой (выходной) переменной носят название *одномерных*, а с несколькими входными и несколькими выходными — *многомерными.*

Объект управления (регулирования) при его функционировании подвергается различным воздействиям. Со стороны системы управления на него действует *управляющее (регулирующее) воздействие*, обеспечивающее требуемое регулирование заданной переменной.

Со стороны окружающей среды и сопредельных объектов и систем объект подвергается различным *возмущающим воздействиям*, которые могут иметь как определенный, так и случайный характер. К возмущающим воздействиям обычно относят и различные аварийные ситуации: исчезновение или колебания питающего напряжения, поломку в рабочей машине, выход из строя элемента системы управления и т.д. Основная задача систем управления состоит именно в том, чтобы при всех возможных возмущающих воздействиях, действующих на объект управления, обеспечить должным образом его управление.

Первые системы автоматического регулирования практического применения появились в XVIII в. и использовались для автоматизации работы паровых машин. Схема на рис. 1.2 иллюстрирует работу автоматического регулятора уровня воды в паровом котле паровой машины И.И. Ползунова. Уровень воды в котле определяется с помощью поплавка *1*, с которым связана заслонка *2*, регулирующая доступ воды *3* в котел *4*. При увеличении отбора пара уровень воды в котле падает, поплавок опускается вниз, заслонка перемещается вверх и приток воды в котел увеличивается. По мере восстановления необходимого уровня воды в котле доступ воды в котел уменьшается.



PDF Compressor Free Version

Рис. 1.2. Система автоматического регулирования уровня воды

Другим примером регулирования работы паровых машин служит центробежный регулятор скорости вращения вала паровой машины, который обеспечивал ее поддержание за счет изменения подачи пара в машину. Оба типа таких регуляторов, будучи усовершенствованными, широко используются и в настоящее время.

1.2. ПОНЯТИЕ О РЕГУЛИРОВАНИИ КООРДИНАТ (ПЕРЕМЕННЫХ) ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Для управления движением исполнительных органов рабочих машин и производственных механизмов и обеспечения требуемых режимов самого ЭП необходимо регулирование ряда переменных, например скорости, ускорения и положения исполнительного органа рабочей машины, токов в цепях двигателей, момента на их валу, магнитного потока электрических машин и т.д.

Типичным примером регулирования переменных, которые в ЭП часто называют координатами, может служить ЭП пассажирского лифта. При пуске и остановке кабины лифта для обеспечения комфортности пассажиров ускорение и замедление ее движения не должны быть выше допустимого уровня. Перед остановкой скорость кабины должна снижаться, т.е. она должна регулироваться. Пониженная скорость движения кабины требуется и для осуществления наладки или ревизии электрооборудования лифта. И наконец, кабина с заданной точностью должна останавливаться на требуемом этаже, т.е. необходимо обеспечивать заданное положение (позиционирование) кабины лифта. Такое управление движением кабины лифта обеспечивается за счет регулирования соответствующих координат (переменных) ЭП лифта.

При изготовлении бумаги, тканей, кабельных изделий, различных пленок, прокатке металлов требуется обеспечение определен-

ного натяжения этих материалов, что также осуществляется с помощью ЭП. Регулирования координат требуют и многие другие рабочие машины и механизмы: подъемные краны, металлообрабатывающие станки, транспортеры, насосные агрегаты, роботы и манипуляторы и т.д.

Кроме этого, и при работе самого ЭП необходимо обеспечить определенные допустимые режимы работы его элементов. Так, например, при пуске, реверсе или торможении двигателей часто требуется ограничивать их токи до допустимых уровней.

Процесс регулирования этих и других координат всегда связан с целенаправленным воздействием на двигатель, что и должна обеспечивать его система управления.

Регулирование скорости движения исполнительных органов рабочих машин и механизмов может осуществляться с помощью ЭП в виде стабилизации скорости, изменения скорости в соответствии с произвольно меняющимся задающим сигналом (слежение) или по заранее заданной программе (программное движение).

Регулирование положения характеризуется процессом перемещения исполнительных органов рабочих машин и механизмов в заданную точку пространства или плоскости и их установку там (фиксирование) с заданной точностью. Такое их перемещение из одной точки плоскости или пространства (позиции) в другую называется позиционированием и обеспечивается соответствующим регулированием положения вала двигателя.

Регулирование момента и тока двигателей производится в тех случаях, когда ЭП должен обеспечивать требуемое ускорение или замедление движения исполнительных органов или создавать необходимое натяжение в обрабатываемом материале или изделии.

Сюда же относятся и случаи, когда требуется ограничивать момент ЭП для предотвращения поломки рабочей машины или механизма при внезапном стопорении движения исполнительного органа (например, при копании грунта, бурении скважин, заклинивании механической передачи и т.д.).

Регулирование (ограничение) тока и момента двигателей требуется также для обеспечения нормальных условий работы самих двигателей. Так, при пуске двигателей постоянного тока обычного исполнения по соображениям нормальной работы их коллекторно-щеточного узла ток должен быть ограничен на уровне 2...3 $I_{ном}$. Необходимость ограничения тока возникает и при пуске мощных двигателей постоянного и переменного тока, когда большие пусковые токи двигателей могут привести к недопустимому снижению напряжения питающей сети.

1.3. СТРУКТУРЫ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

ABBYY FineReader 14 Corporate Edition

Система управления ЭП является его составной частью. В соответствии со структурной схемой ЭП, представленной на рис. 1.3, и содержащимся в ГОСТ Р 50869-92 [10] определением в состав ЭП *6* входит электрический двигатель *1*, который вырабатывает механическую энергию *МЭ* за счет потребляемой от источника *3* электрической энергии *ЭЭ*. Параметры и объемы поступающей на двигатель энергии регулируются силовым преобразователем электроэнергии *2*, за счет чего обеспечивается управление двигателем.

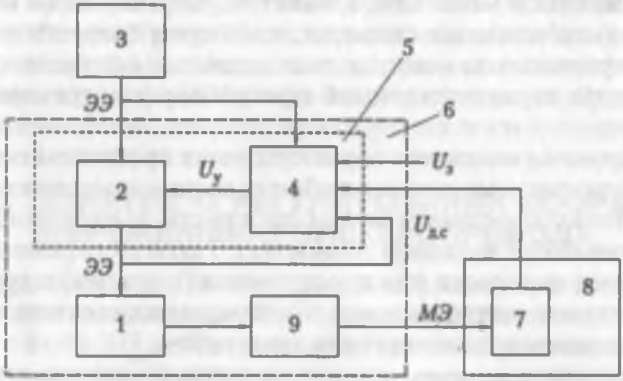


Рис. 1.3. Схема управления электропривода

Сигнал управления U_y силовым преобразователем вырабатывается устройством управления *4*, в состав которого в общем случае входят устройства получения, преобразования, хранения, распределения и выдачи информации, блоки сопряжения, регуляторы переменных (координат), различные функциональные блоки управления и т.д. Устройство управления *4* и преобразователь *2* образуют систему управления электропривода *5*.

Устройство управления *4* вырабатывает сигнал управления U_y с помощью сигнала задания (уставки) $U_з$, задающего характер движения исполнительного органа 7 рабочей машины 8, и ряда дополнительных сигналов $U_{вс}$, дающих информацию о реализации технологического процесса рабочей машины, характере движения исполнительного органа, работе отдельных элементов ЭП, возникновении аварийных ситуаций и т.д. Эти сигналы поступают на

устройство управления от различных датчиков, которые на рис. 1.3 не показаны.

Сигнал задания (уставки) $U_з$ электропривод получает от внешней по отношению к нему системы управления более высокого уровня, например автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП). Тем самым следует различать систему управления электропривода как его составную часть и систему управления электроприводом (электроприводами), являющуюся внешней для ЭП системой и поставляющую электроприводу необходимую для его функционирования информацию.

В некоторых ЭП функции регулирования координат (обычно скорости вращения) ЭП выполняет механическая передача *9*, которая в этом случае может представлять собой электромагнитную или гидравлическую управляемые муфты, вариатор скорости, коробку передач.

В зависимости от выполняемых функций, вида и количества регулируемых координат и степени автоматизации технологических процессов реализация ЭП может быть самой разнообразной (рис. 1.4).

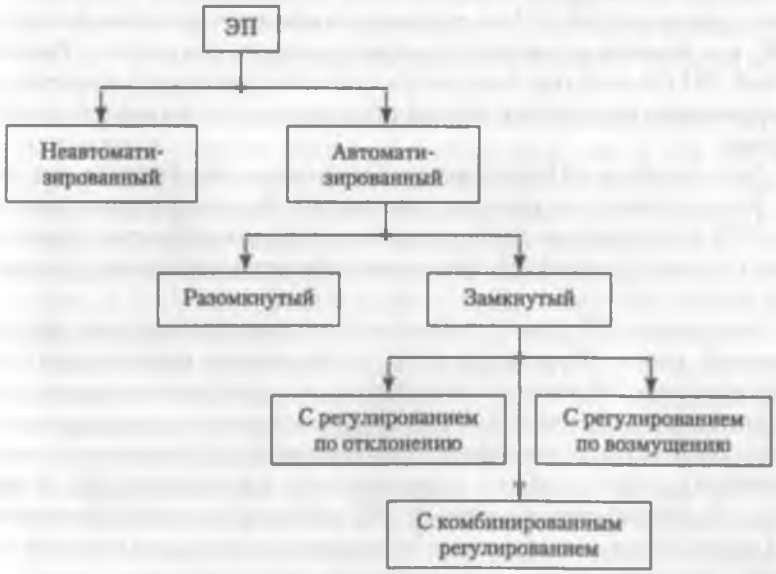


Рис. 1.4. Виды электроприводов

1.3. СТРУКТУРЫ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Система управления ЭП является его составной частью. В соответствии со структурной схемой ЭП, представленной на рис. 1.3, и содержащимся в ГОСТ Р 50869-92 [10] определением в состав ЭП *6* входит электрический двигатель *1*, который вырабатывает механическую энергию *МЭ* за счет потребляемой от источника *3* электрической энергии *ЭЭ*. Параметры и объемы поступающей на двигатель энергии регулируются силовым преобразователем электроэнергии *2*, за счет чего обеспечивается управление двигателем.

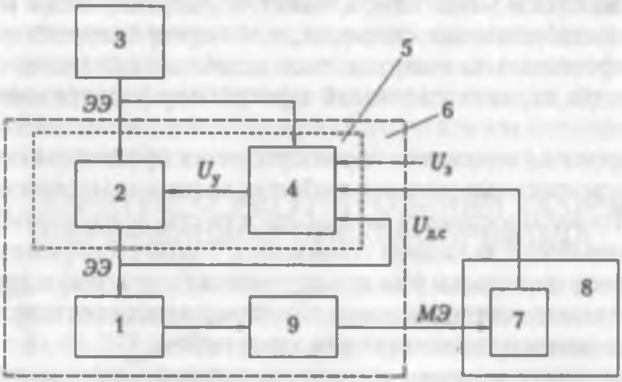


Рис. 1.3. Схема управления электропривода

Сигнал управления $U_у$ силовым преобразователем вырабатывается устройством управления *4*, в состав которого в общем случае входят устройства получения, преобразования, хранения, распределения и выдачи информации, блоки сопряжения, регуляторы переменных (координат), различные функциональные блоки управления и т.д. Устройство управления *4* и преобразователь *2* образуют систему управления электропривода *5*.

Устройство управления *4* вырабатывает сигнал управления $U_у$ с помощью сигнала задания (уставки) $U_з$, задающего характер движения исполнительного органа 7 рабочей машины 8, и ряда дополнительных сигналов $U_{д.с}$, дающих информацию о реализации технологического процесса рабочей машины, характере движения исполнительного органа, работе отдельных элементов ЭП, возникновении аварийных ситуаций и т.д. Эти сигналы поступают на

устройство управления от различных датчиков, которые на рис. 1.3 не показаны.

Сигнал задания (уставки) $U_з$ электропривод получает от внешней по отношению к нему системы управления более высокого уровня, например автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП). Тем самым следует различать систему управления электропривода как его составную часть и систему управления электроприводом (электроприводами), являющуюся внешней для ЭП системой и поставляющую электроприводу необходимую для его функционирования информацию.

В некоторых ЭП функции регулирования координат (обычно скорости вращения) ЭП выполняет механическая передача *9*, которая в этом случае может представлять собой электромагнитную или гидравлическую управляемые муфты, вариатор скорости, коробку передач.

В зависимости от выполняемых функций, вида и количества регулируемых координат и степени автоматизации технологических процессов реализация ЭП может быть самой разнообразной (рис. 1.4).

Рис. 1.4. Виды электроприводов

Все ЭП делятся на две группы: неавтоматизированные и автоматизированные.

Неавтоматизированные — это такие ЭП, управление которыми выполняет человек (оператор) с помощью простых средств. Он осуществляет пуск и остановку ЭП, изменение скорости и ее реверсирование в соответствии с заданным технологическим циклом. Для помощи оператору ЭП снабжен необходимыми элементами защиты, блокировок и сигнализации.

PDF Compressor Free Version

В *автоматизированном* ЭП операции управления в соответствии с требованиями технологического процесса выполняются системой управления (см. рис. 1.3). На оператора возлагаются функции по включению и отключению ЭП, наладке и контролю за его работой (отметим еще раз, что при работе ЭП в общем комплексе автоматизированного производства внешние команды поступают от управляющих устройств более высокого уровня, например АСУ производством).

Все автоматизированные ЭП делятся, в свою очередь, еще на две группы: разомкнутые и замкнутые. Рассмотрим характерные признаки работы этих ЭП на примере регулирования скорости ЭП.

Работа *разомкнутого* ЭП характеризуется тем, что все внешние возмущения — в рассматриваемом примере момент нагрузки — влияют на выходную координату ЭП — его скорость. Другими словами, разомкнутый ЭП не отстроен от влияния внешних возмущений, все изменения которых отражаются на его работе. Разомкнутый ЭП по этой причине не обеспечивает высокого качества регулирования координат, хотя и отличается в то же время простой схемой.

Разомкнутые ЭП обычно применяются для обеспечения пуска, торможения или реверса двигателей. В схемах управления таких ЭП используется информация о текущих скорости, времени, тока (момента) или пути, что позволяет автоматизировать указанные процессы.

Замкнутый ЭП, как и любая система автоматического регулирования, может быть реализован по принципу отклонения с использованием обратных связей или по принципу компенсации внешнего возмущения. Основным отличительным признаком замкнутых систем является полное или частичное устранение влияния внешнего возмущения на регулируемую координату ЭП. В силу этого обстоятельства замкнутый ЭП обеспечивает более качественное управление движением исполнительного органа рабочей машины, хотя его схемы оказываются более сложными.

Принцип компенсации иллюстрирует рис. 1.5, *а*. Основным признаком такой замкнутой структуры ЭП является наличие цепи, по

которой на вход ЭП вместе с задающим сигналом скорости $U_{зс}$ подается сигнал $U_м = k_м M_с$, содержащий информацию о моменте сопротивления (нагрузке) $M_с$. В результате этого управление ЭП осуществляется сигналом $U_Δ$, который автоматически изменяется в нужную сторону при колебаниях момента нагрузки, обеспечивая с помощью системы управления поддержание скорости вращения ω ЭП на заданном уровне.

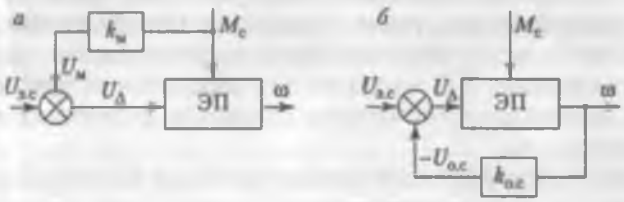


Рис. 1.5. Замкнутые структуры электропривода:
а — схема с компенсацией внешнего возмущения;
б — схема с обратной связью

Электроприводы по схеме рис. 1.5, *а* выполняются относительно редко из-за отсутствия простых и надежных датчиков момента нагрузки $M_с$ и других возмущающих воздействий и необходимости вводить соответствующие каналы информации по всем возможным возмущениям.

В связи с этим подавляющее большинство замкнутых структур ЭП используют *принцип отклонения (обратной связи)*. Он характеризуется наличием цепи обратной связи, соединяющей выход ЭП с его входом, откуда и пошло название замкнутых схем. Применительно к рассматриваемому примеру регулирования скорости признаком этой замкнутой структуры является цепь обратной связи (рис. 1.5, *б*), по которой информация о текущем значении скорости, сигнал обратной связи $U_{ос} = k_{ос}\omega$, подается на вход ЭП, где он вычитается из сигнала задания скорости $U_{зс}$. Управление осуществляется сигналом отклонения $U_Δ = U_{зс} - U_{ос}$ (его также называют сигналом рассогласования или ошибки). Этот сигнал при отличии фактической скорости от заданного уровня автоматически изменяется необходимым образом и устраняет (частично или полностью) с помощью системы управления ЭП эти отклонения. Тем самым управление скоростью осуществляется с учетом результата управления.

Если требуется регулирование других координат ЭП или технологического процесса, то используются обратные связи по этим

Все ЭП делятся на две группы: неавтоматизированные и автоматизированные.

PDF Compressor Free Version

Неавтоматизированные — это такие ЭП, управление которыми выполняет человек (оператор) с помощью простых средств. Он осуществляет пуск и остановку ЭП, изменение скорости и ее реверсирование в соответствии с заданным технологическим циклом. Для помощи оператору ЭП снабжен необходимыми элементами защиты, блокировок и сигнализации.

В *автоматизированном* ЭП операции управления в соответствии с требованиями технологического процесса выполняются системой управления (см. рис. 1.3). На оператора возлагаются функции по включению и отключению ЭП, наладке и контролю за его работой (отметим еще раз, что при работе ЭП в общем комплексе автоматизированного производства внешние команды поступают от управляющих устройств более высокого уровня, например АСУ производством).

Все автоматизированные ЭП делятся, в свою очередь, еще на две группы: разомкнутые и замкнутые. Рассмотрим характерные признаки работы этих ЭП на примере регулирования скорости ЭП.

Работа *разомкнутого* ЭП характеризуется тем, что все внешние возмущения — в рассматриваемом примере момент нагрузки — влияют на выходную координату ЭП — его скорость. Другими словами, разомкнутый ЭП не отстроен от влияния внешних возмущений, все изменения которых отражаются на его работе. Разомкнутый ЭП по этой причине не обеспечивает высокого качества регулирования координат, хотя и отличается в то же время простой схемой.

Разомкнутые ЭП обычно применяются для обеспечения пуска, торможения или реверса двигателей. В схемах управления таких ЭП используется информация о текущих скорости, времени, тока (момента) или пути, что позволяет автоматизировать указанные процессы.

Замкнутый ЭП, как и любая система автоматического регулирования, может быть реализован по принципу отклонения с использованием обратных связей или по принципу компенсации внешнего возмущения. Основным отличительным признаком замкнутых систем является полное или частичное устранение влияния внешнего возмущения на регулируемую координату ЭП. В силу этого обстоятельства замкнутый ЭП обеспечивает более качественное управление движением исполнительного органа рабочей машины, хотя его схемы оказываются более сложными.

Принцип компенсации иллюстрирует рис. 1.5, *а*. Основным признаком такой замкнутой структуры ЭП является наличие цепи, по

которой на вход ЭП вместе с задающим сигналом скорости $U_{зс}$ подается сигнал $U_м = k_м M_с$, содержащий информацию о моменте сопротивления (нагрузке) $M_с$. В результате этого управление ЭП осуществляется сигналом $U_Δ$, который автоматически изменяется в нужную сторону при колебаниях момента нагрузки, обеспечивая с помощью системы управления поддержание скорости вращения ω ЭП на заданном уровне.

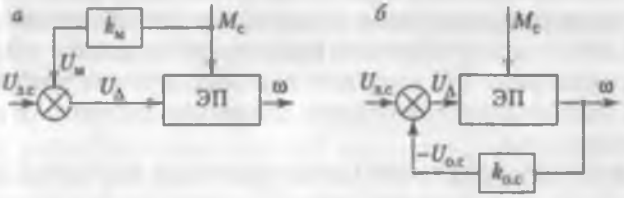


Рис. 1.5. Замкнутые структуры электропривода:
а — схема с компенсацией внешнего возмущения;
б — схема с обратной связью

Электроприводы по схеме рис. 1.5, *а* выполняются относительно редко из-за отсутствия простых и надежных датчиков момента нагрузки $M_с$ и других возмущающих воздействий и необходимости вводить соответствующие каналы информации по всем возможным возмущениям.

В связи с этим подавляющее большинство замкнутых структур ЭП используют *принцип отклонения (обратной связи)*. Он характеризуется наличием цепи обратной связи, соединяющей выход ЭП с его входом, откуда и пошло название замкнутых схем. Применительно к рассматриваемому примеру регулирования скорости признаком этой замкнутой структуры является цепь обратной связи (рис. 1.5, *б*), по которой информация о текущем значении скорости, сигнал обратной связи $U_{ос} = k_{ос}ω$, подается на вход ЭП, где он вычитается из сигнала задания скорости $U_{зс}$. Управление осуществляется сигналом отклонения $U_Δ = U_{зс} - U_{ос}$ (его также называют сигналом рассогласования или ошибки). Этот сигнал при отличии фактической скорости от заданного уровня автоматически изменяется необходимым образом и устраняет (частично или полностью) с помощью системы управления ЭП эти отклонения. Тем самым управление скоростью осуществляется с учетом результата управления.

Если требуется регулирование других координат ЭП или технологического процесса, то используются обратные связи по этим

координатам. В дальнейшем изложении именно таким замкнутым системам уделено основное внимание.

PDF Compressor Free Version

Все виды применяемых в замкнутом ЭП обратных связей делятся на положительные и отрицательные, линейные и нелинейные, жесткие и гибкие. *Положительной* называется такая обратная связь, сигнал которой направлен согласно (складывается) с задающим сигналом, в то время как сигнал *отрицательной* связи направлен ему встречно (знак «минус» на рис. 1.5, *б*).

Жесткая обратная связь характеризуется тем, что она действует как в установившемся, так и переходном (динамическом) режиме ЭП. Сигнал *гибкой* обратной связи вырабатывается только в переходных режимах ЭП и служит для обеспечения требуемого их качества, например устойчивости движения, допустимого перерегулирования и т.д.

Линейная обратная связь характеризуется пропорциональной зависимостью между регулируемой координатой и сигналом обратной связи, в то время как при реализации *нелинейной* связи эта зависимость, соответственно, нелинейна.

В зависимости от вида регулируемой координаты в ЭП используются все названные выше связи по скорости, положению, току, напряжению, магнитному потоку, ЭДС.

Во многих случаях требуется обеспечивать регулирование нескольких координат ЭП, например тока (момента) и скорости двигателя. В этом случае замкнутые ЭП выполняются по одной из следующих структурных схем.

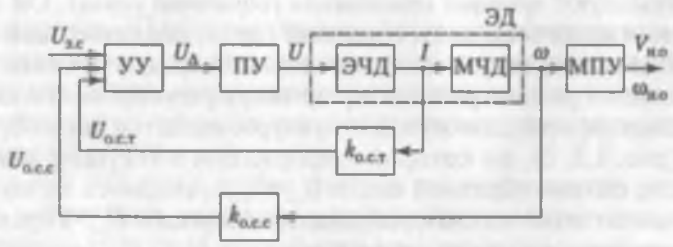


Рис. 1.6. Схема с общим усилителем

Схема с общим усилителем (рис. 1.6). Для удобства описания работы схемы двигатель *ЭД* условно представлен двумя частями: электрической *ЭЧД* и механической *МЧД*. Схема предназначена для регулирования двух координат: тока I и скорости двигателя ω, а тем самым и скорости движения исполнительного органа $\omega_{и.о}$ или $V_{и.о}$. В этой схеме сигналы обратных связей по току $U_{о.т}$ и скорости $U_{о.с}$

подаются на вход управляющего устройства *УУ*, где вместе с зада ющим сигналом скорости $U_{зс}$ алгебраически суммируются. Сигна ошибки U_{Δ} далее подается на вход преобразователя *ПУ*, которы своим выходным напряжением U управляет двигателем *ЭД*. Схем отличается простотой реализации, но не позволяет регулироват координаты ЭП независимо друг от друга.

В этой схеме за счет использования нелинейных обратных свя зей, называемых в теории ЭП отсечками, удается в некотором диапазоне изменения координат осуществлять их независимо регулирование, что частично устраняет указанный недостаток.

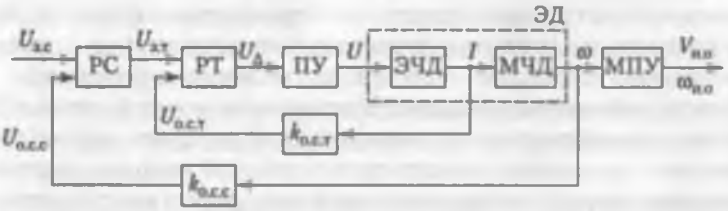


Рис. 1.7. Схема с подчиненным регулированием координат

Схема с подчиненным регулированием координат (рис. 1.7). Эта схема отличается от предыдущей тем, что в ней регулирование каждой координаты осуществляется своими регуляторами — тока *РТ* и скорости *РС*, которые вместе с соответствующими обратными связями образуют замкнутые контуры. Они располагаются таким образом, что входным, задающим сигналом для внутреннего контура тока $U_{зт}$ является выходной сигнал внешнего по отношению к нему контура скорости. Таким образом, внутренний контур тока подчинен внешнему контуру скорости — основной регулируемой координаты ЭП.

Основное достоинство такой схемы заключается в возможности оптимальной настройки регулирования каждой координаты, в силу чего она находит в настоящее время основное применение в ЭП. Кроме того, подчинение контура тока контуру скорости позволяет простыми средствами осуществлять ограничение тока и момента, для чего необходимо лишь ограничить на соответствующем уровне сигнал на выходе регулятора скорости.

При необходимости регулировать положение вала двигателя в схемы рис. 1.6 и 1.7 вводится соответствующая обратная связь по положению вала двигателя или исполнительного органа.

координатам. В дальнейшем изложении именно таким замкнутым системам уделено основное внимание.

PDF Compressor Free Version

Все виды применяемых в замкнутом ЭП обратных связей делятся на положительные и отрицательные, линейные и нелинейные, жесткие и гибкие. *Положительной* называется такая обратная связь, сигнал которой направлен согласно (складывается) с задающим сигналом, в то время как сигнал *отрицательной* связи направлен ему встречно (знак «минус» на рис. 1.5, *б*).

Жесткая обратная связь характеризуется тем, что она действует как в установившемся, так и переходном (динамическом) режиме ЭП. Сигнал *гибкой* обратной связи вырабатывается только в переходных режимах ЭП и служит для обеспечения требуемого их качества, например устойчивости движения, допустимого перерегулирования и т.д.

Линейная обратная связь характеризуется пропорциональной зависимостью между регулируемой координатой и сигналом обратной связи, в то время как при реализации *нелинейной* связи эта зависимость, соответственно, нелинейна.

В зависимости от вида регулируемой координаты в ЭП используются все названные выше связи по скорости, положению, току, напряжению, магнитному потоку, ЭДС.

Во многих случаях требуется обеспечивать регулирование нескольких координат ЭП, например тока (момента) и скорости двигателя. В этом случае замкнутые ЭП выполняются по одной из следующих структурных схем.

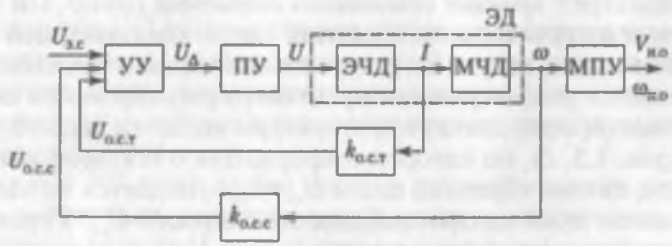


Рис. 1.6. Схема с общим усилителем

Схема с общим усилителем (рис. 1.6). Для удобства описания работы схемы двигатель *ЭД* условно представлен двумя частями: электрической *ЭЧД* и механической *МЧД*. Схема предназначена для регулирования двух координат: тока I и скорости двигателя ω, а тем самым и скорости движения исполнительного органа $\omega_{н.о}$ или $V_{н.о}$. В этой схеме сигналы обратных связей по току $U_{о.с.т}$ и скорости $U_{о.с.с}$

подаются на вход управляющего устройства *УУ*, где вместе с задающим сигналом скорости $U_{зс}$ алгебраически суммируются. Сигнал ошибки U_{Δ} далее подается на вход преобразователя *ПУ*, который своим выходным напряжением U управляет двигателем *ЭД*. Схема отличается простотой реализации, но не позволяет регулировать координаты ЭП независимо друг от друга.

В этой схеме за счет использования нелинейных обратных связей, называемых в теории ЭП отсечками, удается в некотором диапазоне изменения координат осуществлять их независимое регулирование, что частично устраняет указанный недостаток.

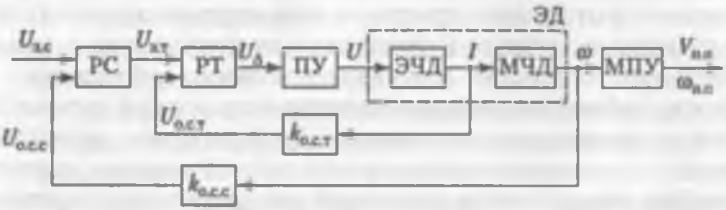


Рис. 1.7. Схема с подчиненным регулированием координат

Схема с подчиненным регулированием координат (рис. 1.7). Эта схема отличается от предыдущей тем, что в ней регулирование каждой координаты осуществляется своими регуляторами — тока *РТ* и скорости *РС*, которые вместе с соответствующими обратными связями образуют замкнутые контуры. Они располагаются таким образом, что входным, задающим сигналом для внутреннего контура тока $U_{зт}$ является выходной сигнал внешнего по отношению к нему контура скорости. Таким образом, внутренний контур тока подчинен внешнему контуру скорости — основной регулируемой координаты ЭП.

Основное достоинство такой схемы заключается в возможности оптимальной настройки регулирования каждой координаты, в силу чего она находит в настоящее время основное применение в ЭП. Кроме того, подчинение контура тока контуру скорости позволяет простыми средствами осуществлять ограничение тока и момента, для чего необходимо лишь ограничить на соответствующем уровне сигнал на выходе регулятора скорости.

При необходимости регулировать положение вала двигателя в схемы рис. 1.6 и 1.7 вводится соответствующая обратная связь по положению вала двигателя или исполнительного органа.

В общем случае состояние ЭП определяется набором переменных, к числу которых относятся токи и момент двигателя, скорости и положение элементов ЭП и исполнительного органа рабочей машины и ряд других. Эти переменные в ЭП обычно называются переменными состояния. Наилучшее качество управления в ЭП получается в том случае, когда осуществляется регулирование каждой переменной по заданному критерию. Такое управление в ЭП получило название *модального*.

PDF Compressor Free Version

Однако на пути реализации такого управления часто возникают технические и экономические трудности, связанные с необходимостью установки большого числа датчиков переменных, что усложняет ЭП и удорожает его стоимость. Поэтому в современных ЭП часто отказываются от прямого измерения переменных состояния с помощью различных датчиков и переходят к их вычислению с помощью специального устройства, получившего название *наблюдателя*.

Основу наблюдателя образует совокупность моделей звеньев ЭП — двигателя, преобразователя, механической передачи, устройств управления — и исполнительного органа рабочей машины, выполненных на базе операционных усилителей или средств микропроцессорной техники. Выходные сигналы (напряжения) этих моделей отражают приближенные значения переменных или, как говорят, дают оценку реальных значений переменных, поскольку модели не учитывают реальных возмущений, действующих на ЭП и рабочую машину, нестабильности параметров ЭП и влияния других факторов функционирования ЭП.

Для повышения точности получаемых оценок переменных состояния значение выходной регулируемой переменной ЭП сравнивают с помощью обратной связи с ее оценкой по полной модели ЭП и исполнительного органа и затем в функции выявленной разницы (ошибки) корректируют показания отдельных моделей. Совокупность полной модели и обратной связи по выходной регулируемой переменной ЭП образует *наблюдающее устройство*.

Рассмотренные выше схемы отражают структуру системы управления отдельного ЭП. Многие технологические процессы предусматривают объединение в единый комплекс нескольких рабочих машин и механизмов, должным образом между собой взаимодействующих. Наилучший результат работы такого единого технологического комплекса достигается только при его автоматизации, в чем ЭП принадлежит основная роль. За счет соответствующего управления ЭП обеспечивается требуемая последовательность всех технологических операций, достигаются наилучшие (оптимальные) режимы работы промышленного оборудования и самого ЭП, осуществляются необходимые блокировки и защиты.

Для управления технологическими комплексами все шире используются ЭВМ. Они позволяют быстро проводить обработку большого объема информации о ходе технологического процесса, вырабатывать управляющие воздействия на ЭП рабочих машин и механизмов в соответствии с заданной программой. Особенно широкие возможности открываются при использовании микропроцессорной техники управления, позволяющей осуществлять автоматизацию как сложных технологических процессов в целом, так и отдельных производственных операций и циклов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое управление?
2. Что называется автоматической и автоматизированной системами управления?
3. Что называется системой автоматического регулирования?
4. На какие виды подразделяются системы автоматического регулирования?
5. Приведите примеры систем автоматического регулирования.
6. С какой целью может осуществляться регулирование переменных в ЭП?
7. Как подразделяются электроприводы по степени своей автоматизации?
8. Какие виды обратных связей применяются в автоматизированном ЭП?
9. В чем отличие схем управления электроприводов и электроприводами?
10. Какие характерные признаки имеют замкнутые структуры ЭП, построенные по схемам с общим усилителем и по принципу подчиненного регулирования координат?
11. Что такое наблюдающее устройство в электроприводе?

Глава 2
ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

PDF Compressor Free Version

2.1. СИЛОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В замкнутых, а иногда и в разомкнутых структурах автоматизированного электропривода применяются главным образом полупроводниковые силовые преобразователи для управления двигателями постоянного и переменного тока. Достоинствами полупроводниковых преобразователей являются широкие функциональные возможности управления процессом преобразования электроэнергии, высокие быстродействие и коэффициент полезного действия, большие сроки службы, удобство и простота обслуживания при эксплуатации, широкие возможности по реализации защит, сигнализации, диагностирования и тестирования как самого ЭП, так и технологического оборудования, возможность программирования и перепрограммирования работы микропроцессорных средств управления в случае их использования.

Вместе с тем для этих преобразователей характерны и определенные недостатки. К ним относятся высокая чувствительность полупроводниковых приборов к перегрузкам по току и напряжению и скорости их изменения; низкая помехозащищенность, искажение синусоидальной формы тока и напряжения сети.

Преобразователь — это электротехническое устройство, преобразующее электроэнергию одних параметров или показателей качества в электроэнергию с другими значениями параметров или показателей качества. Параметрами электрической энергии считаются род тока и напряжения, их частота, число фаз, фаза напряжения.

По *характеру преобразования электроэнергии* силовые преобразователи делятся на выпрямители, инверторы, преобразователи частоты, регуляторы напряжения переменного и постоянного тока, преобразователи числа фаз напряжения переменного тока. По *элементной базе* (видам применяемых силовых приборов) преобразователи могут быть диодными, тиристорными и транзисторными, а по *управляемости* — неуправляемыми и управляемыми. В управляемых преобразователях выходные переменные — напряжение, ток, частота могут регулироваться.

Выпрямители. Выпрямителем называется преобразователь напряжения переменного тока в напряжение постоянного (выпрямленного) тока. *Неуправляемые выпрямители* не обеспечивают регулирования напряжения на нагрузке и выполняются на полупроводниковых неуправляемых приборах односторонней проводимости — диодах, а *управляемые выпрямители* выполняются на управляемых диодах — тиристорах — и позволяют регулировать выходное напряжение за счет соответствующего управления тиристорами.

Выпрямители могут быть нереверсивными и реверсивными. *Реверсивные* выпрямители позволяют изменять полярность выпрямленного напряжения на своей нагрузке, а *нереверсивные* — нет. По числу фаз питающего входного напряжения переменного тока выпрямители делятся на *однофазные* и *трехфазные*, а по схеме силовой части — на *мостовые* и с *нулевым выводом*.

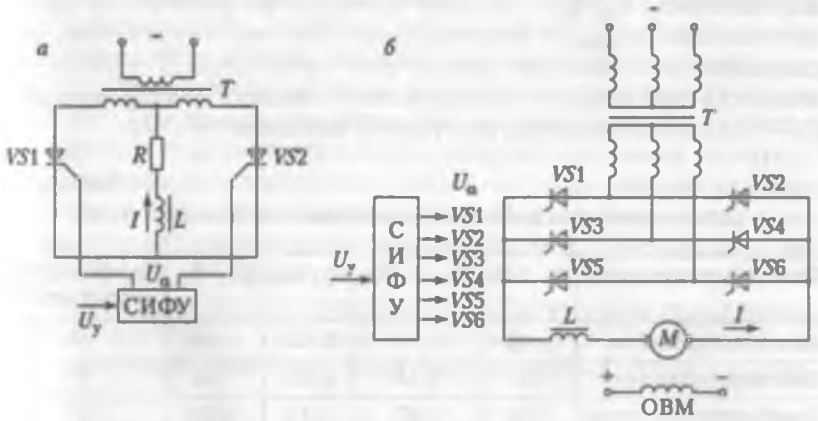


Рис. 2.1. Схемы выпрямителей:
а — однофазного с нулевым выводом трансформатора;
б — трехфазного мостового

На рис. 2.1, *а* в качестве примера приведена схема однофазного тиристорного управляемого нереверсивного выпрямителя с нулевым выводом. В состав выпрямителя входят два тиристора *VS1* и *VS2*, подключенные ко вторичным обмоткам трансформатора *T* и обеспечивающие на нагрузке *R* двухполупериодное выпрямленное и регулируемое по величине напряжение. Управление тиристорами осуществляется с помощью подаваемых на их управляющие электроды от системы импульсно-фазового управления (*СИФУ*) импульсов управления $U_а$. Изменяя с помощью сигнала

управления U_y момент подачи импульсов на тиристоры, можно осуществлять регулирование напряжения на нагрузке. На схеме показан реактор L, который включается в цепь выпрямленного тока I для сглаживания его пульсаций.

На рис. 2.1, *б* приведена схема трехфазного мостового нереверсивного выпрямителя на шести тиристорах *VS1–VS6*, нагрузкой которого является якорь двигателя постоянного тока *M*. На схеме показаны реактор *L*, который включается в цепь выпрямленного тока для сглаживания его пульсаций, трансформатор *T* и обмотка возбуждения *ОВМ*. Другие возможные схемы выпрямителей рассмотрены в [21].

В табл. 2.1 приведены соотношения, которые связывают параметры цепей переменного и постоянного тока для разных схем выпрямления при активной нагрузке выпрямителя. В ней приняты обозначения: U_2, I_2 — действующие значения соответственно напряжения сети (вторичной обмотки трансформатора) и переменного тока; $U_{ср}$, $I_{ср}$ — средние значения выпрямленных напряжения и тока; $U_{обр\ max}$ — максимальное обратное напряжение, прикладываемое к вентилю (диоду или тиристору); S_1 — расчетная мощность переменного тока (типовая мощность трансформатора); $P_{ср}$ — мощность нагрузки на стороне постоянного тока.

Таблица 2.1

Соотношения между токами и напряжениями в выпрямителях

Схема выпрямления	$U_{ср}$ / U_2	$U_{обр\ max}$ / $U_{ср}$	I_2 / $I_{ср}$	S_1 / $P_{ср}$	Коэффициент пульсаций, %
Однополупериодная	0,45	3,14	0,785	1,48	157
Однофазная нулевая	0,9	3,14	0,785	1,48	67
Однофазная мостовая	0,9	1,57	1,11	1,23	67
Трехфазная нулевая	1,17	2,09	0,585	1,37	25
Трехфазная мостовая	2,34	1,05	0,817	1,05	6

Реверсивные выпрямители состоят из двух нереверсивных выпрямителей, при управлении которыми используются совместное и раздельное управления. При *раздельном управлении* импульсы управления подаются на тиристоры работающего в данный момент неуправляемого выпрямителя, а на тиристоры другого выпрямителя импульсы не подаются и он не работает, «закрыт». При необходимости изменения полярности напряжения на нагрузке на противоположную выпрямители меняются ролями.

При *совместном управлении* импульсы управления подаются одновременно на оба выпрямителя, при этом за счет сдвига меж-

ду импульсами управления один выпрямитель работает в выпрямительном режиме, а другой — в инверторном.

Инверторы. Инвертором называется преобразователь напряжения постоянного тока в напряжение переменного тока. Эти преобразователи используются в составе преобразователей частоты в случае питания ЭП от сети переменного тока или в виде самостоятельного преобразователя при питании ЭП от источника постоянного напряжения. В составе ЭП они обеспечивают, как правило, получение переменного напряжения регулируемой частоты, что требуется для регулирования скорости двигателей переменного тока.

Существует большое количество инверторов, различающихся своими схемами, характеристиками и областями применения. В схемах ЭП наибольшее применение нашли автономные инверторы напряжения и тока.

Автономные инверторы напряжения (АИН) имеют жесткую внешнюю характеристику, представляющую собой зависимость выходного напряжения от тока нагрузки, вследствие чего при изменении тока нагрузки их выходное напряжение практически не изменяется. Тем самым управляющим воздействием на двигатель переменного тока является напряжение регулируемой частоты.

Автономные регуляторы тока имеют «мягкую» внешнюю характеристику и обладают тем самым свойствами источника тока, в связи с чем при их использовании управляющим воздействием на двигатель является ток регулируемой частоты.

В схемах инверторов применяются управляемые полупроводниковые приборы — тиристоры и транзисторы. Схемы автономных инверторов приведены ниже при рассмотрении преобразователей частоты.

Преобразователи частоты. Преобразователем частоты называется преобразователь напряжения переменного тока стандартных частоты и напряжения в напряжение переменного тока регулируемой частоты. Применительно к схемам ЭП одновременно с частотой в определенном соотношении регулируется и выходное напряжение преобразователя.

Полупроводниковые преобразователи частоты (ПЧ) делятся на две группы: преобразователи с непосредственной связью и преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока.

Силовая часть схемы *трехфазного преобразователя частоты с непосредственной связью* показана на рис. 2.2. Он образован тремя группами 2, 3 и 4-х тиристоров *VS1—VS6*, включенных между вторичными обмотками трансформатора *1* и нагрузкой Z_a, Z_b и Z_c. Регулируемое по частоте f_{per} и величине напряжение U_{per} на нагруз-

ке формируется из напряжения источника питания (трансформатора) U_a, U_b и U_c, что и определило название этого типа преобразователя частоты. Частота напряжения на нагрузке может регулироваться только вниз от сетевой f_1, и ее максимальное значение обычно не превосходит 20 Гц, что определяет ограниченные возможности применения этого типа преобразователя частоты.

PDF Compressor Free Version

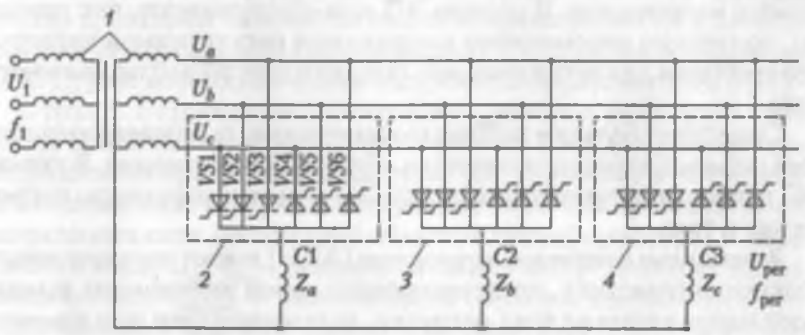


Рис. 2.2. Силовая часть схемы преобразователя частоты с непосредственной связью

Преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока в составе ЭП могут выполняться по двум основным схемам. На рис. 2.3 показана силовая часть схемы *трехфазного преобразователя частоты с инвертором напряжения*. Она состоит из нерегулируемого выпрямителя *В*, собранного на шести диодах *VD1–VD6*, и автономного инвертора напряжения *АИН* на шести управляемых клю-

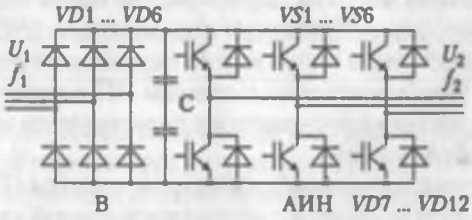


Рис. 2.3. Силовая часть схемы преобразователя частоты с инвертором напряжения

чах, в качестве которых на схеме показаны модули, содержащие биполярные транзисторы с изолированным затвором *VS1–VS6* и шунтирующие диоды *VD7–VD12*. Выпрямитель преобразует на-

пряжение сети U_1 стандартной частоты f_1 в выпрямленное напряжение, а инвертор — выпрямленное напряжение в напряжение U_2 регулируемой частоты f_2. Регулирование напряжения U_2 на нагрузке осуществляется широтно-импульсной модуляцией выпрямленного напряжения. Конденсаторы *C* выполняют роль фильтра и элемента, осуществляющего обмен реактивной мощности с нагрузкой.

На рис. 2.4 показана силовая часть схемы преобразователя частоты с инвертором тока. Она включает управляемый выпрямитель *В* на тиристорах *VS1–VS6* и инвертор тока *И* на запираемых тиристорах *VS7–VS12*. Конденсаторы *C* являются источником реактивной мощности для нагрузки, реактор *L* обеспечивает работу инвертора тока. Приведенная схема позволяет осуществлять рекуперацию (отдачу) энергии в сеть.

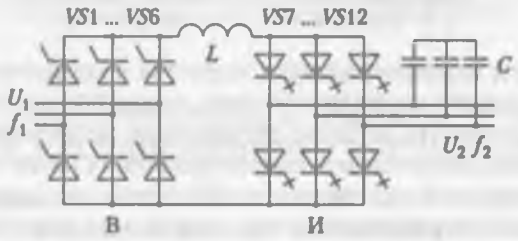


Рис. 2.4. Силовая часть схемы преобразователя частоты с инвертором тока

Регуляторы напряжения переменного тока. Регулятором напряжения переменного тока называется преобразователь напряжения переменного тока стандартных частоты и напряжения в регулируемое напряжение переменного тока той же частоты. Они могут быть одно- и трехфазными и используют в своей силовой части, как правило, тиристоры.

Схема однофазного тиристорного регулятора напряжения *ТРН* показана на рис. 2.5, *а*. Его силовая часть состоит из двух тиристоров *VS1* и *VS2*, включенных по встречно-параллельной схеме между источником питания с напряжением U_1 и нагрузкой $Z_н$. Изменение с помощью входного сигнала $U_у$ момента подачи импульсов управления $U_в$ на тиристоры позволяет регулировать напряжение на нагрузке $U_н$ от нуля до сетевого U_1 при той же частоте сети.

На рис. 2.5, *б* показана схема включения трехфазного тиристорного регулятора напряжения, нагрузкой которого являются обмотки статора двигателя переменного тока *АД*. Добавление в эту

схему еще двух пар тиристоров позволяет изменять чередование фаз напряжения на статоре двигателя и тем самым изменять на противоположное направление его частоты вращения.

PDF Compressor Free Version

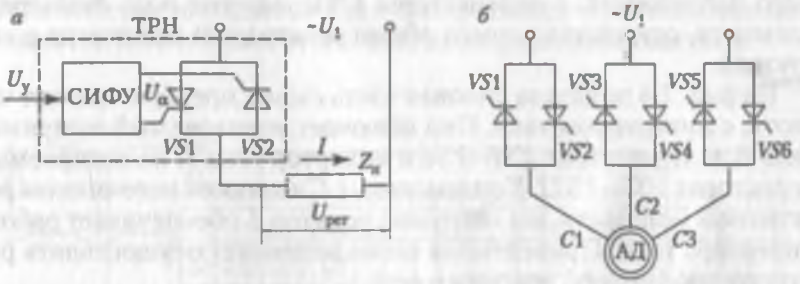


Рис. 2.5. Схемы регулятора напряжения переменного тока: *а* — однофазного; *б* — трехфазного

Регуляторы напряжения используются в качестве мягких пускателей двигателей переменного тока, ограничивающих их пусковые токи и моменты, а также регуляторов экономичности ЭП с асинхронными двигателями, обеспечивающих наилучшие энергетические параметры при их работе. На основе регуляторов напряжения может быть реализовано так называемое квазичастотное управление асинхронными двигателями и их динамическое торможение.

Регуляторы напряжения постоянного тока. Регуляторы этого типа преобразуют напряжение постоянного тока источника питания в регулируемое напряжение на нагрузке. В таких преобразователях используются силовые полупроводниковые управляемые ключи — тиристоры и транзисторы, а регулирование напряжения в них происходит за счет модуляции напряжения источника питания.

Принцип работы импульсного преобразователя напряжения иллюстрирует схема на рис. 2.6, где $Z_н$, $U_н$, — соответственно сопротивление и напряжение нагрузки; E — напряжение источника питания; *УПК* — управляемый полупроводниковый ключ; *VD* — обратный диод. Регулирование напряжения на нагрузке осуществляется за счет периодического замыкания и размыкания *УПК*, при которых происходит подключение нагрузки к источнику питания и ее отключение. Изменяя длительность импульсов при неизменной частоте их следования (широтно-импульсный способ) или их частоту при неизменной длительности (частотно-импульсный способ), можно регулировать напряжение на нагрузке от нуля до напряжения источника питания.

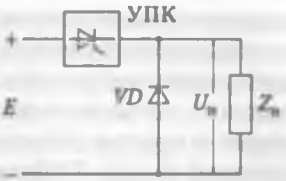


Рис. 2.6. Регулятор напряжения постоянного тока

Наибольшее распространение получил широтно-импульсный способ, при котором среднее напряжение на нагрузке $U_н$ связано с напряжением источника питания E, длительностью импульса $t_и$ и периодом их следования T следующим соотношением:

$$U_н = t_и \frac{E}{T} = \gamma E,$$

где $\gamma = \frac{t_и}{T}$ — относительная длительность (скважность) импульсов.

2.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ РУЧНОГО И ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Классификация электрических аппаратов. *Электрическими аппаратами* (ЭА) называются электротехнические устройства, предназначенные для управления потоками энергии и информации, а также режимами работы, контроля и защиты технических и электротехнических систем и их компонентов.

Одним из основных признаков классификации ЭА является их рабочее (номинальное) напряжение, по которому они делятся на *аппараты низкого* (до 1000 В) и *высокого* (свыше 1000 В) *напряжения*.

Аппараты низкого напряжения выполняют в основном функции *коммутации и защиты электрических цепей и устройств* (автоматические выключатели, контакторы, пускатели, реле, рубильники и пакетные выключатели, кнопки управления, тумблеры и другие аппараты) и *регулирования параметров технических объектов* (стабилизаторы, регуляторы напряжения, мощности и тока, усилители, датчики различных переменных).

Аппараты высокого напряжения подразделяются на *коммутационные* (выключатели, выключатели нагрузки, разъединители), *измерительные* (измерительные трансформаторы тока и напряжения, делители напряжения), *компенсирующие* (шунтирующие реакторы), *комплектные распределительные устройства*.

По своему исполнению аппараты подразделяются на *электромеханические*, *статические* и *гибридные*. Основным признаком

электромеханических аппаратов является наличие в них подвижных частей, например контактной системы у коммутационных аппаратов. Статические аппараты строятся с использованием полупроводниковых и магнитных элементов и устройств (диодов, транзисторов, тиристоров и других полупроводниковых приборов, магнитных усилителей и др.). Гибридные аппараты представляют собой комбинацию электромеханических и статических аппаратов.

PDF Compressor Free Version

Электрические аппараты классифицируются также:

• *по значению рабочих токов* — аппараты слаботочные (до 5 А) и сильноточные (свыше 5 А);

• *по роду тока* — аппараты постоянного и переменного тока;

• *по частоте рабочего напряжения* — аппараты с нормальной (до 50 Гц) и повышенной (от 400 до 10 000 Гц) частотой напряжения.

К аппаратам ручного управления относятся командные маломощные устройства — кнопки, ключи управления и различные командоаппараты (командоконтроллеры), с помощью которых осуществляется коммутация электрических цепей управления и подача команд управления на ЭП.

Кнопки управления. Кнопки управления различаются по размерам — нормальные и малогабаритные, по числу замыкающих и размыкающих контактов, по форме толкателя, по величине и роду тока и напряжения, по степени защиты от воздействия окружающей среды. Две, три или более кнопок, смонтированных в одном корпусе, образуют кнопочную станцию. На рис. 2.7, *а* показано условное изображение одноцепных кнопок с замыкающим (кнопка *SB1*) и размыкающим (кнопка *SB2*) контактами. Контакты кнопок и других электрических аппаратов на схемах изображаются в так называемом нормальном состоянии, когда на них не оказывается механического, электрического, магнитного или какого-либо другого воздействия. Двухцепные кнопки имеют обе пары показанных контактов с единым приводом.

Рис. 2.7. Условные изображения:
а — кнопки управления; *б* — ключ управления; *в* — электрические контакты

Ключи управления (универсальные переключатели). Эти аппараты имеют два или более фиксированных положений рукоятки управления и несколько замыкающих и размыкающих контактов. На рис. 2.7, *б* показан переключатель, имеющий три фиксированных положения рукоятки. В среднем положении рукоятки (позиция 0) замкнут контакт *SM1*, что обозначается точкой на схеме, а контакты *SM2* и *SM3* разомкнуты. В положении *1* ключа замыкается контакт *SM2* и размыкается *SM1*, в положении 2 — наоборот. На рис. 2.7, *в* показаны замыкающий и размыкающий контакты.

Командоконтроллеры (командоаппараты) представляют собой аппараты для коммутации нескольких маломощных (ток нагрузки до 16 А) электрических цепей с управлением от рукоятки или педали с несколькими положениями. Их электрическая схема изображается аналогично схеме ключей управления и переключателей.

К силовым коммутационным аппаратам с ручным управлением относят рубильники, пакетные выключатели, контроллеры и автоматические выключатели.

Рубильники представляют собой простые коммутационные аппараты, предназначенные для неавтоматического нечастого замыкания и размыкания силовых электрических цепей постоянного и переменного тока напряжением до 500 В и током до 5000 А. Они различаются по величине коммутируемого тока, количеству полюсов (коммутируемых цепей), виду привода рукоятки и числу ее положений (два или три).

Пакетные выключатели представляют собой разновидность рубильников, отличающихся тем, что их контактная система набирается из отдельных пакетов по числу полюсов (коммутируемых цепей). Пакет состоит из изолятора, в пазах которого находятся неподвижный контакт с винтовыми выводами для подключения проводов и пружинный подвижный контакт с устройством искрогашения.

Разновидностью рубильников являются переключатели-разъединители с различным типом привода — рычажным, с центральной рукояткой, с приводом от маховика или штанги.

Контроллеры являются многопозиционными электрическими аппаратами с ручным или ножным приводом для непосредственной коммутации силовых цепей, в основном электрических двигателей. Силовые контроллеры бывают двух видов: кулачковые и магнитные.

Кулачковые контроллеры характеризуются тем, что размыкание и замыкание их контактов обеспечивается смонтированными на

барабане кулачками, поворот которых осуществляется с помощью рукоятки, маховичка или педали. За счет профилирования кулачков обеспечивается необходимая последовательность коммутации контактных элементов.

PDF Compressor Free Version

Магнитные контроллеры представляют собой коммутационное устройство, в состав которого входят командоконтроллер и силовые электромагнитные аппараты — контакторы. Командоконтроллер с помощью своих контактов управляет катушками контакторов, которые уже своими контактами коммутируют силовые цепи двигателей. Срок службы магнитных контроллеров при одних и тех же условиях существенно выше, чем кулачковых контроллеров, что определяется высокой коммутационной способностью и износостойкостью электромагнитных контакторов.

Магнитные контроллеры нашли основное применение в электроприводе крановых механизмов, работа которых характеризуется большой частотой включения двигателей.

Автоматические выключатели. Автоматические выключатели (автоматы) низкого напряжения представляют собой многоцелевой электрический аппарат для нечастой коммутации электрических цепей и их автоматической защиты при аварийных режимах — коротких замыканиях в цепях, их перегрузке, снижении или исчезновении напряжения, изменении направления тока и др. Для осуществления функций защиты автоматические выключатели снабжаются расцепителями, которые при возникновении аварийных режимов воздействуют на удерживающий элемент аппарата, приводя к его отключению. По принципу своего действия расцепители бывают электромагнитными, тепловыми и полупроводниковыми.

Применяемые автоматические выключатели различаются между собой назначением, уровнями номинальных токов и напряжения, набором и исполнением применяемых защит, отключающей способностью и временем отключения. Диапазон их номинальных токов составляет 10–10 000 А, предельных коммутируемых токов — 0,3–100 кА, время отключения — 0,02–0,7 с.

К силовым аппаратам дистанционного управления относятся контакторы и магнитные пускатели.

Контактор. Контактор представляет собой электромагнитный аппарат с дистанционным управлением, предназначенный для частых коммутаций силовых цепей. Контакторы различаются: по роду тока коммутируемой цепи (постоянного, переменного, постоянного и переменного); количеству главных контактов (одно-, двух- и многополюсные); роду тока цепи катушки (с управлением напряжением постоянного и переменного тока); номинальным

току и напряжению коммутируемых цепей; конструктивному исполнению (с механическими контактами и бесконтактные) и другим признакам.

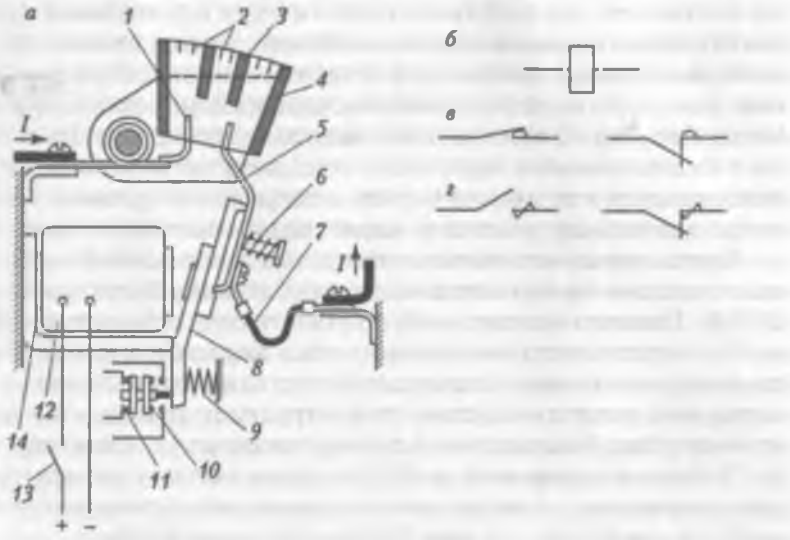


Рис. 2.8. Контактор:
а — устройство; *б* — обозначение катушки;
в, г — обозначения силовых контактов

Конструктивная схема электромагнитного однополюсного контактора постоянного тока показано на рис. 2.8, *а*. На неподвижном сердечнике *14* магнитной системы контактора установлена втягивающая катушка *12*. С подвижной частью магнитной системы, якорем *8*, связан подвижный главный контакт *5*, который присоединяется к цепи тока при помощи гибкого проводника *7*. При подаче напряжения на катушку *12* (замыкании контакта *13*) якорь притягивается к сердечнику и контакт *5* замыкается с неподвижным главным контактом *1*, что обеспечивает коммутацию тока *I*. Необходимое нажатие главных контактов в их рабочем положении обеспечивается пружиной *6*. При этом в процессе соприкосновения контактов происходит перекатывание и притирание их контактных поверхностей, что уменьшает переходное сопротивление контактов.

С якорем *8* связаны также вспомогательные (блокировочные) контакты мостикового типа — замыкающие *10* и размыкающие *11*, предназначенные для работы в цепях управления и рассчитанные

барабане кулачками, поворот которых осуществляется с помощью рукоятки, маховичка или педали. За счет профилирования кулачков обеспечивается необходимая последовательность коммутации контактных элементов.

PDF Compressor Free Version

Магнитные контроллеры представляют собой коммутационное устройство, в состав которого входят командоконтроллер и силовые электромагнитные аппараты — контакторы. Командоконтроллер с помощью своих контактов управляет катушками контакторов, которые уже своими контактами коммутируют силовые цепи двигателей. Срок службы магнитных контроллеров при одних и тех же условиях существенно выше, чем кулачковых контроллеров, что определяется высокой коммутационной способностью и износостойкостью электромагнитных контакторов.

Магнитные контроллеры нашли основное применение в электроприводе крановых механизмов, работа которых характеризуется большой частотой включения двигателей.

Автоматические выключатели. Автоматические выключатели (автоматы) низкого напряжения представляют собой многоцелевой электрический аппарат для нечастой коммутации электрических цепей и их автоматической защиты при аварийных режимах — коротких замыканиях в цепях, их перегрузке, снижении или исчезновении напряжения, изменении направления тока и др. Для осуществления функций защиты автоматические выключатели снабжаются расцепителями, которые при возникновении аварийных режимов воздействуют на удерживающий элемент аппарата, приводя к его отключению. По принципу своего действия расцепители бывают электромагнитными, тепловыми и полупроводниковыми.

Применяемые автоматические выключатели различаются между собой назначением, уровнями номинальных токов и напряжения, набором и исполнением применяемых защит, отключающей способностью и временем отключения. Диапазон их номинальных токов составляет 10—10 000 А, предельных коммутируемых токов — 0,3—100 кА, время отключения — 0,02—0,7 с.

К силовым аппаратам дистанционного управления относятся контакторы и магнитные пускатели.

Контактор. Контактор представляет собой электромагнитный аппарат с дистанционным управлением, предназначенный для частых коммутаций силовых цепей. Контакторы различаются: по роду тока коммутируемой цепи (постоянного, переменного, постоянного и переменного); количеству главных контактов (одно-, двух- и многополюсные); роду тока цепи катушки (с управлением напряжением постоянного и переменного тока); номинальным

току и напряжению коммутируемых цепей; конструктивному исполнению (с механическими контактами и бесконтактные) и другим признакам.

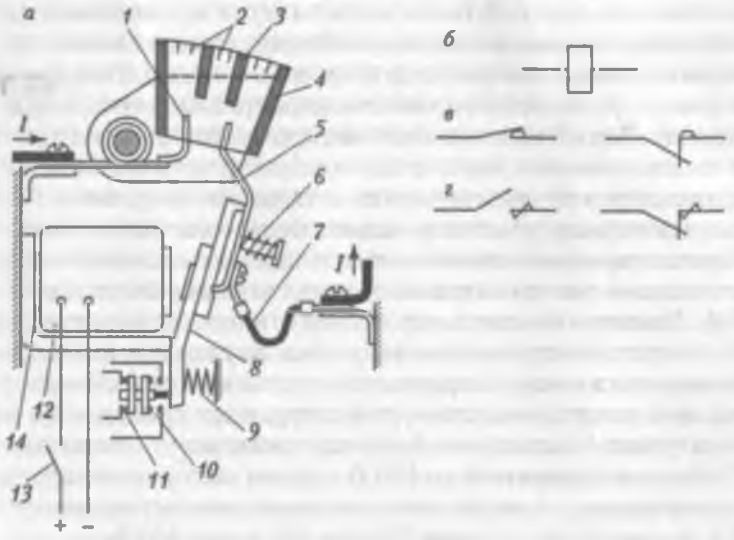


Рис. 2.8. Контактор:
а — устройство; *б* — обозначение катушки;
в, г — обозначения силовых контактов

Конструктивная схема электромагнитного однополюсного контактора постоянного тока показано на рис. 2.8, *а*. На неподвижном сердечнике *14* магнитной системы контактора установлена втягивающая катушка *12*. С подвижной частью магнитной системы, якорем *8*, связан подвижный главный контакт *5*, который присоединяется к цепи тока при помощи гибкого проводника *7*. При подаче напряжения на катушку *12* (замыкании контакта *13*) якорь притягивается к сердечнику и контакт *5* замыкается с неподвижным главным контактом *1*, что обеспечивает коммутацию тока *I*. Необходимое нажатие главных контактов в их рабочем положении обеспечивается пружиной *6*. При этом в процессе соприкосновения контактов происходит перекатывание и притирание их контактных поверхностей, что уменьшает переходное сопротивление контактов.

С якорем *8* связаны также вспомогательные (блокировочные) контакты мостикового типа — замыкающие *10* и размыкающие *11*, предназначенные для работы в цепях управления и рассчитанные

на небольшие токи. Блок-контакты *10* замыкаются и *11* размыкаются одновременно с замыканием главных контактов (рис. 2.7, *в*).

Отключение контактора производится снятием напряжения с катушки *12* (контакт *13* размыкается). При этом подвижная система контактора под действием силы тяжести и возвратной пружины *9* приходит в «нормальное» состояние. Возникающая при размыкании главных контактов дуга гасится в щелевой дугогасительной камере *4*, изготовляемой из жаростойкого изоляционного материала. Для облегчения гашения дуги могут применяться камеры с изоляционными перегородками *3*, которые способствуют увеличению дуги и ее сопротивления, а также иногда устанавливается искрогасительная решетка из коротких металлических пластин *2*.

PDF Compressor Free Version

Контакторы постоянного тока изготовляются с одним или двумя полюсами на номинальные токи главных контактов от 4 до 2500 А. Главные контакты способны отключать токи перегрузки до 7—10-кратных от номинального тока. Катушки контакторов постоянного тока имеют большое количество витков и обладают значительной индуктивностью, что затрудняет размыкание цепей этих катушек. Мостиковые блок-контакты могут отключать токи до 20 А при напряжении до 500 В в цепях катушек аппаратов переменного тока, а в цепях катушек аппаратов постоянного тока — до 2,5 А при 110 В, 2 А при 220 В и 0,5 А при 440 В.

На рис. 2.8, *б—г* показаны условные обозначения элементов контактора соответственно: втягивающей катушки; замыкающих и размыкающих главных контактов без дугогашения и с дугогашением.

Контакторы переменного тока по принципу своего действия и основным элементам конструкции не отличаются от контакторов постоянного тока. Особенности их работы связаны с питанием катушек переменным током, что приводит к повышенному току в катушке при срабатывании, в несколько раз превышающему ток при втянутом якоре. По этой причине для контакторов переменного тока ограничивается число их включений в час (обычно не более 600). Кроме того, пульсирующий магнитный поток, создаваемый переменным током катушки, вызывает вибрацию и гудение магнитопровода, а также его повышенный нагрев. Для уменьшения этих нежелательных факторов магнитопровод набирается из тонколистовой трансформаторной стали, а на сердечник или якорь помещают короткозамкнутый виток.

В отличие от контакторов постоянного тока у контакторов переменного тока условия гашения дуги более легкие, так как дуга на переменном токе менее устойчива и может погаснуть при прохождении переменного тока нагрузки через нуль.

Контакторы переменного тока имеют на электрических схемах те же обозначения, что и контакторы постоянного тока. В схемах управления ЭП применяются и универсальные контакторы, позволяющие коммутировать силовые цепи как постоянного, так и переменного тока.

Бесконтактные полупроводниковые контакторы (прерыватели) строятся на базе силовых полупроводниковых приборов тиристоров и (реже) транзисторов, отличаются широкими функциональными возможностями, высокой степенью износостойкости и значительным быстродействием.

Гибридные или комбинированные контакторы используют в своем составе электромеханические контакторы и полупроводниковые компоненты. В них коммутация осуществляется силовыми полупроводниковыми приборами, а после окончания процесса коммутации включается контактор, и ток проходит через его контакты. За счет этого повышается скорость и управляемость процесса коммутации и исключается частично или полностью появление электрической дуги, а во включенном состоянии уменьшаются потери энергии в аппарате за счет шунтирования полупроводниковых приборов металлическими контактами с малым контактным сопротивлением.

Магнитный пускатель представляет собой специализированный аппарат, предназначенный главным образом для пуска, остановки и реверса асинхронных двигателей. Кроме управления магнитные пускатели обеспечивают с помощью тепловых реле защиту двигателей от токовых перегрузок и сигнализацию об их работе. В соответствии с перечисленными функциями в состав пускателя могут входить контактор, кнопки управления, тепловые реле защиты, сигнальные лампы, размещаемые в одном корпусе. Выпускаемые магнитные пускатели различаются между собой по назначению (нереверсивные и реверсивные), наличию или отсутствию тепловых реле и кнопок управления, степени защиты от воздействия окружающей среды, уровням коммутируемых токов, рабочему напряжению главной цепи.

Бесконтактные пускатели представляют собой полупроводниковые (или гибридные) устройства, обычно тиристорные, которые предназначены для управления двигателями (чаще всего асинхронными и синхронными) и отличаются теми же положительными свойствами, что и бесконтактные (гибридные) контакторы. Они позволяют ограничивать пусковые токи двигателей или их моменты при пуске и получили вследствие этого название «мягкие» пускатели или «мягкие стартеры».

Реле. Реле представляют собой слаботочные аппараты, предназначенные для использования в схемах управления, автоматики,

на небольшие токи. Блок-контакты *10* замыкаются и *11* размыкаются одновременно с замыканием главных контактов (рис. 2.7, *в*).

Отключение контактора производится снятием напряжения с катушки *12* (контакт *13* размыкается). При этом подвижная система контактора под действием силы тяжести и возвратной пружины *9* приходит в «нормальное» состояние. Возникающая при размыкании главных контактов дуга гасится в щелевой дугогасительной камере *4*, изготовляемой из жаростойкого изоляционного материала. Для облегчения гашения дуги могут применяться камеры с изоляционными перегородками *3*, которые способствуют увеличению дуги и ее сопротивления, а также иногда устанавливается искрогасительная решетка из коротких металлических пластин *2*.

PDF Compressor Free Version

Контакторы постоянного тока изготовляются с одним или двумя полюсами на номинальные токи главных контактов от 4 до 2500 А. Главные контакты способны отключать токи перегрузки до 7—10-кратных от номинального тока. Катушки контакторов постоянного тока имеют большое количество витков и обладают значительной индуктивностью, что затрудняет размыкание цепей этих катушек. Мостиковые блок-контакты могут отключать токи до 20 А при напряжении до 500 В в цепях катушек аппаратов переменного тока, а в цепях катушек аппаратов постоянного тока — до 2,5 А при 110 В, 2 А при 220 В и 0,5 А при 440 В.

На рис. 2.8, *б—г* показаны условные обозначения элементов контактора соответственно: втягивающей катушки; замыкающих и размыкающих главных контактов без дугогашения и с дугогашением.

Контакторы переменного тока по принципу своего действия и основным элементам конструкции не отличаются от контакторов постоянного тока. Особенности их работы связаны с питанием катушек переменным током, что приводит к повышенному току в катушке при срабатывании, в несколько раз превышающему ток при втянутом якоре. По этой причине для контакторов переменного тока ограничивается число их включений в час (обычно не более 600). Кроме того, пульсирующий магнитный поток, создаваемый переменным током катушки, вызывает вибрацию и гудение магнитопровода, а также его повышенный нагрев. Для уменьшения этих нежелательных факторов магнитопровод набирается из тонколистовой трансформаторной стали, а на сердечник или якорь помещают короткозамкнутый виток.

В отличие от контакторов постоянного тока у контакторов переменного тока условия гашения дуги более легкие, так как дуга на переменном токе менее устойчива и может погаснуть при прохождении переменного тока нагрузки через нуль.

Контакторы переменного тока имеют на электрических схемах те же обозначения, что и контакторы постоянного тока. В схемах управления ЭП применяются и универсальные контакторы, позволяющие коммутировать силовые цепи как постоянного, так и переменного тока.

Бесконтактные полупроводниковые контакторы (прерыватели) строятся на базе силовых полупроводниковых приборов тиристоров и (реже) транзисторов, отличаются широкими функциональными возможностями, высокой степенью износостойкости и значительным быстродействием.

Гибридные или комбинированные контакторы используют в своем составе электромеханические контакторы и полупроводниковые компоненты. В них коммутация осуществляется силовыми полупроводниковыми приборами, а после окончания процесса коммутации включается контактор, и ток проходит через его контакты. За счет этого повышается скорость и управляемость процесса коммутации и исключается частично или полностью появление электрической дуги, а во включенном состоянии уменьшаются потери энергии в аппарате за счет шунтирования полупроводниковых приборов металлическими контактами с малым контактным сопротивлением.

Магнитный пускатель представляет собой специализированный аппарат, предназначенный главным образом для пуска, остановки и реверса асинхронных двигателей. Кроме управления магнитные пускатели обеспечивают с помощью тепловых реле защиту двигателей от токовых перегрузок и сигнализацию об их работе. В соответствии с перечисленными функциями в состав пускателя могут входить контактор, кнопки управления, тепловые реле защиты, сигнальные лампы, размещаемые в одном корпусе. Выпускаемые магнитные пускатели различаются между собой по назначению (нереверсивные и реверсивные), наличию или отсутствию тепловых реле и кнопок управления, степени защиты от воздействия окружающей среды, уровням коммутируемых токов, рабочему напряжению главной цепи.

Бесконтактные пускатели представляют собой полупроводниковые (или гибридные) устройства, обычно тиристорные, которые предназначены для управления двигателями (чаще всего асинхронными и синхронными) и отличаются теми же положительными свойствами, что и бесконтактные (гибридные) контакторы. Они позволяют ограничивать пусковые токи двигателей или их моменты при пуске и получили вследствие этого название «мягкие» пускатели или «мягкие стартеры».

Реле. Реле представляют собой слаботочные аппараты, предназначенные для использования в схемах управления, автоматики,

защиты и сигнализации самых разнообразных установок, а также коммутации электрических цепей. Область применения реле очень широкая. Они используются в качестве коммутационных аппаратов, датчиков тока, напряжения и мощности, промежуточных элементов для передачи команд из одной цепи в другую и размножения сигналов, датчиков времени и различных физических переменных и технологических параметров.

PDF Compressor Free Version

Отличительной особенностью реле является скачкообразное изменение его состояния при достижении входным воздействием на него определенного уровня. По своему исполнению реле делятся на электромагнитные (контактные), полупроводниковые (бесконтактные) и герметичные.

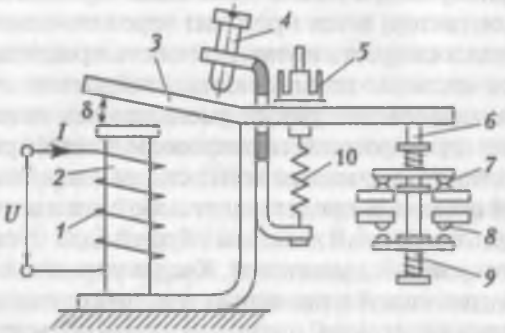


Рис. 2.9. Схема устройства электромагнитного реле

Электромагнитное реле по принципу своего действия не отличается от контактора и работает следующим образом (рис. 2.9). На сердечнике *2* магнитной системы реле находится катушка *1*, на которую подается входной электрический сигнал. Когда ток (напряжение) в цепи катушки превысит некоторое значение, называемое током (напряжением) срабатывания реле, создаваемая им электромагнитная сила станет больше противодействующей силы возвратной пружины *10*, якорь *3* реле притянется к сердечнику *2* и траверса *6*, поднявшись, обеспечит замыкание контактов *8* и размыкание контактов *7*. Сила нажатия в контактах создается пружиной *9*.

Если уменьшить (отключить) ток (напряжение) в катушке, то якорь под действием пружины *10* перейдет в исходное положение и контакты вернутся в «нормальное» (исходное) положение. Ток (напряжение), при котором якорь реле возвращается в исходное положение, носит название тока (напряжения) возврата или от-

пускания, а отношение тока (напряжения) возврата к току (напряжению) срабатывания — коэффициента возврата реле.

Ток (напряжение) срабатывания реле может регулироваться в определенных пределах изменением силы натяжения возвратной пружины *10* с помощью гайки *5*, а также за счет зазора δ, величина которого может регулироваться с помощью винта *4*. При затяжке пружины *10* или увеличении зазора ток (напряжение) срабатывания возрастает.

Поскольку контакты реле коммутируют небольшие (до 10 А) токи, в них обычно не используются дугогасительные камеры, а конструкции контактов простые.

Промежуточные электромагнитные реле применяются в основном для коммутации электрических цепей и размножения контактов других электрических аппаратов.

Реле времени представляет собой устройство, контакты которого замыкаются или размыкаются с некоторой выдержкой времени после получения сигнала управления.

Электромагнитное реле времени отличается от обычного реле наличием на магнитопроводе магнитной трубки (гильзы), которая и обеспечивает выдержку времени реле при отключении его катушки от источника питания.

Включение реле времени происходит, как у обычного электромагнитного реле. Выдержка времени обеспечивается за счет замедления возврата контактной системы реле в исходное положение из-за более медленного спадания магнитного потока при снятии с катушки напряжения. В соответствии с таким принципом действия электромагнитное реле времени обеспечивает выдержку при размыкании замыкающего контакта и замыкании размыкающего контакта. Выдержка времени реле регулируется путем установки латунной немагнитной прокладки ступенчато или плавно за счет изменения натяжения пружины.

Моторное (электромеханическое) реле времени в своей основе имеет специальный низкоскоростной двигатель и редуктор с большим передаточным числом, на выходном валу которого монтируется рычаг, начальное положение которого устанавливается по шкале уставок времени реле. Рычаг управляет работой вспомогательных контактов, которыми, в свою очередь, включается выходное электромагнитное реле.

Механическое реле времени имеет замедлитель в виде анкерного механизма, управляемого электромагнитом. При подаче напряжения на электромагнит (начало отсчета времени) его якорь заводит пружину анкерного механизма аналогично часовому. Последний, начав работать, перемещает подвижный контакт реле.

защиты и сигнализации самых разнообразных установок, а также коммутации электрических цепей. Область применения реле очень широкая. Они используются в качестве коммутационных аппаратов, датчиков тока, напряжения и мощности, промежуточных элементов для передачи команд из одной цепи в другую и размножения сигналов, датчиков времени и различных физических переменных и технологических параметров.

PDF Compressor Free Version

Отличительной особенностью реле является скачкообразное изменение его состояния при достижении входным воздействием на него определенного уровня. По своему исполнению реле делятся на электромагнитные (контактные), полупроводниковые (бесконтактные) и герметичные.

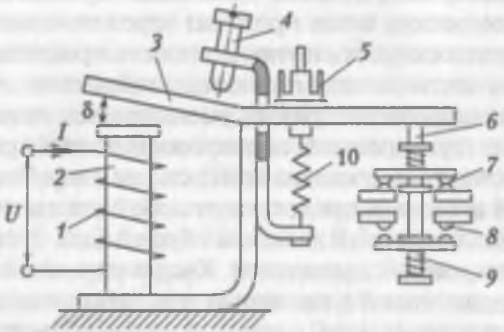


Рис. 2.9. Схема устройства электромагнитного реле

Электромагнитное реле по принципу своего действия не отличается от контактора и работает следующим образом (рис. 2.9). На сердечнике *2* магнитной системы реле находится катушка *1*, на которую подается входной электрический сигнал. Когда ток (напряжение) в цепи катушки превысит некоторое значение, называемое током (напряжением) срабатывания реле, создаваемая им электромагнитная сила станет больше противодействующей силы возвратной пружины *10*, якорь *3* реле притянется к сердечнику *2* и траверса *6*, поднявшись, обеспечит замыкание контактов *8* и размыкание контактов *7*. Сила нажатия в контактах создается пружиной *9*.

Если уменьшить (отключить) ток (напряжение) в катушке, то якорь под действием пружины *10* перейдет в исходное положение и контакты вернутся в «нормальное» (исходное) положение. Ток (напряжение), при котором якорь реле возвращается в исходное положение, носит название тока (напряжения) возврата или от-

пускания, а отношение тока (напряжения) возврата к току (напряжению) срабатывания — коэффициента возврата реле.

Ток (напряжение) срабатывания реле может регулироваться в определенных пределах изменением силы натяжения возвратной пружины *10* с помощью гайки *5*, а также за счет зазора δ, величина которого может регулироваться с помощью винта *4*. При затяжке пружины *10* или увеличении зазора ток (напряжение) срабатывания возрастает.

Поскольку контакты реле коммутируют небольшие (до 10 А) токи, в них обычно не используются дугогасительные камеры, а конструкции контактов простые.

Промежуточные электромагнитные реле применяются в основном для коммутации электрических цепей и размножения контактов других электрических аппаратов.

Реле времени представляет собой устройство, контакты которого замыкаются или размыкаются с некоторой выдержкой времени после получения сигнала управления.

Электромагнитное реле времени отличается от обычного реле наличием на магнитопроводе магнитной трубки (гильзы), которая и обеспечивает выдержку времени реле при отключении его катушки от источника питания.

Включение реле времени происходит, как у обычного электромагнитного реле. Выдержка времени обеспечивается за счет замедления возврата контактной системы реле в исходное положение из-за более медленного спадания магнитного потока при снятии с катушки напряжения. В соответствии с таким принципом действия электромагнитное реле времени обеспечивает выдержку при размыкании замыкающего контакта и замыкании размыкающего контакта. Выдержка времени реле регулируется путем установки латунной немагнитной прокладки ступенчато или плавно за счет изменения натяжения пружины.

Моторное (электромеханическое) реле времени в своей основе имеет специальный низкоскоростной двигатель и редуктор с большим передаточным числом, на выходном валу которого монтируется рычаг, начальное положение которого устанавливается по шкале уставок времени реле. Рычаг управляет работой вспомогательных контактов, которыми, в свою очередь, включается выходное электромагнитное реле.

Механическое реле времени имеет замедлитель в виде анкерного механизма, управляемого электромагнитом. При подаче напряжения на электромагнит (начало отсчета времени) его якорь заводит пружину анкерного механизма аналогично часовому. Последний, начав работать, перемещает подвижный контакт реле.

После заданного времени, определяемого положением (уставкой) неподвижного контакта реле, произойдет замыкание контактной системы, что определит конец отсчета времени.

PDF Compressor Free Version

Некоторые механические реле времени управляются не электромагнитом, а подвижной частью контактора. В этом случае запуск в работу анкерного механизма происходит сразу же после включения контактора. Такие реле времени получили название маятниковых.

Электронные реле времени обычно в своих схемах используют различные полупроводниковые элементы (чаще всего транзисторные) и конденсаторы, время разряда или заряда которых и определяет выдержку времени. Их выходной каскад реализуется на обычном электромагнитном реле.

Реле времени с герметичными контактами имеют ту особенность, что их контакты герметизированы и они являются одновременно и частью магнитопровода реле. Герметизация контактов повышает износостойкость и надежность реле в работе. В настоящее время разработаны герметичные контакты (герконы) на токи включения до 180 А, токи отключения до 60 А при номинальном токе 6,3 А.

Реле максимального тока предназначены для защиты контролируемых цепей и устройств от повышения тока сверх определенной величины.

Реле автоматики, защиты и сигнализации имеют самое разнообразное назначение и исполнение. К наиболее употребляемым в схемах электроснабжения, автоматики и защит относятся реле активной и реактивной мощности, реле счета импульсов, реле сигнализации и т.д.

Коммутационные электрические аппараты высокого напряжения. *Выключатели* предназначены для выполнения оперативной и аварийной коммутации в системах электроснабжения и включения и выключения отдельных электрических цепей и нагрузок.

Масляные выключатели характеризуются тем, что гашение возникающей при разрыве электрической цепи дуги происходит путем ее эффективного охлаждения в потоке газопаровой смеси, вырабатываемой дугой в результате разложения и испарения масла. Выключатели этого типа делятся на баковые (многообъемные), в которых масло используется для гашения дуги и изоляции токоведущих частей от бака, и малообъемные (маломасляные), в которых масло используется только для гашения дуги и изоляции контактов одного полюса.

Электромагнитные выключатели отключают цепи путем их размыкания сначала главными, а затем дугогасительными контакта-

ми, имеющими дугогасительные камеры. Для гашения дуги применяется так называемое магнитное дутье.

Вакуумные выключатели характеризуются тем, что гашение дуги происходит в вакууме.

Воздушные выключатели. В выключателях этого типа гашение дуги происходит подачей в дугогасительные устройства сжатого воздуха при давлении 6–8 МПа. Этот тип выключателей применяется в качестве сетевых на напряжение 6 кВ и выше, генераторных выключателей на напряжение 6–27 кВ, выключателей для электротермических установок при напряжении 6–220 кВ и в ряде других случаев. Для электрических систем с напряжением 350–500 кВ применяется другая дугогасящая среда — элегаз, представляющий собой шестифтористую серу (SF_6) и обладающий более высокой электрической прочностью.

Разъединители применяются для коммутации, отключения и переключения обесточенных электрических цепей и, в частности, для отделения на время ремонта или ревизии электрооборудования от смежных установок и линий, находящихся под напряжением, и обеспечения при этом видимого разрыва между ними. Разъединители выпускаются для внутренней и наружной установки.

Отделитель служит для отключения обесточенной цепи высокого напряжения за небольшое (не более 0,1 с) время, для чего снабжается быстродействующим приводом.

Короткозамыкатель служит для создания искусственного короткого замыкания в цепи высокого напряжения. По своей конструкции он подобен заземляющему устройству разъединителя, но снабжен быстродействующим приводом.

2.3. АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ

Развитие электроники и микроэлектроники идет по пути создания интегрированных элементов и устройств, что привело к созданию интегральных схем (ИС) и устройств управления на их основе. Интегральными называются микросхемы, элементы которых: транзисторы, диоды, резисторы и др. — неразрывно соединены электрически, конструктивно и технологически. Количество элементов в современных ИС может достигать нескольких тысяч и более на одном полупроводниковом кристалле, а сами ИС могут содержать один или более таких кристаллов.

Интегральные схемы классифицируются по нескольким признакам: виду электрических сигналов (аналоговые и цифровые), функ-

циональному назначению, степени интеграции, быстродействию, потребляемой мощности и др. Отдельную группу полупроводниковых устройств образуют оптоэлектронные приборы.

PDF Compressor Free Version

Оптоэлектронные приборы являются приборами, чувствительными к электромагнитному излучению в спектральном диапазоне от инфракрасного до ультрафиолетового, или излучают электромагнитную энергию в том же диапазоне. Оптоэлектронные приборы широко используются для передачи, обработки и отображения информации, а также в различных устройствах при необходимости гальванической развязки между электрическими цепями, например между схемой управления и силовой частью силового преобразователя электроэнергии. Применение находят следующие виды оптоэлектронных приборов.

1. *Светоизлучающий диод* (СИД) — это полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования электрической энергии в энергию светового излучения. Они в основном применяются для индикации готовности электротехнических устройств к работе, сигнализации о наличии на нем напряжения, аварийных ситуаций и других состояний различных объектов.

2. *Инфракрасный излучающий диод* (ИК-диод) — это полупроводниковый диод, который при протекании по нему прямого тока излучает электромагнитную энергию в инфракрасном диапазоне. Это излучение не воспринимается человеческим глазом и может регистрироваться лишь фотоприемником, чувствительным к соответствующей полосе спектра.

Принцип работы, исполнение и основные области применения у ИК-диодов аналогичны СИД. Кроме того, они применяются в устройствах и линиях, требующих оптической связи или гальванической развязки, а также в различных датчиках контроля и автоматики технологических процессов.

3. *Фоторезистор* — полупроводниковый прибор, сопротивление которого меняется в зависимости от его освещенности.

4. *Фотодиод* — диод, проводимость которого возникает при воздействии на него излучения в оптическом диапазоне.

5. *Фототиристор* — прибор, который переходит из одного устойчивого состояния в другое в результате воздействия на него светового потока.

6. *Фототранзистор* — полупроводниковый прибор, действие которого основано на использовании явления внутреннего эффекта.

7. *Оптопара* — это оптоэлектронный полупроводниковый прибор, состоящий из излучающего и фотоприемного элементов, между которыми есть оптическая связь и обеспечена электрическая изоляция (гальваническая развязка). Излучателем в оптопаре

может служить СИД, ИК-диод или сверхминиатюрная лампочка накаливания. В зависимости от вида фотоприемного элемента различают резисторные, диодные, транзисторные и тиристорные оптопары.

Аналоговые элементы и устройства оперируют с непрерывными (аналоговыми) электрическими сигналами. Основным элементом аналоговых устройств управления является операционный усилитель ОУ, на базе которого создаются различные регуляторы и функциональные преобразователи электрических сигналов.

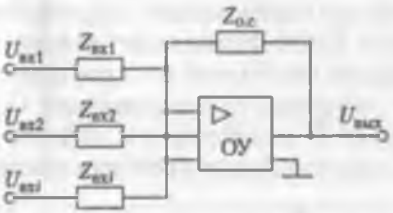


Рис. 2.10. Схема операционного усилителя

Операционный усилитель представляет собой усилитель постоянного тока с большим коэффициентом усиления (до тысячи и более), охваченный отрицательной обратной связью. Схема ОУ приведена на рис. 2.10, где через $Z_{вх1}$, ..., $Z_{вхi}$ обозначены комплексные в общем случае активно-емкостные входные сопротивления ОУ, а $Z_{o.c}$ — комплексное сопротивление цепи обратной связи. Операционный усилитель в этом случае осуществляет преобразование входных сигналов $U_{вхi}$ в соответствии с выражением

$$U_{вых} = -Z_{o.c}\sum_{1}^{m}\frac{U_{вхi}}{Z_{вхi}},$$

где m — количество входных сигналов.

В простейшем случае, когда на вход ОУ поступает один входной сигнал $U_{вх}$, а $Z_{o.c}=R_{o.c}$ и $Z_{вх1}=R_1$, имеет место следующее преобразование сигнала:

$$U_{вых} = -R_{o.c}\frac{U_{вх}}{R_1} = kU_{вх},$$

т.е. осуществляется его умножение на коэффициент $k=\frac{R_{o.c}}{R_1}$ и изменение знака на противоположный. При $R_{o.c}=R_1$ ($k=1$) имеет место так называемое инвертирование входного сигнала по знаку.

циональному назначению, степени интеграции, быстродействию, потребляемой мощности и др. Отдельную группу полупроводниковых устройств образуют оптоэлектронные приборы.

PDF Compressor Free Version

Оптоэлектронные приборы являются приборами, чувствительными к электромагнитному излучению в спектральном диапазоне от инфракрасного до ультрафиолетового, или излучают электромагнитную энергию в том же диапазоне. Оптоэлектронные приборы широко используются для передачи, обработки и отображения информации, а также в различных устройствах при необходимости гальванической развязки между электрическими цепями, например между схемой управления и силовой частью силового преобразователя электроэнергии. Применение находят следующие виды оптоэлектронных приборов.

1. *Светоизлучающий диод* (СИД) — это полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования электрической энергии в энергию светового излучения. Они в основном применяются для индикации готовности электротехнических устройств к работе, сигнализации о наличии на нем напряжения, аварийных ситуаций и других состояний различных объектов.

2. *Инфракрасный излучающий диод* (ИК-диод) — это полупроводниковый диод, который при протекании по нему прямого тока излучает электромагнитную энергию в инфракрасном диапазоне. Это излучение не воспринимается человеческим глазом и может регистрироваться лишь фотоприемником, чувствительным к соответствующей полосе спектра.

Принцип работы, исполнение и основные области применения у ИК-диодов аналогичны СИД. Кроме того, они применяются в устройствах и линиях, требующих оптической связи или гальванической развязки, а также в различных датчиках контроля и автоматики технологических процессов.

3. *Фоторезистор* — полупроводниковый прибор, сопротивление которого меняется в зависимости от его освещенности.

4. *Фотодиод* — диод, проводимость которого возникает при воздействии на него излучения в оптическом диапазоне.

5. *Фототиристор* — прибор, который переходит из одного устойчивого состояния в другое в результате воздействия на него светового потока.

6. *Фототранзистор* — полупроводниковый прибор, действие которого основано на использовании явления внутреннего эффекта.

7. *Оптопара* — это оптоэлектронный полупроводниковый прибор, состоящий из излучающего и фотоприемного элементов, между которыми есть оптическая связь и обеспечена электрическая изоляция (гальваническая развязка). Излучателем в оптопаре

может служить СИД, ИК-диод или сверхминиатюрная лампочка накаливания. В зависимости от вида фотоприемного элемента различают резисторные, диодные, транзисторные и тиристорные оптопары.

Аналоговые элементы и устройства оперируют с непрерывными (аналоговыми) электрическими сигналами. Основным элементом аналоговых устройств управления является операционный усилитель ОУ, на базе которого создаются различные регуляторы и функциональные преобразователи электрических сигналов.

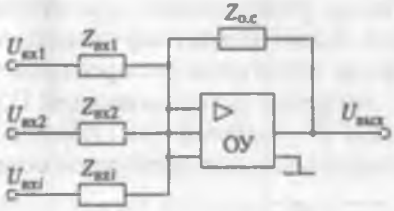


Рис. 2.10. Схема операционного усилителя

Операционный усилитель представляет собой усилитель постоянного тока с большим коэффициентом усиления (до тысячи и более), охваченный отрицательной обратной связью. Схема ОУ приведена на рис. 2.10, где через $Z_{вх1}$, ..., $Z_{вхi}$ обозначены комплексные в общем случае активно-емкостные входные сопротивления ОУ, а $Z_{o.c}$ — комплексное сопротивление цепи обратной связи. Операционный усилитель в этом случае осуществляет преобразование входных сигналов $U_{вхi}$ в соответствии с выражением

$$U_{вых} = -Z_{o.c}\sum_{1}^{m}\frac{U_{вхi}}{Z_{вхi}},$$

где m — количество входных сигналов.

В простейшем случае, когда на вход ОУ поступает один входной сигнал $U_{вх}$, а $Z_{o.c}=R_{o.c}$ и $Z_{вх1}=R_1$, имеет место следующее преобразование сигнала:

$$U_{вых} = -R_{o.c}\frac{U_{вх}}{R_1} = kU_{вх},$$

т.е. осуществляется его умножение на коэффициент $k=\frac{R_{o.c}}{R_1}$ и изменение знака на противоположный. При $R_{o.c}=R_1$ ($k=1$) имеет место так называемое инвертирование входного сигнала по знаку.

Если $Z_{o.c}=R_{o.c}$ и $Z_{вхi}=R_{вхi}$, то ОУ суммирует подаваемые на него электрические входные сигналы с одновременным умножением их на соответствующий коэффициент $k_i=\frac{R_{o.c}}{R_{вхi}}$, тогда

PDF Compressor Free Version

$$U_{вых}=-\sum_{1}^{m}U_{вхi}k_i.$$

При включении во входные цепи и цепи обратных связей наряду с резисторами также и конденсаторов ОУ позволяют осуществлять и другие преобразования входных сигналов, необходимые для получения нужных управляющих воздействий в схемах управления и автоматики. Такие схемы получили название регуляторов. В табл. 2.2 приведены некоторые распространенные схемы и характеристики регуляторов с использованием ОУ.

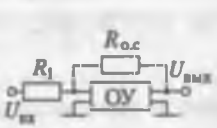
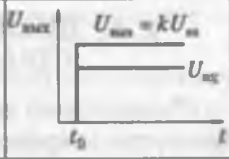
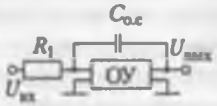
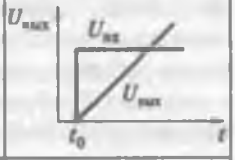
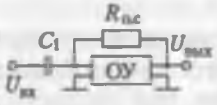
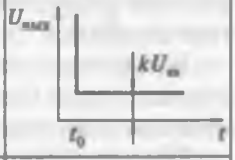
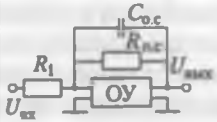
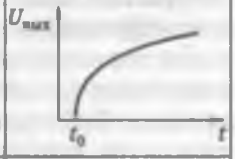
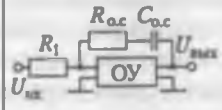
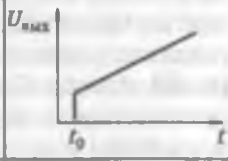
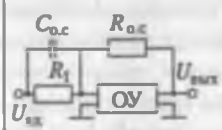
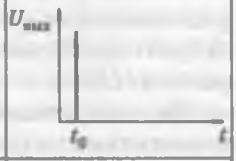
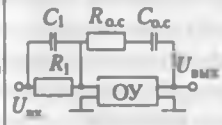
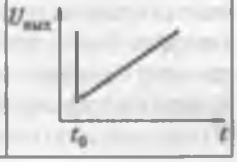
Пропорциональный П-регулятор (см. первую строку табл. 2.2) осуществляет пропорциональное преобразование входного сигнала с коэффициентом $k=\frac{R_{o.c}}{R_1}$ и инвертированием знака входного сигнала. В столбце 5 табл. 2.2 показана зависимость изменения во времени выходного сигнала П-регулятора при подаче на него ступенчатого входного сигнала в момент времени t_0, называемая переходной функцией.

Схемы и характеристики *интегрального И-регулятора, дифференциального Д-регулятора, апериодического А-регулятора, пропорционально-интегрального (ПИ), пропорционально-дифференциального (ПД) и пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регуляторов* также приведены в табл. 2.2.

Операционные усилители широко используются также в схемах компараторов, формирователей импульсов, генераторов электрических сигналов, ограничителей, усилителей и во многих других устройствах.

Примером реализации серийных аналоговых средств управления и их функций явилась разработка унифицированной блочной системы регулирования (УБСР) в виде серии УБСР-А (на обычных элементах электроники) и затем серии УБСР-АИ (на интегральных микросхемах), которая предназначалась главным образом для применения в схемах автоматики. Функциональные преобразователи, входящие в состав УБСР-АИ, позволяют возводить в квадрат и извлекать квадратный корень из входного сигнала, умножать и делить входные аналоговые сигналы, выделять модуль сигнала, формировать различные нелинейные зависимости меж-

Схемы регуляторов

Тип регулятора	Схема	Вид преобразования	Параметры регулятора	Переходная функция
П		$U_{вых} = kU_{вх}$	$k = \frac{R_{о.с}}{R_1}$	
И		$U_{вых} = \frac{1}{T}\int U_{вх}dt$	$T = R_1 C_{о.с}$	
Д		$U_{вых} = T\frac{dU_{вх}}{dt}$	$T = R_{о.с} C_1$	
А		$U_{вых} = kU_{вх} + \frac{1}{T}\int U_{вх}dt$	$k = \frac{R_{о.с}}{R_1}$ $T = R_{о.с} C_{о.с}$	
ПИ		$U_{вых} = k(U_{вх} + \frac{1}{T}\int U_{вх}dt)$	$k = \frac{R_{о.с}}{R_1}$ $T = R_{о.с} C_{о.с}$	
ПД		$U_{вых} = k(U_{вх} + \frac{TdU_{вх}}{dt})$	$k = \frac{R_{о.с}}{R_1}$ $T = R_1 C_1$	
ПИД		$U_{вых} = k(U_{вх}(1 + \frac{T_2}{T_1}) + \frac{TdU_{вх}}{dt} + \frac{1}{T}\int U_{вх}dt)$	$k = \frac{R_{о.с}}{R_1}$ $T_1 = R_{о.с} C_{о.с}$ $T_2 = R_1 C_1$	

ду входным и выходным сигналами. Эти преобразователи также реализованы на базе одного или нескольких ОУ.

Помимо этого, в состав УБСР-АИ входят командные (задающие) устройства, задатчики интенсивности скорости, датчики тока и напряжения, устройства согласования, ячейки гальванической развязки и фильтров.

PDF Compressor Free Version

2.4. ДИСКРЕТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ

Тенденцией развития систем управления и автоматизации является широкое применение в них дискретных элементов и устройств. Такие схемы, получившие название цифровых, характеризуются высокими точностью, быстродействием и надежностью в работе, малым энергопотреблением и хорошей помехоустойчивостью. Цифровые схемы управления естественным образом сочетаются с ЭВМ, составляя с ними единую автоматизированную систему управления технологическим процессом, предприятием или отраслью.

В некоторых случаях целесообразно создание смешанных, цифроаналоговых схем, сочетающих в себе наилучшие свойства аналоговых и дискретных элементов и устройств.

Триггер является одним из наиболее распространенных элементов цифровых устройств управления, обладающих двумя устойчивыми состояниями и способными скачком переходить из одного состояния в другое под воздействием внешнего управляющего сигнала. Триггер может рассматриваться как элементарная ячейка памяти, которая может хранить 1 бит информации, т.е. он может запомнить предварительно установленный в нем уровень логического сигнала 0 или 1 и сохранять этот уровень до момента новой записи. С использованием триггеров строятся различные логические и вычислительные узлы, а также генерирующие устройства и устройства памяти. По способу записи информации различают следующие типы триггеров: *R-S*-триггер, *J-K*-триггер, *D*-триггер, *T*-триггер, характеристики которых подробно рассмотрены в [26].

Вычислительные устройства. Эти устройства предназначены для выполнения различных арифметических операций. Вычислительные операции выполняются в цифровых узлах на основе двоичной (цифры 0 и 1), восьмеричной (цифры от 0 до 7) или шестнадцатиричной (цифры от 0 до 9 и шесть латинских букв — *A* (десять), *B* (одиннадцать), *C* (двенадцать), *D* (тринадцать), *E* (четырнадцать), *F* (пятнадцать)) систем счисления. Шестнадцатиричная и восьми-

ричная системы позволяют осуществлять более краткую и удобную запись информации в двоичной форме.

К вычислительным устройствам относятся счетчики, сумматоры и компараторы (устройства сравнения).

Счетчик. Это цифровой узел, предназначенный для подсчета числа входных сигналов. Они подразделяются на суммирующие, вычитающие и реверсивные. Реверсивные счетчики обеспечивают как суммирование, так и вычитание чисел, а вычитающие — только вычитание.

Сумматор. Этот цифровой узел выполняет операцию сложения двух чисел. Обычно сумматор представляет собой совокупность одноразрядных суммирующих схем, работающих в соответствии с таблицей двоичного сложения. Сумматоры позволяют осуществлять и операцию вычитания, для чего ее заменяют операцией сложения уменьшаемого с поразрядным дополнением вычитаемого.

Компаратор. Этот цифровой узел выполняет функцию сравнения двух чисел A_n и B_n. В результате сравнения определяется истинность одного из соотношений: $A_n = B_n$; $A_n > B_n$; $A_n < B_n$, каждое из которых фиксируется единичным сигналом на соответствующем выходе.

Логические цифровые узлы осуществляют различные логические операции над дискретными электрическими сигналами. К ним относятся распределители импульсов, шифраторы, дешифраторы и мультиплексоры.

Распределитель импульсов представляет собой цифровой узел, который обеспечивает распределение одноканальной последовательности импульсов по нескольким выходам.

Дешифратор (декодер) осуществляет такое преобразование сигнала на n входах, при котором на одном его выходе вырабатывается сигнал 1, а на всех остальных сохраняются сигналы 0. Шифратор преобразует единичный сигнал на одном из входов в двоичное число на нескольких выходах.

Мультиплексор — цифровой узел, обеспечивающий передачу сигналов с нескольких входных линий в одну выходную. Выбор входной линии производится с помощью управляющего импульсного сигнала (кода), подаваемого на управляющие входы мультиплексора. Мультиплексор может быть выполнен на основе схемы дешифратора путем ее некоторого преобразования.

Устройства памяти. Эти устройства предназначены для запоминания, хранения и выдачи информации. К ним относятся регистры, матрицы-накопители и запоминающие устройства (ЗУ): оперативные (ОЗУ) и постоянные (ПЗУ).

Регистр предназначен для записи, запоминания и выдачи многоразрядного двоичного числа и выполнения над ним некоторых несложных логических операций. С помощью введения дополнительных связей и логических элементов в регистрах возможно выполнение таких логических операций, как инвертирование кода, сдвиг числа вправо или влево на требуемое число разрядов, передача чисел в другой разряд и т.д.

PDF Compressor Free Version

Матрица-накопитель представляет собой узел памяти с более высоким объемом запоминаемой информации по сравнению с регистром. Основу матрицы составляют триггеры, способные запомнить 1 бит информации (одноразрядное двоичное число). Многоразрядная матрица состоит из одноразрядных матриц, соединенных параллельно. Разновидностью матрицы-накопителя более высокого функционального уровня является программируемая логическая матрица (ПЛМ).

Запоминающее устройство (ЗУ) обеспечивает хранение больших объемов информации. Запоминающие устройства, обеспечивающие многократную запись и считывание информации, получили название оперативных запоминающих устройств. Особенность ОЗУ состоит в том, что оно хранит информацию только при наличии питания, а при его потере информация теряется.

Запоминающие устройства, предназначенные для постоянного хранения единожды записанной информации, получили название постоянных запоминающих устройств. Эти устройства способны сохранять записанную в них информацию и при потере питания; они характеризуются большим объемом хранимой информации, более простыми по сравнению с ОЗУ схемами и меньшим энергопотреблением.

Цифроаналоговые (ЦАП) и аналого-цифровые (АЦП) преобразователи применяются для взаимного преобразования аналоговых и цифровых сигналов. Они могут выполняться в виде преобразователя код – напряжение (ПКН), преобразующего двоичный или двоично-десятичный код в напряжение постоянного тока, а также преобразователей частота – напряжение (ПЧН) и напряжение – частота (ПНЧ), осуществляющих преобразование частоты следования импульсов в напряжение постоянного тока и обратное преобразование.

Примером серийной реализации цифровых устройств управления может служить унифицированная блочная система регулирования дискретной информации УБСР-ДИ.

В состав УБСР-ДИ входят блоки для обработки цифровой информации (формирователь чисел, дискриминатор чисел, арифметическое устройство) и частотных сигналов (генератор частотных сигна-

лов, цифровой интегратор, управляемый делитель частоты), преобразования кода числа в частоту и частоты в код числа, ввода и вывода информации (регистры памяти входной и выходной, формирователь сигналов импульсных и кодовых датчиков положения, усилители выходные) и связи с аналоговыми элементами схем управления.

На базе этих цифровых узлов в рамках УБСР-ДИ разработаны типовые блоки управления, позволяющие выполнять сложные арифметические и логические операции.

2.5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Логическими элементами (ЛЭ) называются дискретные элементы, напряжения на входе и выходе которых могут принимать или высокое — логическая единица (далее 1) или низкое — логический нуль (далее 0) значения. Они могут выполняться на электромагнитных реле, магнитных элементах и в виде ИС, являющихся современным их исполнением.

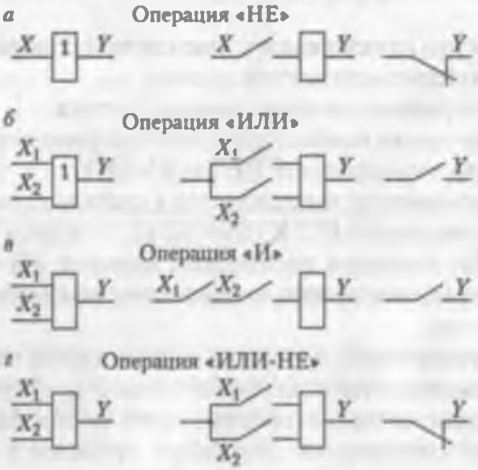


Рис. 2.11. Логические элементы:
а — «НЕ»; *б* — «ИЛИ»; *в* — «И»; *г* — «ИЛИ-НЕ»

На рис. 2.11 показаны схемы простейших ЛЭ. *Логический элемент* «НЕ» (рис. 2.12, *а*) выполняет операцию отрицания (инвертирования). При наличии входного сигнала $X = 1$ выходной сигнал отсутствует ($Y = 0$), а при отсутствии входного ($X = 0$) выходной сигнал равен

Регистр предназначен для записи, запоминания и выдачи многоразрядного двоичного числа и выполнения над ним некоторых несложных логических операций. С помощью введения дополнительных связей и логических элементов в регистрах возможно выполнение таких логических операций, как инвертирование кода, сдвиг числа вправо или влево на требуемое число разрядов, передача чисел в другой разряд и т.д.

PDF Compressor Free Version

Матрица-накопитель представляет собой узел памяти с более высоким объемом запоминаемой информации по сравнению с регистром. Основу матрицы составляют триггеры, способные запомнить 1 бит информации (одноразрядное двоичное число). Многоразрядная матрица состоит из одноразрядных матриц, соединенных параллельно. Разновидностью матрицы-накопителя более высокого функционального уровня является программируемая логическая матрица (ПЛМ).

Запоминающее устройство (ЗУ) обеспечивает хранение больших объемов информации. Запоминающие устройства, обеспечивающие многократную запись и считывание информации, получили название оперативных запоминающих устройств. Особенность ОЗУ состоит в том, что оно хранит информацию только при наличии питания, а при его потере информация теряется.

Запоминающие устройства, предназначенные для постоянного хранения единожды записанной информации, получили название постоянных запоминающих устройств. Эти устройства способны сохранять записанную в них информацию и при потере питания; они характеризуются большим объемом хранимой информации, более простыми по сравнению с ОЗУ схемами и меньшим энергопотреблением.

Цифроаналоговые (ЦАП) и аналого-цифровые (АЦП) преобразователи применяются для взаимного преобразования аналоговых и цифровых сигналов. Они могут выполняться в виде преобразователя код – напряжение (ПКН), преобразующего двоичный или двоично-десятичный код в напряжение постоянного тока, а также преобразователей частота – напряжение (ПЧН) и напряжение – частота (ПНЧ), осуществляющих преобразование частоты следования импульсов в напряжение постоянного тока и обратное преобразование.

Примером серийной реализации цифровых устройств управления может служить унифицированная блочная система регулирования дискретной информации УБСР-ДИ.

В состав УБСР-ДИ входят блоки для обработки цифровой информации (формирователь чисел, дискриминатор чисел, арифметическое устройство) и частотных сигналов (генератор частотных сигна-

лов, цифровой интегратор, управляемый делитель частоты), преобразования кода числа в частоту и частоты в код числа, ввода и вывода информации (регистры памяти входной и выходной, формирователь сигналов импульсных и кодовых датчиков положения, усилители выходные) и связи с аналоговыми элементами схем управления.

На базе этих цифровых узлов в рамках УБСР-ДИ разработаны типовые блоки управления, позволяющие выполнять сложные арифметические и логические операции.

2.5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Логическими элементами (ЛЭ) называются дискретные элементы, напряжения на входе и выходе которых могут принимать или высокое — логическая единица (далее 1) или низкое — логический нуль (далее 0) значения. Они могут выполняться на электромагнитных реле, магнитных элементах и в виде ИС, являющихся современным их исполнением.

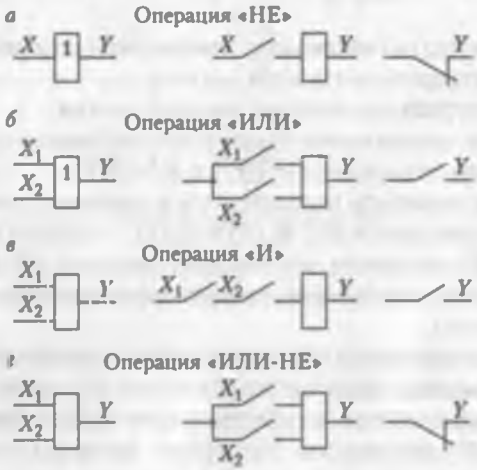


Рис. 2.11. Логические элементы:
а — «НЕ»; *б* — «ИЛИ»; *в* — «И»; *г* — «ИЛИ-НЕ»

На рис. 2.11 показаны схемы простейших ЛЭ. *Логический элемент* «НЕ» (рис. 2.12, *а*) выполняет операцию отрицания (инвертирования). При наличии входного сигнала $X = 1$ выходной сигнал отсутствует ($Y = 0$), а при отсутствии входного ($X = 0$) выходной сигнал равен

$Y = 1$. Эта логическая операция может выполняться и с помощью электромагнитного реле, что также отражено на рисунке.

Логический элемент «ИЛИ». Сигнал на выходе элемента появляется при наличии хотя бы одного входного сигнала — X_1 или X_2 (рис. 2.12, *б*). Операция «ИЛИ» может выполняться для любого количества входных сигналов.

PDF Compressor Free Version

Логический элемент «И». Сигнал на выходе $Y = 1$ (рис. 2.12, *в*) появляется только в том случае, если оба входных сигнала равны 1. В остальных случаях $Y = 0$.

Логический элемент «ИЛИ-НЕ» (рис. 2.12, *г*). В этом более сложном элементе при наличии хотя бы одного сигнала на входе (X_1, $X_2 = 1$) сигнал на выходе $Y = 0$, а при отсутствии входных (X_1, $X_2 = 0$) сигнал на выходе $Y = 1$.

Кроме рассмотренных примеров логические элементы могут выполнять запоминание определенного уровня входного сигнала (операция «Память»), блокировку (операция «Запрет»), выдержку времени на включение и отключение и другие операции.

Интегральные микросхемы логических элементов могут иметь различную технологию изготовления:

ТТЛ — транзисторно-транзисторная логика и ее разновидность ТТЛШ;

КМОП — логика на основе комплементарных полевых транзисторов;

ЭСЛ — эмиттерно-связанная логика;

И2Л — интегральная инжекционная логика.

В настоящее время наибольшее распространение получили логические ИС по технологиям ТТЛ и КМОП.

Логические элементы выпускаются в составе серии «Логика И», в которой используются ИС К155 и К511. Базовым элементом серии «Логика И» является логический элемент «И-НЕ». В состав этой серии, кроме логических, входят элементы согласования, времени и усилители.

Элемент согласования содержит миниатюрное герконовое реле типа РПГ-6 с малым энергопотреблением и достаточно высоким быстродействием, которое обеспечивает также гальваническую развязку цепей управления. Элементы времени в составе серии «Логика И» обеспечивают выдержки времени от 0,01 до 10 с. Усилители предназначены для управления по сигналам логических элементов исполнительными механизмами, потребляющими мощность до нескольких десятков ватт. Они выполняются на мощных транзисторах и имеют дискретный выход.

В настоящее время наибольшее распространение получили ЛЭ на базе интегральных микросхем, в состав которых могут входить несколько логических элементов.

2.6. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ

В настоящее время микропроцессорные средства широко применяются во всех областях деятельности человека. Их основой является *микропроцессор* (МП) — программно-управляемое цифровое устройство, предназначенное для обработки информации и управления этим процессом.

Микропроцессор выполняется на основе одной или нескольких больших ИС (БИС), которые состоят из нескольких десятков тысяч простых элементов и могут иметь 24, 40, 48 и 64 вывода. Площадь БИС не превосходит нескольких десятков квадратных миллиметров, что определяет малое энергопотребление МП, его надежность в работе, небольшие массу и габаритные размеры, а при массовом выпуске — невысокую стоимость БИС. Выпуск БИС для МП в развитых странах удваивается примерно каждые 2 года.

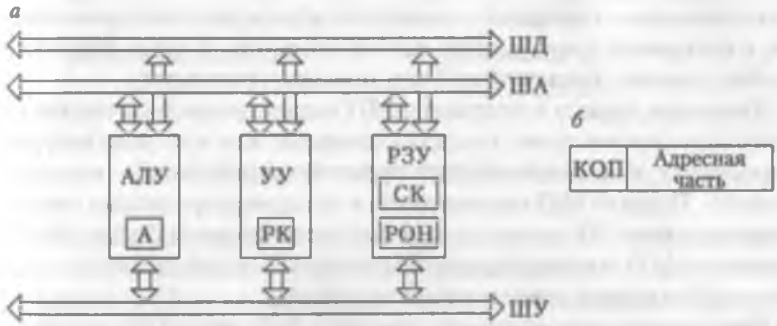


Рис. 2.12. Схема (*а*) и структура команды (*б*) микропроцессора

Структурная схема микропроцессора показана на рис. 2.12, *а*. В нее входят арифметико-логическое устройство (*АЛУ*), устройство управления (*УУ*) и регистровое запоминающее устройство (*РЗУ*). Эти три основные части МП соединены тремя линиями связи — шинами данных *ШД*, адресов *ША* и управления *ШУ*.

Арифметико-логическое устройство предназначено для выполнения арифметических и логических операций над данными в виде двоичных чисел. Данные, с которыми производятся эти операции, называются операндами. Обычно в операции участвуют два операнда, один из которых находится в специальном регистре — аккумуляторе А, а другой — в регистрах РЗУ или памяти МП. Иногда АЛУ называют операционной частью МП.

Регистровое запоминающее устройство содержит несколько регистров общего назначения *(РОН)*, а также регистров специального назначения, в частности счетчик команд *(СК)*. Иногда *РЗУ* называют внутренней памятью МП.

PDF Compressor Free Version

Управляющее устройство предназначено для выработки сигналов управления, обеспечивающих работу блоков МП. В состав *УУ* входит регистр команд *(РК)*, в котором фиксируется выполняемая в данный момент команда.

Команды, обеспечивающие реализацию заданного алгоритма обработки информации, образуют программу и выполняются в пошаговом режиме строго в записанной последовательности.

Каждая команда программы содержит информацию о том, что нужно делать, с какими операндами и по какому адресу поместить результат операции. Для этого команда имеет структуру, приведенную на рис. 2.12, *б*. Первая часть команды содержит код операции *(КОП)*, т.е. информацию о характере выполнения операции над операндами (например, сложение, логическое сравнение и т.д.). Вторая часть команды — адресная — содержит адреса расположения операндов, с которыми производится данная операция, и адрес регистра или ячейки памяти, куда должен быть помещен результат.

Команды, адреса и операнды МП выражаются двоичными многоразрядными числами, представляемыми, как и во всех цифровых устройствах, комбинацией двух уровней напряжения — высокого и низкого. Первые МП оперировали с четырехразрядными числами, а современные ЭП — с восьми- и шестнадцатиразрядными. Использование в МП многоразрядных двоичных чисел позволяет повысить их быстродействие и точность работы.

Программа (совокупность команд) МП может быть записана несколькими способами. Первый из них предусматривает запись команд непосредственно в виде двоичных чисел, т.е. в виде так называемого машинного кода, «понятного» данному МП.

Более удобным является использование языков программирования. Языки низкого уровня типа Ассемблер как средство общения с МП включают в себя несколько десятков типовых команд, представленных в условных мнемокодах. Например, язык этого типа для отечественного восьмиразрядного МП типа К580 включает в себя около 80 типовых команд — арифметических, логических, пересылки данных, передачи управления и ряд других.

Еще большие возможности и удобства пользователю микропроцессорными схемами управления представляют языки программирования высокого уровня: ФОРТРАН, ПАСКАЛЬ МТ+, ПЛ/М, БЕЙСИК-80, СИ, АДА и их разновидности (диалекты). Составленные на этих языках программы далее транслируются (перево-

дятся) с помощью специальных программ, получивших название кросс-программ, в систему машинных кодов, «понятных» МП.

Для выполнения функции управления схема МП дополняется целым рядом блоков, в результате чего образуется *микропроцессорная система* (МПС), структурная схема которой приведена на рис. 2.13.

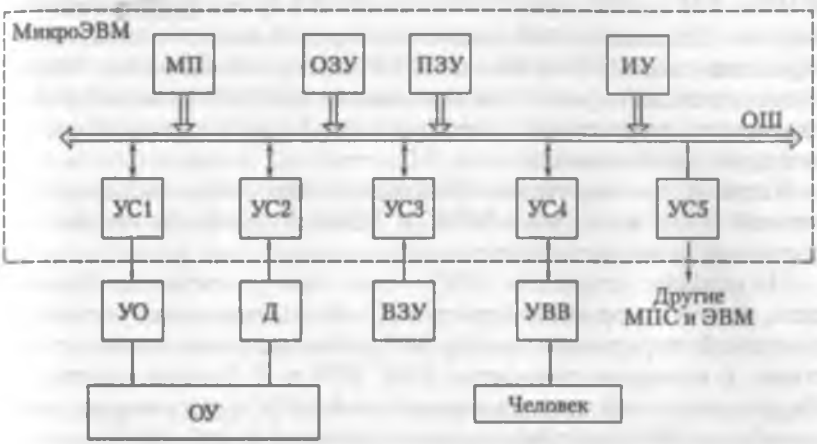


Рис. 2.13. Схема микропроцессорной системы

В состав МПС наряду с МП в общем случае входят устройства памяти *ОЗУ* и *ПЗУ*, интерфейсное устройство *(ИУ)*, устройства сопряжения *(УС)* с внешними объектами; внешние запоминающие устройства *ВЗУ*, устройства ввода-вывода информации *(УВВ)*, общая шина *(ОШ)*, включающая в себя *ШД*, *ШУ* и *ША*.

Память *ОЗУ* и *ПЗУ* служит для размещения подлежащих обработке данных программы, в соответствии с которой эта обработка должна вестись, и результатов обработки. Для расширения возможностей МПС, кроме *ОЗУ* и *ПЗУ*, могут использоваться *ВЗУ*, к числу которых относятся накопители информации на гибких магнитных дисках, магнитной ленте, кассетные накопители.

Устройства ввода-вывода информации предназначены для обеспечения взаимодействия МПС и человека в удобной для него форме. К устройствам ввода-вывода относятся клавиатура пульта управления МПС, печатающая машинка (принтер), графопостроители, устройства визуального представления информации (дисплеи) и т.д.

Устройства сопряжения обеспечивают связь МПС с различными внешними (периферийными) устройствами. Они могут иметь

самые разнообразные схемные и элементные реализации. В частности, для согласования сигналов датчиков *Д* объекта управления *ОУ* с МПС используются аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые (ЦАП) преобразователи электрических сигналов, обозначенные на схеме *УС1* и *УС2*.

PDF Compressor Free Version

Устройства сопряжения *УС3* и *УС4*, предназначенные для связи МПС с *ВЗУ* и *УВВ*, представляют собой в простейшем случае буферные (промежуточные) регистры памяти для хранения данных, передаваемых с *ОШ* на внешние устройства или обратно. Устройства сопряжения, получившие название контроллеров (микроконтроллеров), выполняют более сложные функции, и их работа может программироваться.

Устройства сопряжения *УС5* выполняют согласование работы данной МПС с другими МПС и ЭВМ. Устройства такого типа получили название адаптеров.

Интерфейс устройств *(ИУ)* — это совокупность электронных схем, шин и алгоритмов (программ), обеспечивающая управление передачей информации между МП, памятью и внешними устройствам, к которым относятся *УВВ, ВЗУ* и *Д*. Говоря кратко, *ИУ* обеспечивает требуемое взаимодействие МПС с указанными внешними устройствами при изменении режима ее работы. Типичным примером является переход от выполнения одной программы к выполнению другой при поступлении от какого-либо внешнего устройства сигнала управления. Такой переход получил название прерывания. После завершения прерывающей программы *ИУ* обеспечивает возврат МПС к работе по прерванной программе. Примерами *ИУ* являются таймер, блок прямого доступа к памяти, блок организации прерываний.

По назначению и своим характеристикам различают следующие виды МПС.

1. *Унифицированные блочные микропроцессорные комплексы и программируемые логические контроллеры*, которые предназначены для создания локальных систем автоматического управления отдельных агрегатов, технологических комплексов и промышленных систем.

2. *Специализированные мини- и микроЭВМ* ориентированы на конкретный тип объекта управления и наиболее часто используются как встраиваемые.

3. *Мини- и микроЭВМ общего назначения, персональные ЭВМ, управляющие мини- и микроЭВМ* имеют в своем составе широкий набор устройств сопряжения, ввода-вывода и обладают возможностью выполнения больших объемов вычислительных операций. В связи с этим они применяются при решении сложных задач

управления, таких, как оптимизация технологических процессов, статистические методы их контроля, хранения и обработки больших объемов информации, управление в реальном масштабе времени и др.

Программируемые контроллеры (ПК) представляют собой МПС, предназначенные для управления локальными объектами в реальном масштабе времени. Появившиеся как средство для замены релейной автоматики и устройств жесткой логики на ИС малой и средней степени интеграции, ПК в настоящее время представляют собой класс МПС, ориентированных на широкое использование в промышленной среде для решения самых разнообразных задач автоматизации. Для этого ПК имеют соответствующее конструктивное исполнение и специальное программное обеспечение, легко осваиваемое персоналом, не имеющим специальной подготовки в области программирования.

Рис. 2.14. Схема программируемого контроллера

Принцип действия ПК иллюстрирует рис. 2.14. Основную часть схемы ПК образуют запоминающее устройство *ЗУ*, в котором содержится программа его работы; логический процессор *ЛП* (арифметическо-логическое устройство *АЛУ*), осуществляющий логические операции над последовательно вводимыми в него сигналами; коммутатор входных *К1* и выходных *К2* сигналов; устройства сопряжения ПК с входными *УС1* и выходными *УС2* сигналами; память *П*, в которую поступают результаты выполнения логических операций.

Входные сигналы $U_{вх1}$, $U_{вх2}$, ..., $U_{вхi}$, содержащие информацию о ходе технологического процесса, режимах работы отдельных частей управляемого объекта, состоянии защиты и т.д., поступают на вход *УС1*, которое обеспечивает их гальваническую развязку и формирование из них сигналов, соответствующих величине и виду используемых в данном ПК.

Сформированные таким образом сигналы поступают на вход *К1*, который последовательно подает на *ЛП* тот из них, адрес которого содержится в очередной команде, поступающей из *ЗУ*.

После выполненных *ЛП* преобразований, которые также определяются заложенной в *ЗУ* программой, сигналы через коммутатор *К2* поступают в регистр памяти *П* и далее через *УС2* на выход ПК.

PDF Compressor Free Version

В качестве входных допускаются сигналы напряжением от 5 до 250 В постоянного или переменного тока, общее число которых может достигать тысячи и более. Выходные устройства сопряжения *УС2* обычно строятся на основе оптронных тиристоров, обеспечивающих гальваническую развязку выходных цепей и позволяющих управлять достаточно мощными исполнительными устройствами — реле, контакторами, катушками электромагнитов и т.д.

Программирование ПК ведется на проблемно-ориентированных языках, специализированных для решения задач дискретного логического управления. К ним относятся:

- графические языки релейно-контакторных схем (РКС);
- графические языки логических схем, использующие типовые логические функции;
- языки мнемонического символьного кодирования в виде набора строк-уравнений сложных булевых выражений;
- языки ассемблерного типа;
- проблемно-ориентированные языки высокого уровня — Графсет, ЯРУС-2, ФОКОН-2 или модифицированные традиционные языки программирования (Бейсик, Паскаль).

2.7. ДАТЧИКИ ВРЕМЕНИ И КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Для работы схем управления электропривода необходима информация о текущих значениях его скорости, тока, момента и других координат, а также времени. Устройства, которые выдают подобную информацию в виде электрических сигналов, получили название датчиков.

Датчики времени. При построении релейно-контакторных схем управления, использующих принцип времени, в качестве датчиков используются различные реле времени — электромагнитные, моторные, электронные, анкерные и механические. В полупроводниковых схемах управления применяются устройства точного отсчета временных интервалов, получившие название таймеров.

Электромагнитное реле времени состоит из неподвижной части магнитопровода *2*, на котором установлена катушка *1* (рис. 2.15), и подвижной части магнитной системы (якорь *6*) с установленными на ней контактами *8* и *9*. При отсутствии напряжения на катушке якорь *6* под действием пружины *4* находится в поднятом положении.

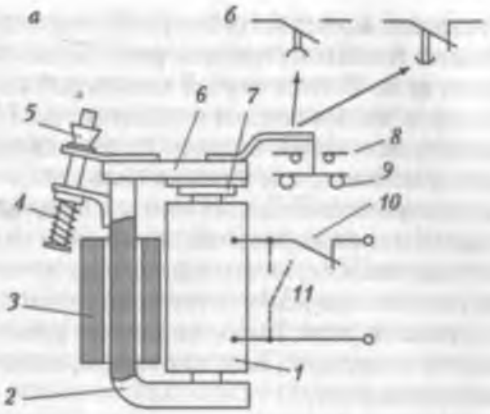


Рис. 2.15. Схема устройства электромагнитного реле времени

Обенностью конструкции реле времени является наличие на магнитопроводе *2* массивной медной трубки *3* (гильзы), которая и обеспечивает выдержку времени реле при отключении его катушки от источника питания. Рассмотрим этот процесс подробнее.

Включение реле происходит, как у обычного электромагнитного реле, подачей напряжения *U* на катушку *1* после замыкания контакта *10*. Якорь *6*, притягиваясь к сердечнику, осуществляет без выдержки времени переключение контактов *8* и *9*.

Выдержка времени обеспечивается за счет замедления возврата якоря в исходное положение. При снятии с катушки напряжения спадающий магнитный поток создает в гильзе вихревые токи, которые, по правилу Ленца, своим магнитным потоком поддерживают основной поток. Другими словами, наличие гильзы замедляет (демпфирует) спадание магнитного потока, а тем самым и перемещение якоря и контактной системы в исходное (отключенное) положение. В соответствии с таким принципом действия электромагнитное реле времени обеспечивает выдержку при размыкании замыкающего контакта и замыкании размыкающего контакта (рис. 2.15, *б*).

Выдержка времени реле регулируется ступенчато путем установки латунной немагнитной прокладки *7* определенной толщины, закрепляемой на якоре *6* (уменьшение толщины прокладки вызывает увеличение выдержки реле, и наоборот), или плавно за счет изменения натяжения пружины *4* с помощью гайки *5*. Чем меньше будет затянута пружина, тем больше будет выдержка времени, и наоборот.

Выдержка времени может быть получена у электромагнитного реле без установки гильзы путем закорачивания катушки после отключения ее от сети. В этом случае замкнутый контур, образованный катушкой и замыкающим ее контактом *11*, играет роль электромагнитного демпфера. Однако выдержка времени в этом случае получается меньше, чем у реле с гильзой.

PDF Compressor Free Version

Моторное (электромеханическое) реле времени в своей основе имеет специальный низкоскоростной двигатель и редуктор с большим передаточным числом, на выходном валу которого устанавливается рычаг, начальное положение которого определяется по шкале уставок времени реле. Рычаг управляет работой вспомогательных контактов, которыми, в свою очередь, включается выходное электромагнитное реле.

Начало отсчета времени соответствует подаче напряжения на двигатель, который, включившись, начинает вращаться и медленно поворачивать рычаг на валу редуктора. Через заданное время, определяемое начальным положением рычага, он доходит до вспомогательных контактов и замыкает их. Это приводит к включению выходного реле, которое одним из своих контактов отключает двигатель. На этом завершается отсчет выдержки времени.

Выпускаемые моторные реле времени этого типа обеспечивают выдержку времени до нескольких минут.

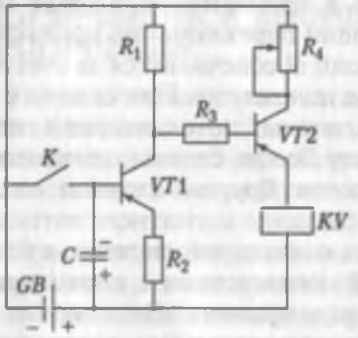


Рис. 2.16. Схема устройства электронного реле времени

Электронные реле времени обычно в своих схемах используют различные полупроводниковые элементы (чаще всего транзисторные) и конденсаторы, время разряда или заряда которых и определяет выдержку времени (рис. 2.16).

В исходном положении внешний управляющий контакт *K* замкнут и на базу транзистора *VT1* подан отрицательный потенциал

источника питания *GB*. Транзистор открыт, при этом потенциал базы транзистора *VT2* будет положительным по отношению к его эмиттеру и будет закрыт. В результате выходное реле *KV* будет отключено. В исходном положении конденсатор *C* будет заряжен с показанной на рисунке полярностью своих обкладок.

Команда на начало отсчета времени подается при размыкании внешнего управляющего контакта *K*. После этого начинается разряд конденсатора *C* через резистор R_2 и переход эмиттер — база транзистора *VT1*. В конце разряда транзистор *VT1* закроется, что приведет к появлению на базе транзистора *VT2* отрицательного потенциала. Он откроется, по обмотке реле *KV* начнет протекать ток, оно сработает и переключит свои контакты. Отсчет времени закончится.

Выдержка времени такого реле определяется временем разряда конденсатора *C*, которое зависит от величины его емкости и сопротивления резистора R_2. Регулируя эти величины, можно устанавливать требуемые выдержки времени реле. Выпускаемые электронные реле времени обеспечивают выдержку времени от 0,1 с до 10 мин.

Пневматические реле времени обеспечивают выдержку времени за счет работы воздушного (пневматического) замедлителя (демпфера), управляемого с помощью электромагнита. При подаче на электромагнит напряжения питания (начало отсчета времени) начинается процесс перекачки воздуха из одной камеры реле в другую через калиброванное дроссельное отверстие. Величина этого отверстия, а тем самым скорость перекачки и выдержка времени реле, регулируется с помощью иглы, положение которой устанавливается посредством регулировочной гайки «больше-меньше». В конце процесса перекачки воздуха через отверстие происходит переключение установленного в реле микропереключателя, что определяет конец отсчета выдержки времени.

Серийные пневматические реле времени обеспечивают диапазон выдержек времени от 0,4 до 180 с.

Механическое реле времени имеет замедлитель в виде анкерного механизма, управляемого электромагнитом. При подаче напряжения на электромагнит (начало отсчета времени) его якорь заводит пружину анкерного механизма аналогично часовому. Последний, начав работать, перемещает подвижный контакт реле. После заданного времени, определяемого положением (уставкой) неподвижного контакта реле, произойдет замыкание контактной системы, что определит конец отсчета времени. Такие реле обеспечивают выдержку времени до нескольких десятков секунд.

Некоторые механические реле времени управляются не электромагнитом, а подвижной частью контактора. В этом случае за-

пуск в работу анкерного механизма происходит сразу же после включения контактора. Такие реле времени получили название маятниковых.

PDF Compressor Free Version

Датчики скорости. Информация о скорости ЭП может быть получена от различных датчиков скорости, а также и от самого двигателя. Скорость двигателей постоянного и переменного тока определяет величину их ЭДС. Таким образом, если измерять величину ЭДС, то тем самым будет получена информация о величине скорости.

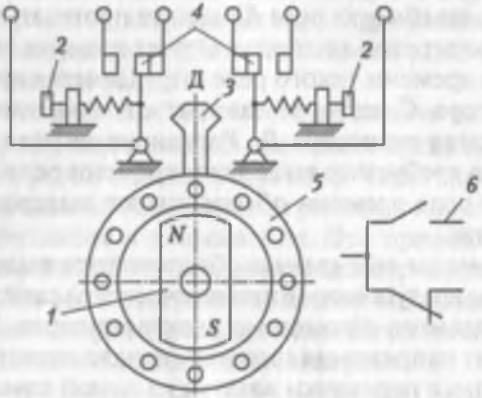


Рис. 2.17. Схема устройства реле контроля скорости

Электромеханическое реле контроля скорости (РКС) работает по принципу асинхронного двигателя. Ротор реле (рис. 2.17) представляет собой постоянный магнит *1*, соединенный с валом двигателя, скорость которого измеряется. Постоянный магнит помещен внутри алюминиевого цилиндра *5*, имеющего обмотку в виде беличьей клетки. Цилиндр может поворачиваться вокруг оси на небольшой угол и переключать при этом с помощью упора *3* контакты *4 (6)*. При неподвижном двигателе упор занимает среднее положение и контакты реле находятся в «нормальном» положении. При вращении двигателя и тем самым магнита *1* уже при небольших скоростях на цилиндр *5* начинает действовать вращающий момент, под влиянием которого он поворачивается и обеспечивает с помощью упора *3* переключение контактов *4*. При скорости двигателя, близкой нулю, цилиндр возвращается в среднее положение и контакты *4* переходят в свое «нормальное» состояние. Величина скорости, при которой переключаются контакты реле, определяется положением настроечных винтов *2*.

Реле контроля скорости удобно использовать при автоматизации процесса торможения, когда требуется обеспечивать отключение двигателя от сети после снижения его скорости до нуля.

Датчики скорости (тахогенераторы). Эти датчики предназначены для измерения скорости вращения вала двигателя или исполнительного органа рабочей машины. Они представляют собой специализированные электрические машины небольшой мощности, выходное напряжение $U_{вых}$ которых пропорционально скорости вращения ω их якоря (ротора): $U_{вых} = \gamma\omega$, где γ — коэффициент пропорциональности. Основное требование к тахогенераторам заключается в максимальном приближении указанной зависимости $U_{вых}(\omega)$ к линейной, что определяет точность их работы.

По своему устройству тахогенераторы бывают постоянного и переменного тока.

Тахогенераторы постоянного тока представляют собой небольшие генераторы постоянного тока с возбуждением от независимого источника (рис. 2.18, *а*) или постоянного магнита.

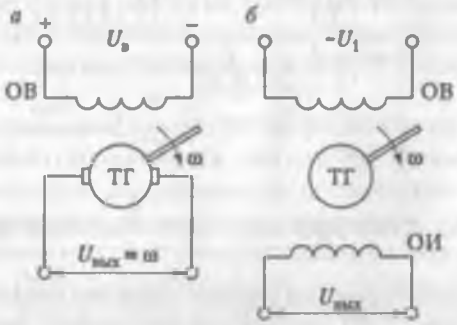


Рис. 2.18. Схемы тахогенераторов:
а — постоянного тока; *б* — асинхронного

Асинхронные тахогенераторы переменного тока имеют две обмотки (рис. 2.18, *б*), одна из которых — возбуждения *ОВ* — подключается к питающей сети и служит для создания магнитного потока тахогенератора, а другая — измерительная *ОИ*. Напряжение на выводах этой обмотки $U_{вых}$ пропорционально скорости вращения тахогенератора ω.

Синхронные тахогенераторы представляют собой однофазный синхронный генератор малой мощности. Он имеет ротор в виде многополюсного постоянного магнита. При его вращении созданное им магнитное поле пересекает витки обмотки статора, наводя в ней ЭДС, пропорциональную скорости вращения. Тем самым

выходное напряжение на выводах обмотки статора оказывается пропорциональным скорости ротора.

При использовании синхронных тахогенераторов в дискретных схемах управления в качестве измеряемой переменной используется частота импульсов напряжения, пропорциональная скорости вращения ротора тахогенератора.

PDF Compressor Free Version

Кроме рассмотренных выше аналоговых датчиков скорости в замкнутых схемах все шире применяются цифровые датчики, сигналы которых могут непосредственно поступать в цифровые схемы управления. Применение таких датчиков позволяет повысить точность регулирования скорости исполнительных органов рабочих машин и механизмов.

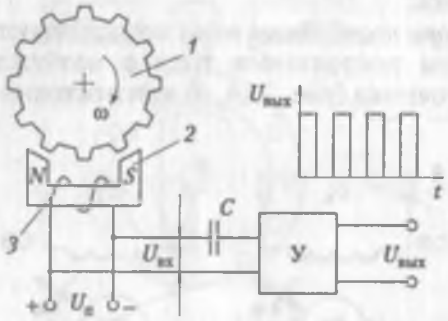


Рис. 2.19. Схема импульсного тахогенератора

Импульсный индукционный датчик скорости включает в себя зубчатый диск *1* (рис. 2.19), соединенный с валом двигателя или рабочей машины. Против зубцов этого диска располагается индуктор *2*, представляющий собой постоянный магнит с расположенной на нем измерительной обмоткой *3*, подключенной к источнику питания $U_п$. Напряжение, снимаемое с обмотки, подается через конденсатор С на вход усилителя *У*, выполняющего одновременно роль формирователя импульсов. При вращении диска изменяется зазор между его зубцами и полюсами индуктора *2*. Вследствие этого резко изменяется магнитное сопротивление воздушного зазора и величина магнитного потока, проходящего через зубцы диска *1* и индуктора *2*. Изменяющийся магнитный поток индуцирует в обмотке *3* ЭДС, частота которой $f = \frac{\omega N}{2\pi}$, где N — число зубцов диска, ω — скорость вращения диска (вала двигателя).

Созданное этой ЭДС напряжение переменного тока $U_{вх}$ через конденсатор C подается на вход усилителя, который усиливает этот сигнал и формирует из него последовательность выходных прямоугольных импульсов, частота которых пропорциональна измеряемой скорости. Далее эти импульсы при помощи цифрового блока «частота — код», преобразуются в двоичное число путем их подсчета за определенный интервал времени с запоминанием полученного числа на время последующего интервала. При необходимости этот переменный по частоте сигнал может быть преобразован и в напряжение постоянного тока (например, с помощью интегрирующего операционного усилителя) для использования в аналоговых схемах управления ЭП.

В качестве датчика скорости может использоваться якорь двигателя постоянного тока при включении его в схему тахометрического моста, образованного обмотками якоря, и дополнительных полюсов с двумя добавочными резисторами. При соответствующем выборе сопротивлений этих резисторов напряжение на диагонали моста будет пропорционально скорости двигателя.

В некоторых схемах, когда не требуется большая точность сигнала по скорости и предпочтительным является их простота, этот сигнал может сниматься непосредственно со щеток двигателя постоянного тока.

Ротор асинхронного двигателя также может служить источником информации о его скорости, так как ЭДС, наводимая в роторе АД, определяется его скольжением и, соответственно, скоростью.

Датчики положения. В *релейно-контакторных схемах управления* ЭП обычно используются путевые и конечные выключатели релейного действия. Они применяются для получения сигналов при достижении ЭП или исполнительным органом рабочей машины определенных положений, которые затем поступают в цепи управления, защиты и сигнализации. Конечные выключатели применяются для предотвращения выхода исполнительных органов из рабочей зоны (например, моста подъемного крана за пределы подкрановых путей). Путевые выключатели используются для подачи команд управления в схему в определенных точках пути исполнительных органов (например, при подходе кабины лифта к этажу или подходе фермы моста подъемного крана к крайнему положению).

Путевые и конечные выключатели могут быть бесконтактными и контактными. Последние в зависимости от вида привода их контактной системы делятся на вращающиеся, рычажные и нажимные.

Вращающиеся путевые и конечные выключатели имеют привод от валика, соединяемого с валом двигателя непосредственно или

через редуктор. На валике расположены кулачковые шайбы, воздействующие на контактную систему выключателя. При вращении вала двигателя в определенном его положении кулачковые шайбы переключают контакты выключателя.

PDF Compressor Free Version

Рычажные конечные и путевые выключатели имеют привод своей контактной системы от поворотного рычага, на который оказывает воздействие движущаяся часть ЭП или исполнительного органа. Возврат рычага и контактов в исходное положение осуществляется под действием пружины.

В *нажимных выключателях* переключение контактов происходит при нажатии на шток выключателя, возврат которого в исходное положение осуществляется под действием пружины. В качестве нажимных выключателей применение находят также микропереключатели, у которых при воздействии на шток переключается упругий контакт.

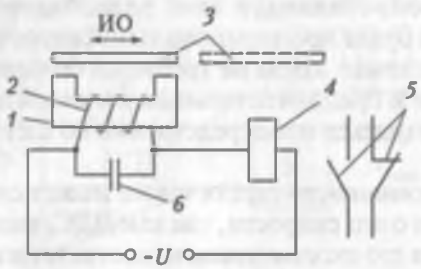


Рис. 2.20. Схема устройства бесконтактного датчика положения

Бесконтактный индукционный датчик положения (рис. 2.20) имеет разомкнутый магнитопровод *1* с катушкой *2*, параллельно которой включен конденсатор *6*. Катушка с конденсатором включены в цепь переменного тока вместе с обмоткой *4* реле. Когда якорь датчика *3*, закрепленный на подвижной части ЭП или исполнительного органа рабочей машины, не замыкает магнитопровод *1* (пунктирное его положение), индуктивное сопротивление катушки *2* мало, в ее цепи проходит большой ток и реле *4* находится во включенном положении.

Когда якорь *3* переместится и займет положение над магнитопроводом *1*, индуктивное сопротивление катушки *2* уменьшится и в цепи за счет подбора емкости конденсатора *6* наступает резонанс тока, характеризуемый резким снижением тока в цепи. Реле *4* из-за снижения тока отключается, что вызывает переключение его контактов *5* в цепи управления ЭП.

В *замкнутых схемах* ЭП применяются аналоговые и цифровые датчики положения.

Вращающиеся (поворотные) трансформаторы являются аналоговыми датчиками положения (угла поворота) вала двигателя или рабочей машины и представляют собой индукционную электрическую машину малой мощности. Их работу рассмотрим на примере наиболее распространенного синусно-косинусного вращающегося трансформатора (СКВТ) (рис. 2.21, *а*). Этот трансформатор имеет четыре обмотки, две из которых — возбуждения *ОВ* и компенсационная *ОК* — расположены на статоре, а две другие — измерительные *ОИ1* и *ОИ2*, называемые также вторичными, — на роторе. Последний соединяется с валом двигателя или рабочей машины, положение которых должно измеряться.

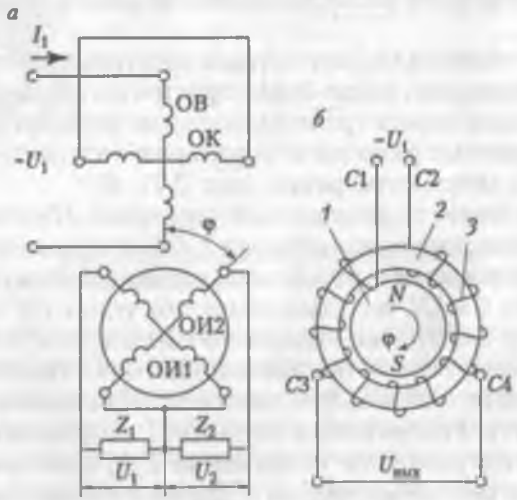


Рис. 2.21. Схемы устройства:
а — синусно-косинусного трансформатора; *б* — магнесина

К обмотке возбуждения *ОВ* подводится однофазное напряжение переменного тока U_1. Протекающий под его действием ток I_1 создает в воздушном зазоре СКВТ магнитный поток, который наводит ЭДС во вторичных (роторных) обмотках. Величина ЭДС в обмотке *ОИ1* (синусной) пропорциональна синусу, а в обмотке *ОИ2* (косинусной) — косинусу угла φ поворота ротора относительно статора. Напряжения $U_1 = U_{1max} \sin \varphi$ и $U_2 = U_{max} \cos \varphi$ на нагрузке Z_1 и Z_2 несут информацию об угле поворота φ вала двигателя или

рабочей машины для ее использования в замкнутых по положению схемах ЭП.

Компенсационная обмотка, которая обычно закорачивается, служит для компенсации вредного действия магнитного поля тока обмоток ротора и обеспечивает тем самым снижение погрешности вращающихся трансформаторов.

PDF Enhancer Free Version

Помимо синусно-косинусных в замкнутых схемах ЭП применяются линейные вращающиеся трансформаторы, у которых выходное напряжение обмотки ротора находится в прямой пропорциональной зависимости с углом φ. *Сельсин* широко применяется в замкнутых схемах ЭП в качестве аналогового датчика положения. Он представляет собой электрическую машину малой мощности, которая обеспечивает преобразование угла поворота вала в электрический сигнал. Применение сельсина в качестве задающего устройства и датчика положения и измерителя рассогласования следящего ЭП рассмотрено в гл. 4.

Магнесин является бесконтактным электромеханическим датчиком угла поворота, имеет более простое по сравнению с сельсином и вращающимся трансформатором устройство, меньшие массу и габаритные размеры и характеризуется высокой точностью (до 2,5° и менее) измерения (рис. 2.21, *б*).

Магнесин имеет торроидальный сердечник *2* без пазов, на котором намотана спиральная обмотка 3. Обмотка имеет выводы *С1*, *С2* для подключения ее к однофазной питающей сети переменного тока и выводы *С3*, *С4*, расположенные под углом 120° относительно друг друга, для снятия выходного напряжения. Ротор магнесина представляет собой постоянный магнит *1* цилиндрической формы, соединяемый с валом двигателя. При подаче на выводы *С1*, *С2* обмотки *3* напряжения питания U_1 на выводах *С3*, *С4* обмотки появится выходное напряжение $U_{вых}$, пропорциональное углу поворота ротора магнесина φ. Далее это напряжение поступает в схему управления ЭП.

Индуктосин используется для измерения линейных перемещений механических элементов ЭП или исполнительных органов рабочих машин. По своему устройству он напоминает линейный асинхронный двигатель и имеет плоский статор и подвижный ротор. Первичная обмотка, расположенная на статоре, подключается к однофазной сети переменного тока, при этом на вторичной обмотке при перемещении ротора будет наводиться ЭДС, зависящая от его положения. Точность индуктосинов может достигать нескольких микрон.

Цифровой фотоэлектрический датчик положения (рис. 2.22) состоит из первичного элемента, представляющего собой кодиру-

ющий диск (рис. 2.22, *а*), соединяемый с валом двигателя или рабочей машины. Он имеет несколько концентрических колец (дорожек), каждое из которых состоит из сегментообразных прозрачных и непрозрачных участков. Кольцо с наименьшим радиусом (т.е. расположенное ближе всего к оси диска) имеет два участка: прозрачный и непрозрачный — и относится к старшему разряду выходного числа. В каждом следующем от центра кольце число участков удваивается, что соответствует в двоичном представлении чисел переходу к следующему разряду. Диск, показанный на рис. 2.22, *а*, имеет три таких кольца, что позволяет сформировать с его помощью трехразрядное двоичное число.

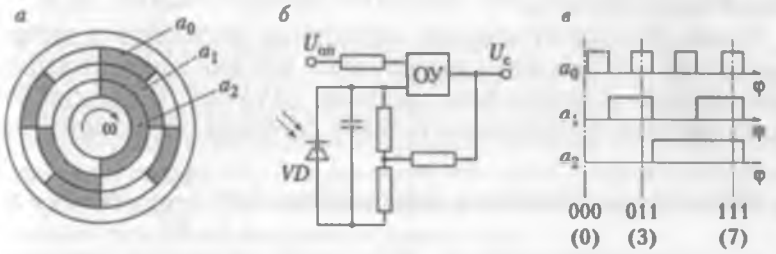


Рис. 2.22. Цифровой датчик положения:
а — диск; *б* — электрическая схема; *в* — система импульсов

Получение электрического сигнала производится фотоэлектрическим способом. Для этого по одну сторону диска устанавливаются по числу колец источники света — светодиоды, а по другую сторону приемники света — фотодиоды. Когда между ними находится прозрачный участок диска, светодиод освещает фотодиод, электрическое сопротивление последнего резко изменяется, что и является входным воздействием для схемы датчика положения.

Один канал датчика положения, соответствующий одному разряду, показан на рис. 2.22, *б*. Фотодиод *VD* включен на вход операционного усилителя *ОУ*, работающего в режиме релейного элемента. В исходном положении он «закрыт» отрицательным опорным напряжением $U_{оп}$, при освещении фотодиода *VD* усилитель «открывается», и на его выходе появляется электрический сигнал, соответствующий единице двоичного числа. Количество таких усилителей соответствует разрядности датчика положения.

Любому положению кодового диска в пределах 360° (одного оборота) соответствует однозначное сочетание нулей и единиц на выходах усилителей, т.е. определенное числовое выражение угла.

Это положение для рассматриваемого трехразрядного датчика иллюстрируется диаграммой рис. 2.22, *в*, из которой видно, что при повороте диска на угол 360° имеет место восемь комбинаций выходов усилителей от 000 до 111. Это соответствует изменению числа в десятичной системе от 0 до 7.

Из диаграммы рис. 2.22, *в* также видно, что выход датчика положения изменяется через каждые 45°, что определяет его дискретность (точность). В общем случае дискретность цифрового датчика положения определяется выражением $\Delta\varphi = \frac{360°}{2^n}$, где n — число его разрядов.

Для повышения точности цифровых датчиков положения применяются несколько кодовых дисков, соединяемых с валом двигателя через редуктор.

Кроме фотоэлектрических первичных элементов в датчиках положения используются индуктивные датчики с индуктосинами, позволяющие получать более высокие по точности характеристики. Разрешающая способность таких датчиков, характеризующая их точность, определяется выражением $\Delta\varphi = \frac{360°}{p2^n}$, где p — число пар полюсов индуктосина. Поскольку это число может составлять несколько сотен, то может быть обеспечена точность в несколько единиц или десятков единиц угловых секунд.

В последнее время в замкнутых схемах ЭП применяются комплексные датчики скорости и положения вала двигателя. К ним относятся датчики ПДФ-8 и ПДФ-9, включающие в себя датчик скорости (бесконтактный тахогенератор постоянного тока) и фотоимпульсный датчик положения ротора, выдающий от 125 до 2500 импульсов за один оборот вала. Такие датчики применяются, в частности, в комплектных ЭП типов ЭПБ-1 и ЭПБ-2 с вентильными двигателями.

Датчики тока. В качестве датчиков тока в релейно-контакторных разомкнутых схемах используются главным образом *реле тока*. Их катушки, изготовленные из толстого провода с малым числом витков, непосредственно включаются в цепь контролируемого (регулируемого) тока двигателя. При достижении этим током уровней срабатывания или отпускания происходит коммутация контактов реле тока, которые производят соответствующие переключения в схемах управления двигателем. В качестве датчиков тока этого типа применяют реле минимального и максимального токов.

Сигнал, пропорциональный току двигателя, может быть получен также с помощью шунта, представляющего собой калиброван-

ный резистор малого сопротивления, включаемый в цепь измеряемого тока. Падение напряжения на этом резисторе пропорционально протекающему по нему току.

Для измерений переменных токов в качестве датчиков тока применяются трансформаторы тока, что позволяет также осуществить потенциальное разделение силовых цепей и цепей управления электропривода.

Датчики напряжения. Для измерения напряжения переменного тока используются трансформаторы напряжения, что позволяет также осуществить потенциальное разделение силовых цепей и цепей управления электропривода.

2.8. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МУФТЫ И ТОРМОЗЫ

В состав схем автоматизированного электропривода ряда рабочих машин и механизмов входят электромагнитные муфты и тормозы.

Электромагнитная муфта представляет собой электромеханическое устройство, позволяющее с помощью электрического сигнала управления соединять или разъединять валы, а также регулировать скорость исполнительного органа рабочей машины при постоянной скорости вращения двигателя.

Электромагнитная муфта состоит из ведущей части, соединяемой с двигателем, ведомой части, соединяемой с входным валом редуктора или непосредственно с исполнительным органом рабочей машины, и устройства, обеспечивающего соединение этих двух частей при подаче на муфту управляющего сигнала.

В электроприводах применяются электромагнитные муфты с механической связью, порошковые и индукционные.

Электромагнитные муфты с механической связью чаще всего выполняются в виде фрикционных муфт, в которых вращение от ведущей к ведомой части муфты передается за счет сил трения между находящимися на них фрикционными деталями в виде дисков или конусов. Такие муфты применяются при необходимости жесткого сцепления ведомого и ведущего валов.

В *электромагнитных порошковых муфтах* соединение ведомой и ведущей частей осуществляется за счет ферромагнитного порошка, заполняющего зазор в электромагнитной системе между этими частями муфты.

В *электромагнитной индукционной муфте* вращающий момент от ведущей части передается к ведомой за счет действия электромагнитных сил. Рис. 2.23 иллюстрирует применение электромагнитной индукционной муфты для регулирования скорости электропривода. Муфта состоит из двух механически не связанных

друг с другом частей: ведущей *2* и ведомой *4*. Ведущая часть *2*, называемая якорем и выполняемая из ферромагнитного материала, соединяется с валом двигателя *1* (на рисунке показан асинхронный двигатель). Ведомая часть *4*, называемая индуктором, расположена внутри ведущей *2* и соединена через редуктор *6* (или непосредственно) с исполнительным органом *7* рабочей машины, скорость которого нужно регулировать. На индукторе *4* располагается обмотка возбуждения *3*, которая через контактные кольца *5* подключается к источнику питания. Величина тока возбуждения $I_в$ может регулироваться, например, с помощью резистора $R_в$, за счет чего и происходит изменение скорости ведомой части муфты и тем самым исполнительного органа *7*. Рассмотрим процесс регулирования скорости подробнее, считая, что якорь *2* приводится во вращение от двигателя *1* с постоянной скоростью ω′.

PDF Compressor Free Version

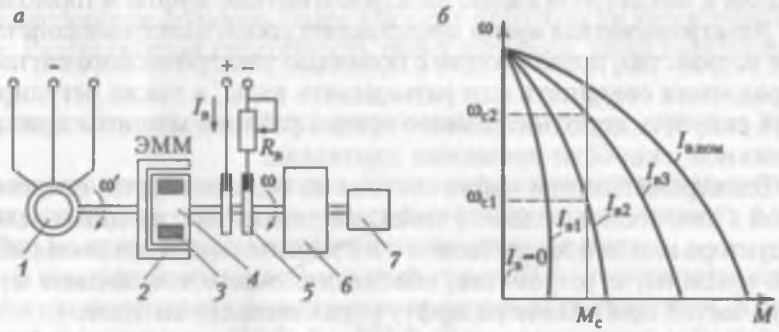


Рис. 2.23. Электромагнитная муфта:
а — схема включения; *б* — механические характеристики

Если обмотка индуктора *4* не обтекается током возбуждения, то между ним и якорем *2* отсутствует магнитная связь и индуктор *4* неподвижен ($ω = 0$).

При протекании по обмотке *3* тока возбуждения $I_в$ в воздушном зазоре между якорем и индуктором возникает магнитное поле, под действием которого во вращающемся якоре *2* будут циркулировать вихревые токи. Взаимодействие этих токов с магнитным полем создает вращающий момент, под действием которого индуктор придет во вращение в ту же сторону со скоростью ω.

Из механических характеристик муфты $ω(M)$, представляющих собой зависимости скорости индуктора (ведомой части) ω от развиваемого им момента M при разных токах возбуждения $I_в$ (рис. 2.24, *б*), следует, что, например, при постоянном моменте на-

грузки M_c регулирование тока возбуждения от $I_{в2}$ до $I_{в3}$ позволяет изменять скорость индуктора от ω_{c1} до ω_{c2}.

Рассмотренная муфта принадлежит к группе так называемых электромагнитных муфт со связью между ее частями через магнитное поле. Помимо таких муфт применяются также муфты с механической связью. В них передача вращающего момента от ведущей части к ведомой осуществляется механическим трением или зацеплением за счет создания между ними нормального давления магнитным полем электромагнита.

Тормозные устройства. Электроприводы ряда рабочих машин и механизмов снабжаются специальными устройствами, которые обеспечивают остановку (фиксацию) исполнительных органов в заданных положениях, ограничение пути торможения после отключения двигателя, а также удержание (фиксацию) исполнительных органов в определенном положении после отключения двигателя. К таким рабочим машинам относятся в первую очередь подъемно-транспортные механизмы — краны, лифты, подъемники, эскалаторы и т.д.

Применяемые тормозные устройства имеют весьма разнообразное исполнение. Они подразделяются по виду используемого привода на электромагнитные, гидравлические, пневматические; по конструкции фрикционных элементов — дисковые, конические и цилиндрические, которые, в свою очередь, бывают колодочными и ленточными; по начальному положению фрикционных элементов — на нормально разомкнутые и нормально замкнутые.

В большинстве ЭП находят применение тормозы с приводом от электромагнитов, называемые электромагнитными. Эти тормозы подразделяются по роду тока — постоянного и переменного; по длине хода якоря электромагнита — длинноходовые и коротконоходовые; по режиму работы — продолжительностью включения 15, 25, 40 и 60% от времени цикла работы ЭП. Коротконоходовой тормоз имеет ход якоря электромагнита, близкий или равный перемещению фрикционных элементов (колодок), а ход якоря электромагнита длинноходового тормоза в несколько раз превышает это перемещение. За счет этого в соответствии с правилами механики требуемое усилие электромагнита длинноходового тормоза может быть во столько же раз меньше.

Принцип действия нормально замкнутого колодочного тормоза с приводом от электромагнита состоит в следующем. В исходном «нормальном» положении, когда электромагнит не подключен к источнику питания, его колодки с помощью пружины прижимаются к тормозному шкиву, расположенному на валу двигателя, и затормаживают его. При включении двигателя напряжение одновременно подается и на обмотку электромагнита. Якорь элект-

ромагнита, притягиваясь к сердечнику, растормаживает колодки тормоза, и двигатель начинает вращаться. При отключении двигателя теряет питание и электромагнит и пружина вновь прижимает колодки к шкиву, обеспечивая торможение ЭП.

PDF Compressor Free Version

В ЭП некоторых производственных механизмов, в первую очередь крановых, в тормозах переменного тока применяются так называемые электрогидравлические толкатели (ЭГТ). По сравнению с тормозами с приводом от электромагнитов переменного тока они имеют более высокую износостойкость, обеспечивают плавную работу тормоза, характеризуются меньшим потреблением тока и большей надежностью в работе.

Электрогидравлический толкатель представляет собой комплексное устройство, включающее электродвигатель переменного тока небольшой (до 0,4 кВт) мощности, приводимый им центробежный насос и гидроцилиндр с поршнем, с которым соединен выходной шток ЭГТ. Внутренняя полость ЭГТ залита маслом.

Работает ЭГТ следующим образом. При подаче на двигатель напряжения он начинает вращать рабочее колесо насоса. Последний создает давление под поршнем, который начинает перемещаться со штоком вверх и растормаживать колодки тормоза. В верхнем положении открываются каналы в цилиндре, масло перетекает в нижнюю часть ЭГТ и движение прекращается. Время подъема и опускания штока ЭГТ обычно составляет 0,3–1,5 с.

Кроме тормозов, которые представляют собой отдельное устройство, в ЭП находят широкое применение встраиваемые в двигатель тормозы, составляющие с ним единый конструктивный модуль. Такие встраиваемые тормозы выполняются, как правило, дисковыми и имеют управление от электромагнитов постоянного и переменного тока.

2.9. ЗАЩИТА, БЛОКИРОВКИ И СИГНАЛИЗАЦИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

Для обеспечения надежной работы ЭП и технологического оборудования в его схемах предусматриваются необходимые виды защит. Этой же цели служат и 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 ЭП 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, резким снижением тока возбуждения двигателей постоянного тока. Для защиты ЭП и питающей сети от появляющихся в этих случаях недопустимо больших токов (сверхтоков) предусматривается максимальная токовая защита, которая может реализовываться 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 *Q* напряжения сети и контактами линейного контактора *KM* для асинхронного двигателя (рис. 2.24, *а*) и для двигателя постоянного тока (рис. 2.24, *б*). Цепи управления также могут защищаться плавкими предохранителями (рис. 2.24, *в*).

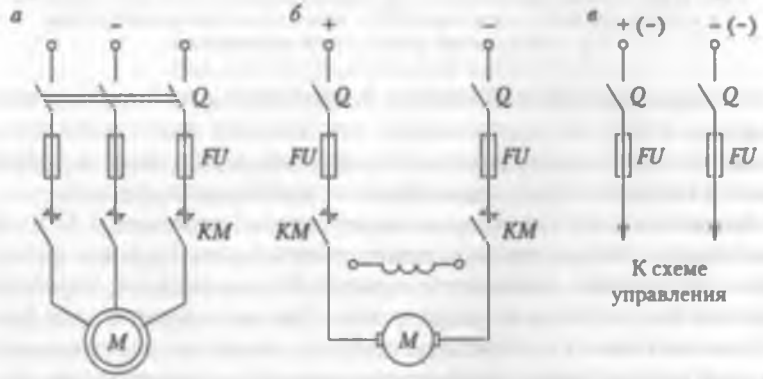


Рис. 2.24. Схемы включения предохранителей для защиты: *а* — асинхронного двигателя; *б* — двигателя постоянного тока; *в* — цепей управления

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

Реле максимального тока используются в основном в ЭП средней и большой мощности. Катушки этих реле *FA1* и *FA2* включаются в фазы трехфазных двигателей переменного тока и в один или два полюса двигателя постоянного тока между выключателем Q и контактами линейного контактора *KM* (рис. 2.25, *а, б*). Размы-

кающие контакты этих реле включены в цепь катушки *KM* линейного контактора (рис. 2.25, *в*). При возникновении сверхтоков в контролируемых цепях, превышающих уставки реле *FA1* и *FA2*, эти контакты размыкаются и силовые контакты линейного контактора *KM* отключают двигатель от питающей сети.

PDF Compressor Free Version

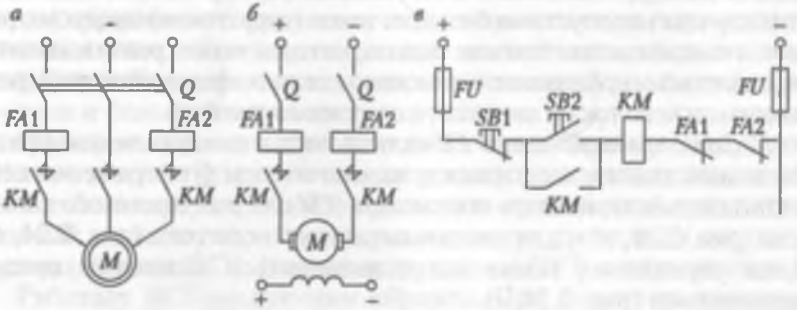


Рис. 2.25. Схемы включения реле максимального тока для защиты: *а* — асинхронного двигателя; *б* — двигателя постоянного тока; *в* — контактов реле в цепи управления

Уставки реле максимального тока должны выбираться таким образом, чтобы не происходило отключения двигателей при их пуске или других 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 отключение двигателей и защиту от сверхтоков, перегрузок и снижения питающего напряжения. Для выполнения этих функций автомат имеет контактную систему, замыкание и размыкание 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. 2.26, *а*. Рабочий ток нагрузки *I* протекает через контакт *1* автомата, нагреватель теплового реле *6* в катушку *9* реле максимальною тока. При корот-

ком 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.

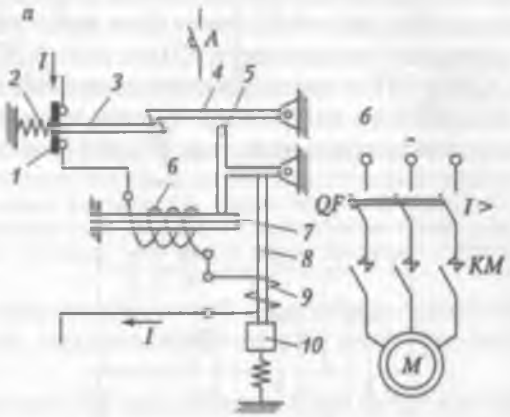


Рис. 2.26. Автоматический выключатель:
а — устройство; *б* — схема включения

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.

Часто в автоматах применяют тепловые расцепители без нагревателя, в этом случае контролируемый ток пропускается непосредственно через биметаллическую пластину. В маломощных автоматах такой расцепитель может выполнять функции и элемента максимальной токовой защиты.

Пример схемы включения автомата *QF* для подключения и защиты трехфазного асинхронного двигателя приведен на рис. 2.26, *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.

кающие контакты этих реле включены в цепь катушки *KM* линейного контактора (рис. 2.25, *в*). При возникновении сверхтоков в контролируемых цепях, превышающих уставки реле *FA1* и *FA2*, эти контакты размыкаются и силовые контакты линейного контактора *KM* отключают двигатель от питающей сети.

PDF Compressor Free Version

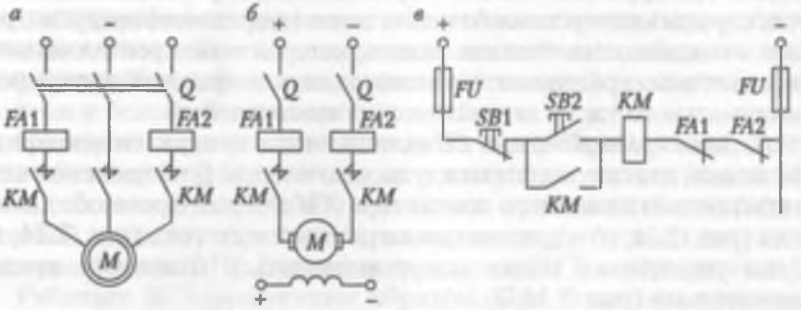


Рис. 2.25. Схемы включения реле максимального тока для защиты: *а* — асинхронного двигателя; *б* — двигателя постоянного тока; *в* — контактов реле в цепи управления

Уставки реле максимального тока должны выбираться таким образом, чтобы не происходило отключения двигателей при их пуске или других 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 отключение двигателей и защиту от сверхтоков, перегрузок и снижения питающего напряжения. Для выполнения этих функций автомат имеет контактную систему, замыкание и размыкание 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. 2.26, *а*. Рабочий ток нагрузки *1* протекает через контакт *1* автомата, нагреватель теплового реле *6* в катушку *9* реле максимальною тока. При корот-

ком 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.

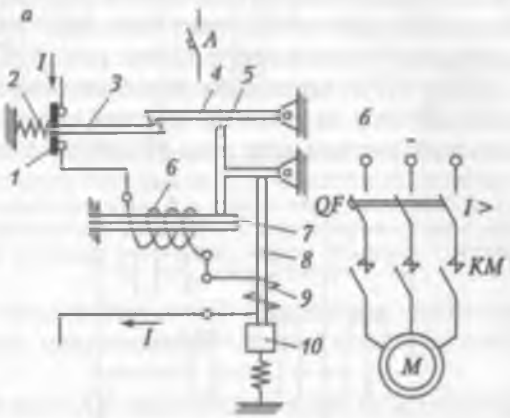


Рис. 2.26. Автоматический выключатель:
а — устройство; *б* — схема включения

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.

Часто в автоматах применяют тепловые расцепители без нагревателя, в этом случае контролируемый ток пропускается непосредственно через биметаллическую пластину. В маломощных автоматах такой расцепитель может выполнять функции и элемента максимальной токовой защиты.

Пример схемы включения автомата *QF* для подключения и защиты трехфазного асинхронного двигателя приведен на рис. 2.26, *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. Например, если в схемах рис. 2.25 исчезло или сильно понизилось напряжение сети, катушка линейного контактора *KM* потеряет питание, и он отключит двигатель от сети. При восстановлении напряжения двигатель может быть включен только после нажатия на кнопку управления *SB2* (см. рис. 2.25).

PDF Compressor Free Version

При управлении ЭП от командоконтроллера или ключа с фиксированным положением их рукояток нулевая защита осуществляется с помощью дополнительного реле *FV* напряжения (рис. 2.27).

Рис. 2.27. Схема нулевой защиты

В этой схеме реле *FV* включается в нулевом положении командоконтроллера (ключа) через контакт *SM*0, после чего оно становится на самопитание через свой собственный контакт. При переводе рукоятки командоконтроллера (ключа) в положение пуска *1*, питание всей схемы управления осуществляется через этот контакт, поэтому при исчезновении напряжения реле *FV* отключится, прекратится ее питание и линейный контактор *KM* отключит двигатель от сети. При восстановлении напряжения питания повторное включение двигателя может быть произведено лишь после установки рукоятки вновь в нулевое (среднее) положение, чем исключается возможность его самозапуска.

Отметим, что в схеме рис. 2.27 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. Эта 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 или синхронных двигателей.

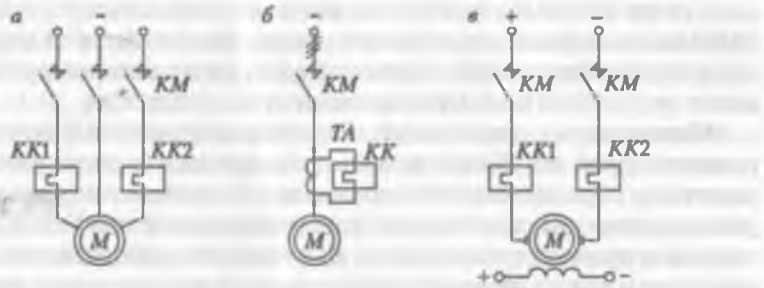


Рис. 2.28. Тепловая защита:
а — схема включения тепловых реле в цепь статора асинхронного двигателя без трансформатора тока; *б* — схема включения тепловых реле в цепь статора асинхронного двигателя с трансформатором тока; *в* — схема включения тепловых реле в цепь якоря двигателя постоянного тока

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

Тепловые реле *KK* включаются в две фазы трехфазных двигателей переменного тока непосредственно (рис. 2.28, *а*) или через трансформаторы тока *TA* (рис. 2.28, *б*), если ток двигателя превышает номинальный ток реле. Для защиты двигателей постоянного тока реле включаются в один или два полюса цепи их питания (рис. 2.28, *в*). Размыкающие контакты тепловых реле включаются или в цепи катушек главных (линейных) контакторов, или в цепь защитного реле, как это показано на рис. 2.27.

Действие теплового реле основано на эффекте изгибания биметаллической пластинки при ее нагревании за счет различных температурных коэффициентов линейного расширения образующих ее металлов (см. рис. 2.26, *а*).

Номинальный ток теплового элемента реле $I_{т.э}$ выбирают равным или несколько большим номинального тока двигателя $I_{ном}$:

$$I_{т.э} = (1...1{,}15)\ I_{ном}.$$

Тепловая защита двигателей может осуществляться автоматическими выключателями и магнитными пускателями, если они имеют встроенные тепловые расцепители, как, например, в схеме автомата рис. 2.26, *а*.

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. 2.25). Токи уставок реле при этом выби-

раются на 20–30 % выше номинального тока двигателя. Так как уставки реле ниже пускового тока, то при пуске его контакты шунтируются контактами реле времени, имеющего выдержку времени, несколько большую времени пуска двигателя.

PDF Compressor Free Version

Минимально-токовая защита. Этот вид защиты применяется в ЭП с двигателями постоянного тока и синхронными двигателями для защиты от обрыва их цепей возбуждения. Исчезновение тока возбуждения опасно тем, что оно вызывает исчезновение противоЭДС двигателей и приводит тем самым к значительному возрастанию тока в их силовых цепях и резкому снижению развиваемого ими момента.

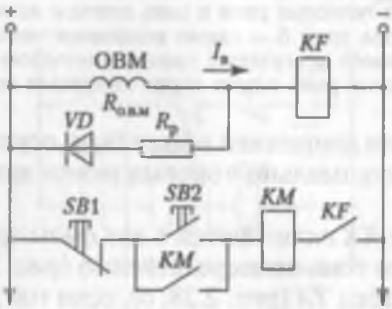


Рис. 2.29. Схема минимально-токовой защиты

Эта защита осуществляется с помощью минимально-токового реле *KF*, катушка которого включается в цепь обмотки возбуждения двигателя, как это показано на рис. 2.29. Замыкающий контакт реле *KF* включается в цепь катушки контактора *KM*, что позволяет включать двигатель только при наличии тока возбуждения в *ОВМ*. При работе ЭП в случае исчезновения или резкого снижения тока возбуждения контакт реле *KF* разомкнется и контактор *KM*, потеряв питание, отключит двигатель от сети.

Специальные виды защит. К ним относятся защиты от перенапряжения на обмотке возбуждения двигателя постоянного тока, от повышения напряжения в системе «преобразователь – двигатель», от превышения скорости ЭП, от затянувшегося пуска синхронных двигателей и ряд других.

Защита от перенапряжения на обмотке возбуждения двигателя постоянного тока требуется при ее отключении от источника питания. В этом режиме вследствие быстрого спадания тока возбуждения и тем самым магнитного потока в обмотке возникает значительная (до нескольких киловольт) ЭДС самоиндукции, которая может вызвать пробой ее изоляции.

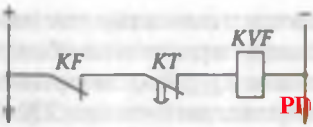
Защита осуществляется с помощью так называемого разрядного резистора $R_р$, включаемого параллельно обмотке возбуждения *ОВМ* (рис. 2.29) сопротивлением $R_{о.в.м}$. Его сопротивление выбирается равным (4...5)$R_{о.в.м}$ при напряжении питания 220 В и (6...8)$R_{о.в.м}$ при напряжении 110 В. Для устранения потерь энергии в разрядном резисторе последовательно с ним включается диод *VD*. Он не пропускает через резистор ток при включенной обмотке возбуждения, но позволяет протекать току под действием ЭДС самоиндукции, возникающей при отключении обмотки. Выбор $R_р$ в указанных пределах позволяет снизить темп спадания тока в обмотке возбуждения и тем самым ограничить величину ЭДС самоиндукции до допустимых пределов.

Защита от превышения напряжения применяется главным образом в системе «преобразователь – двигатель». Она реализуется с помощью реле напряжения, включаемого на выход преобразователя и своими контактами воздействующего на цепи отключения напряжения ЭП. Эта защита косвенно защищает двигатель постоянного тока и от чрезмерного увеличения скорости при появлении повышенного напряжения.

Защита от превышения скорости применяется в ЭП рабочих машин, не допускающих превышения скорости движения своих исполнительных органов (лифты, подъемные лебедки, эскалаторы, шахтные подъемники). Для предотвращения недопустимых скоростей движения в ЭП используется защита, которая может быть выполнена с помощью тахогенераторов или центробежных выключателей, соединенных с валом двигателя. Центробежные выключатели непосредственно воздействуют на цепь управления, а в случае применения тахогенератора это воздействие осуществляется с помощью реле напряжения, включаемого на его якорь.

Защита от затянувшегося пуска синхронных двигателей обеспечивает его прекращение, если к концу расчетного времени пуска ток возбуждения синхронных двигателей не достиг заданного уровня. Осуществляется эта защита с помощью реле минимального тока *KF*, включаемого аналогично реле обрыва поля в цепь обмотки возбуждения синхронных двигателей (см. рис. 2.29), и реле времени *KT* (рис. 2.30). Если за время выдержки реле *KT*, равное времени нормального пуска СД, ток возбуж-дения окажется недостаточным, то после замыкания контактов реле *KT* сработает реле защиты *KVF* и даст команду на прекращение пуска.

Путевая защита обеспечивает отключение ЭП при достижении исполнительным органом рабочей машины крайних положений. Она осуществляется с помощью конечных выключателей, устанавливаемых в этих положениях исполнительного органа и размыкающих цепи реле защиты или непосредственно линейных контакторов.



PDF Compressor Free Version

Рис. 2.30. Схема защиты от затянувшегося пуска синхронного двигателя

Защита от выпадения синхронных двигателей из синхронизма применяется для ЭП с синхронными двигателями, работающих с резко изменяющейся нагрузкой на валу и питающихся от сети, в которой возможно снижение напряжения. Защита осуществляется с помощью реле напряжения *KV* (рис. 2.31), включенного на напряжение сети, и реле (контактора) форсировки возбуждения *KF*, замыкающий контакт которого включен параллельно добавочному резистору $R_д$ в цепи обмотки возбуждения *ОВВ* возбудителя *В*.

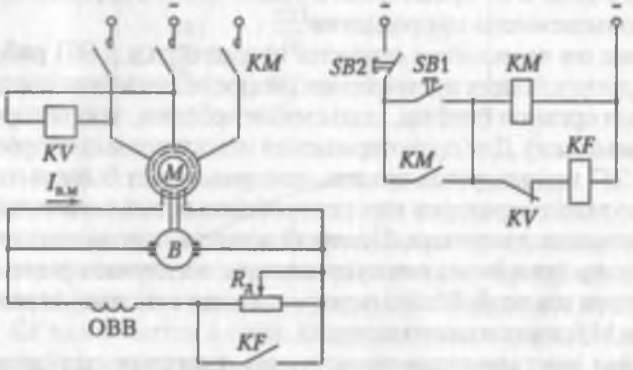


Рис. 2.31. Схема защиты от выпадения синхронного двигателя из синхронизма

При нормальном уровне напряжения сети реле *KV* включено, а реле *KF* не включено, поэтому резистор $R_д$ введен в цепь *ОВВ*, и по ней протекает номинальный (или близкий к нему) ток. При снижении напряжения сети на 15–20% реле *KV* отключается и замыкает свой контакт в цепи катушки реле *KF*. Последнее включается и своим контактом шунтирует резистор $R_д$. Ток возбуждения возбудителя, его напряжение и ток возбуждения синхронных двигателей $I_{в.м}$ возрастают, а тем самым увеличивается его ЭДС. Это приводит к увеличению максимального момента и перегрузочной способности синхронных двигателей и тем самым обеспечивает его синхронную работу с сетью при увеличении нагрузки на валу.

Электрические блокировки в схемах ЭП. Они служат для обеспечения заданной последовательности операций при его управлении, предотвращения нештатных и аварийных ситуаций и неправильных действий со стороны оператора, что в итоге повышает надежность работы ЭП и технологического оборудования. Так, например, при работе двух контакторов *KM1* и *KM2* (рис. 2.32, *а*) перекрестное включение их размыкающих контактов в цепи катушек не допускает включения одного контактора при включенном другом. Такой вид блокировки применяется в реверсивных ЭП, где недопустимо одновременное включение двух контакторов, или в ЭП с электрическим торможением двигателя, где торможение может начаться только после отключения двигателя от сети.

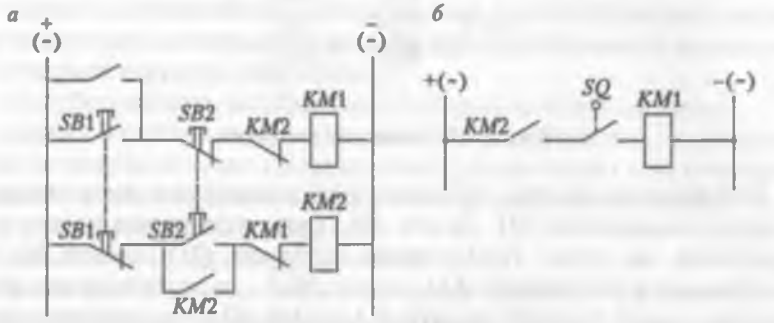


Рис. 2.32. Блокировки в схемах электропривода:
а — для предотвращения одновременного включения двух контакторов;
б — при срабатывании конечного выключателя

Одновременное включение двух контакторов может быть предотвращено и с помощью использования двухцепных кнопок управления, имеющих замыкающий и размыкающий контакты (рис. 2.32, *а*).

Как видно из схемы, нажатие любой из кнопок приводит к замыканию цепи катушки одного из контакторов и одновременному размыканию цепи другого контактора.

Схема рис. 2.33, *б* иллюстрирует пример некоторой технологической блокировки двух ЭП, работающих совместно в комплексе. Она допускает включение контактора *KM1* одного ЭП только после включения контактора *KM2* другого ЭП и при нажатом путевом выключателе *SQ*.

В ЭП применяются и другие виды блокировки, которые будут рассмотрены далее в конкретных схемах управления.

Сигнализация в схемах управления ЭП. Для контроля за ходом технологического процесса или последовательности выполняемых опе-

раций, состояния защиты и наличия напряжения питания или какого-либо электрического сигнала применяется сигнализация, которая может быть световой (сигнальные лампы, табло), звуковой (звонок, сирена) и визуальной (указательные реле, измерительные приборы).

RDF Compressor Free Version

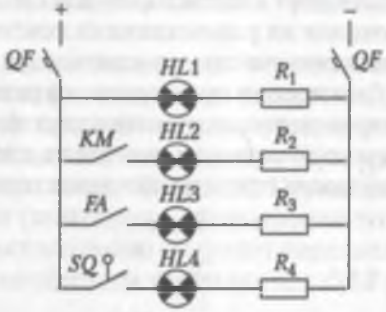


Рис. 2.33. Схема сигнализации

Для примера на рис. 2.33 показаны возможные сигнализации в схеме управления ЭП. Лампа *HL1* сигнализирует о подаче напряжения на схему (включение автомата *QF*), лампа *HL2* — о включении контактора *KM*, лампа *HL3* — о срабатывании реле максимальной токовой защиты *FA*, лампа *HL4* — о срабатывании конечного выключателя *SQ*.

2.10. ВЫБОР СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, АППАРАТОВ УПРАВЛЕНИЯ, КОММУТАЦИИ И ЗАЩИТ

Выбор *силовых полупроводниковых преобразователей* осуществляется по следующим показателям и параметрам:

- уровню и частоте напряжения питающей сети;
- величине тока нагрузки;
- числу фаз нагрузки;
- характеру нагрузки (активная, активно-индуктивная, емкостная);
- диапазону регулирования выходного напряжения и/или частоты;
- наличию необходимых защит и сигнализации;
- наличию средств диагностики;
- режиму работы электропривода (*S1*, *S2*, *S3*);
- климатическому исполнению и категории размещения;
- степени защиты IP;
- требованиям техники безопасности;

• высоте над уровнем моря;
• условиям эксплуатации.

В качестве дополнительных факторов при выборе преобразователей могут учитываться КПД, массогабаритные и стоимостные показатели, а также показатели надежности (наработка на отказ, средний срок службы, среднее время восстановления и т.д.), уровень создаваемых помех. При учете этих факторов целесообразно использовать интегральные показатели качества и весовые коэффициенты (коэффициенты значимости) отдельных показателей преобразователей.

Полупроводниковые пусковые устройства для двигателя выбираются по тем же показателям, что и преобразователи. Дополнительно к ним необходимо учитывать:

• реверсивный или нереверсивный характер работы двигателя;
• способ ограничения пускового тока (целесообразный характер изменения напряжения при пуске, определяемый видом механической нагрузки двигателя);
• необходимость электрического торможения двигателя;
• способ подачи сигнала управления на пускатель — электромеханический контакт (кнопка, ключ управления) или потенциальный сигнал управления (напряженческий или токовый);
• износостойкость пускателя;
• допустимая частота включений.

Выбор электрических аппаратов представляет собой задачу, при решении которой должны учитываться:

• коммутируемые аппаратом токи, напряжения и мощности;
• параметры и характер нагрузки — активная, индуктивная, емкостная, низкого или высокого сопротивления и др.;
• число коммутируемых цепей;
• напряжения и токи цепей управления;
• напряжение катушки аппарата;
• режим работы аппарата — кратковременный, длительный, повторно-кратковременный;
• условия работы аппарата — температура, влажность, давление, наличие вибрации и др.;
• способы крепления аппарата;
• экономические и массогабаритные показатели;
• удобство сопряжения и электромагнитная совместимость с другими устройствами и аппаратами;
• стойкость к электрическим, механическим и термическим перегрузкам;
• климатическое исполнение и категория размещения;
• степени защиты *IP*;
• требования техники безопасности;

• высота над уровнем моря;
• условия эксплуатации.

Способность электрического аппарата к перегрузкам определяется его предельной коммутационной способностью, электродинамической и термической стойкостью.

PDF Compressor Free Version

Предельной коммутационной способностью электрического аппарата называют максимальный ток короткого замыкания, который он способен отключить несколько раз, оставаясь исправным.

Электродинамическая стойкость характеризуется амплитудой ударного тока короткого замыкания, который способен пропустить аппарат без своего повреждения.

Термическая стойкость характеризуется допустимым количеством тепла, которое может быть выделено в аппарате за время действия тока короткого замыкания.

Для определения соответствия этих параметров электрических аппаратов условиям работы электроустановки должны быть предварительно определены токи короткого замыкания.

Автоматические выключатели. Эти аппараты рекомендуется применять в ответственных установках при необходимости быстрого восстановления напряжения питания, дистанционного управления и комплексной защиты, а также в асинхронных электроприводах для предотвращения однофазного режима работы двигателей. Их использование целесообразно также в электроприводах с малой частотой включения, где они обеспечивают включение и защиту двигателя и могут применяться вместо магнитных пускателей.

Автоматические выключатели выбираются по номинальным току и напряжению, роду тока, предельной коммутационной способности, электродинамической и термической стойкости, собственному времени включения. Все параметры автоматов должны соответствовать их работе как в обычном, так и аварийном режимах, а конструктивное исполнение — условиям размещения.

Номинальный ток автомата должен быть не ниже тока продолжительного режима установки, а сам аппарат не должен отключаться при предусмотренных технологических перегрузках.

Проверка выбираемого автомата по условию защиты электроустановки от токов короткого замыкания состоит в сопоставлении тока короткого замыкания в установке с предельной коммутационной способностью автомата, которая должна быть выше этого тока.

Защита установки от перегрузок по току будет обеспечена, если номинальный ток автомата с тепловым расцепителем будет равен или несколько больше номинального тока защищаемого объекта.

Уставка тепловой и максимальной защит электродвигателей должна соответствовать уровням токов двигателя. Максимальная

токовая защита не должна срабатывать при пуске двигателя, для чего ее уставка $I_{у.м}$ выбирается по соотношению

$$I_{у.м} \geq k\, I_{пуск},$$

где $k = 1{,}5–2{,}2$ — коэффициент, учитывающий вид расцепителя и возможный разброс тока срабатывания относительно уставки; $I_{пуск}$ — пусковой ток двигателя.

Защита от перегрузки (тепловая защита) считается эффективной при следующем соотношении ее тока уставки $I_{у.т}$ и номинального тока двигателя:

$$I_{у.т} = (1{,}2...1{,}4)\ I_{ном}.$$

Контакторы, реле, магнитные пускатели. К числу показателей, по которым они выбираются, относятся характер и величина напряжений главной цепи и цепи управления (включающих катушек); коммутационная способность контактов и их количество, допустимая частота включений; режим работы; категория размещения; степень защиты от воздействия окружающей среды.

Дополнительно к этому реле, функции управления и защиты выбираются по роду входной воздействующей величины (ток, напряжение, мощность), выдержке времени (реле времени), коэффициенту возврата, времени срабатывания и отпускания.

Уставка тока реле максимального тока при защите асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором выбирается из соотношения

$$I_{у.т} = (1{,}2...1{,}3)\ I_{пуск},$$

а для асинхронных двигателей с фазным ротором и двигателей постоянного тока — по формуле

$$I_{у.т} = (2...2{,}5)\ I_{ном}.$$

Выключатели и переключатели. Эти аппараты выбираются по роду и величине напряжения, току нагрузки, количеству переключений, которое они допускают по условиям механической и электрической износостойкости, а также конструктивному исполнению.

Кнопки и ключи управления. Они выбираются по роду и уровню напряжения, величине коммутируемого тока, количеству коммутируемых цепей, степени защиты и климатическому исполнению, электрической и механической износостойкости.

Рассмотрим типовые задачи.

Задача 2.1. Двигатель постоянного тока типа 4ПФ160S включен по схеме рис. 2.24, *б* и имеет следующие номинальные данные: мощность $P_{ном}$ = 11 кВт, напряжение $U_{ном}$ = 220 В, КПД $\eta_{ном}$ = 70,5%. Рассчитать номинальный ток плавкой вставки *FU*.

PDF Compressor Free Version

Задача 2.2. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа АИР100L4 включен по схеме рис. 2.24, *а* и имеет следующие номинальные данные: мощность $P_{ном}$ = 4 кВт, напряжение $U_{ном}$ = 220 В, КПД $\eta_{ном}$ = 85%, коэффициент мощности $\cos\varphi_{ном}$ = 0,84, кратность пускового тока по отношению к номинальному току статора равна 6. Рассчитать номинальный ток плавкой вставки *FU* для двух случаев:

- при небольшой частоте включения двигателя и легких условиях пуска продолжительностью до 5–10 с.;
- при повторно-кратковременном режиме и тяжелых условиях пуска с продолжительностью более 10 с.

Задача 2.3. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа 4АИ200L4У3 включен по схеме рис. 2.25, *а* и имеет следующие номинальные данные: мощность $P_{ном}$ = 55 кВт, напряжение $U_{ном}$ = 220 В, КПД $\eta_{ном}$ = 92%, коэффициент мощности $\cos\varphi_{ном}$ = 0,89, кратность пускового тока по отношению к номинальному току статора равна 6,5. Рассчитать уставку реле максимального тока *FA* и выбрать его по каталогу.

Задача 2.4. Асинхронный двигатель с фазным ротором типа 4АК250S6У3 имеет следующие номинальные данные: мощность $P_{ном}$ = 37 кВт, напряжение $U_{ном}$ = 220 В, КПД $\eta_{ном}$ = 89%, коэффициент мощности $\cos\varphi_{ном}$ = 0,8. Рассчитать уставку реле максимального тока, обеспечивающего защиту двигателя от короткого замыкания и недопустимых бросков тока.

Задача 2.5. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа 4АН200L4У3 (задача 2.3) включен по схеме рис. 2.25, *а*. Рассчитать параметры и по ним выбрать контактор *KM* для следующих условий работы электропривода: категория применения АС-4, коммутационная износостойкость — не менее 0,3 млн циклов, механическая износостойкость — не менее 10 млн циклов, режим работы аппарата — длительный, климатическое исполнение и категория размещения — У3. Контактор должен иметь три силовых контакта и по два размыкающихся и замыкающихся вспомогательных контактов.

Задача 2.6. Для схемы рис. 2.29 рассчитать величину разрядного резистора $R_р$, если напряжение сети 220 В.

Задача 2.7. Составить схему элемента «Память» с использованием двух логических элементов «ИЛИ-НЕ». Элемент «Память» должен обеспечивать запоминание, хранение и «стирание» информации, поступающей на него в виде единичных импульсов напряжения.

Задача 2.8. Рассчитать параметры элементов цепей входа и обратных связей операционного усилителя (рис.2.10) для реализации на его основе ПИ-регулятора (табл. 2.1) с постоянной времени 1 с и коэффициентом усиления 7.

Пример 2.1. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа 4А132S4У3 включен по схеме рис. 2.26, *б* и имеет следующие номинальные данные: мощность $P_{ном}$ = 7,5 кВт, напряжение обмотки статора $U_{ном}$ =220 В, КПД $\eta_{ном}$ = 87,5%, коэффициент мощности $\cos\varphi_{ном}$ = 0,86, кратность пускового тока по отношению к номинальному току статора равна 7,5. Выбрать автоматический выключатель *QF*, обеспечивающий включение двигателя и его максимальную и тепловую защиты.

Определяем номинальный, пусковой и ударный ток статора двигателя:

$$I_{1ном} = \frac{P_{ном}}{3U_{н}\eta\cos\varphi_{ном}} = 7500 / (3{\cdot}220{\cdot}0{,}875{\cdot}0{,}86) = 15 \text{ А};$$

$$I_{1пуск} = 7{,}5I_{1ном} = 7{,}5{\cdot}15 = 113{,}25 \text{ А};$$

$$I_{1уд} = 1{,}8{\cdot}1{,}43I_{1пуск} = 1{,}8{\cdot}1{,}43{\cdot}113{,}25 = 288{,}3 \text{ А}.$$

Ток срабатывания токовой отсечки (электромагнитного расцепителя)

$$I_{т.о} = 1{,}1I_{1уд} = 1{,}1{\cdot}288{,}3 = 317 \text{ А}.$$

Ток срабатывания тепловой защиты

$$I_{т.з} = 1{,}2I_{1ном} = 1{,}215 = 18 \text{ А}.$$

Выбираем автомат типа А3120 с номинальным током автомата, электромагнитного и теплового расцепителя 15 А, уставкой максимальной токовой защиты 430 А и тепловой защиты 19 А.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие полупроводниковые приборы называются диодом, тиристором и транзистором и какие существуют их разновидности?
2. Что такое силовые полупроводниковые модули?
3. Что называется выпрямителем и какие схемы выпрямителей нашли применение на практике?
4. Что называется регулятором напряжения переменного тока?
5. Что называется преобразователем частоты и какие типы полупроводниковых преобразователей частоты вы знаете?

6. Что такое инвертор?
7. Объясните принцип действия импульсного регулятора напряжения постоянного тока.
PDF Compressor Free Version
8. По каким признакам классифицируются электрические аппараты?
9. Какие аппараты относятся к аппаратам управления?
10. Назовите виды силовых коммутационных аппаратов ручного управления.
11. Что такое автоматический выключатель?
12. Какие виды защит может обеспечивать автоматический выключатель и за счет чего?
13. Что такое электромагнитный контактор?
14. Каковы основное назначение и особенности исполнения магнитных пускателей?
15. Назовите назначение, принцип действия и основные виды электромагнитных реле.
16. Что называется аналоговыми элементами и устройствами управления?
17. Что такое операционный усилитель и каково его назначение?
18. Какие виды дискретных элементов и устройств вы знаете и каково их назначение?
19. Что называется логическим элементом и какие основные логические элементы применяются в схемах управления электропривода?
20. Что называется микропроцессором?
21. Какие функциональные блоки включает в себя микропроцессорная система?
22. Что представляет собой программируемый логический контроллер?
23. Какие датчики координат (переменных) электропривода применяются в его схемах управления?
24. Для чего используются электромагнитные муфты?
25. Для чего служат электромагнитные тормозы?
26. Какие показатели должны учитываться при выборе электрических аппаратов?
27. По каким основным электрическим параметрам проверяются и выбираются электрические аппараты?
28. Что такое предельная коммутационная способность, электродинамическая и термическая стойкости электрического аппарата?
29. Как рассчитываются уставки максимально-токовой и тепловой защит электродвигателей?
30. Как выбираются плавкие предохранители для защиты цепей электропривода?

Глава 3
РАЗОМКНУТЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

3.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗОМКНУТЫХ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ

К разомкнутым относятся схемы управления электропривода, в которых не используются обратные связи по его координатам или технологическим параметрам. Тем самым управление в таких схемах осуществляется без контроля за фактическим изменением регулируемых координат, т.е. без учета результатов управления. Эти схемы, отличаясь простотой реализации, используются в тех случаях, когда не требуется высокое качество управления движением электроприводов, в частности для пуска, реверса и торможения двигателей и при невысоких требованиях к точности и диапазону регулирования переменных (координат) двигателей.

В таких схемах управления в основном используются релейно-контакторная аппаратура и полупроводниковые коммутационные аппараты (бесконтактные пускатели).

Автоматизация работы этих схем осуществляется за счет использования информации о времени, токе, скорости или ЭДС двигателей и положении их вала, которая получается от соответствующих датчиков или самого двигателя. Тот или иной вид используемой при автоматизации работы схемы информации определяет *принципы управления*, к которым относятся принципы времени, тока, скорости, ЭДС и положения (пути). Часто в разомкнутых схемах используется сочетание принципов управления: например, пуск двигателя осуществляется по принципу времени, а его торможение — по принципу ЭДС или скорости.

Разомкнутые схемы применяются и для регулирования скорости при невысоких требованиях к качеству регулирования. Силовая часть таких электроприводов строится по структуре «управляемый преобразователь — двигатель», а задача регулирования (ограничения) тока и момента двигателей в переходных процессах решается за счет включения в схему управления дополнительного устройства, называемого задатчиком интенсивности. Это устройство, обеспечивая плавное изменение в переходных процессах управляющего воздействия на двигатель (напряжения, его ча-

стоты или того и другого) по линейному или экспоненциальному законам, обеспечивает формирование требуемых графиков координат (переменных) электропривода.

PDF Compressor Free Version

Разомкнутые схемы, кроме функций управления, обеспечивают защиту электроприводов, питающей сети и технологического оборудования при возникновении различных аномальных режимов — коротких замыканиях, перегрузке двигателей, исчезновении питающего напряжения или обрыве фазы питающей сети, а также соответствующую сигнализацию. Для этого они содержат аппараты и устройства, находящиеся во взаимодействии с устройствами управления двигателями. Такие схемы управления, защиты и сигнализации серийно выпускаются электротехнической промышленностью в виде панелей, шкафов и блоков управления и других подобных комплектных устройств.

3.2. ТИПОВЫЕ УЗЛЫ И СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Схема пуска двигателя постоянного тока с независимым возбуждением по принципу времени. Эта схема (рис. 3.1, *а*) содержит кнопки управления *SB1* (пуск) и *SB2* (останов) двигателя, линейный контактор *KM1*, обеспечивающий подключение двигателя к сети, и контактор ускорения *KM2* для выключения (шунтирования) пускового резистора $R_д$. В качестве датчика времени в схеме использовано электромагнитное реле времени *KT*. При подключении схемы к источнику питания напряжением *U* происходит возбуждение двигателя и срабатывает реле *KT*, размыкая свой размыкающий контакт в цепи катушки контактора *KM2* и подготавливая двигатель к пуску.

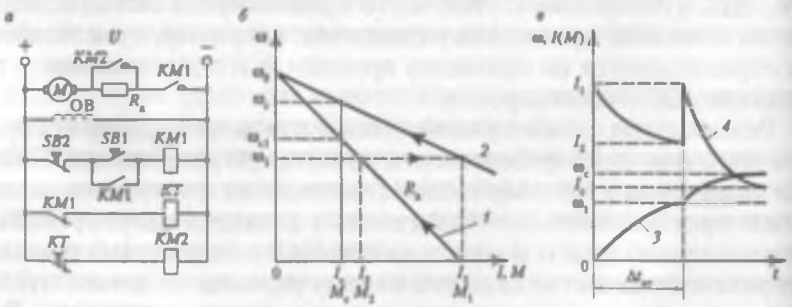


Рис. 3.1. Схема пуска двигателя по принципу времени (*а*), характеристики двигателя (*б*) и кривые переходного процесса (*в*)

Пуск двигателя начинается после нажатия кнопки *SB1*, в результате чего получает питание контактор *KM1*, который своим главным силовым контактом подключает двигатель к источнику питания. Двигатель начинает разбег с резистором $R_д$ в цепи якоря, с помощью которого ограничивается пусковой ток двигателя. Одновременно замыкающий блок-контакт контактора *KM1* шунтирует кнопку *SB1*, и она может быть отпущена, а размыкающий блок-контакт *KM1* разрывает цепь питания катушки реле времени *KT*. Через интервал времени $\Delta t_{к.т}$ после прекращения питания катушки реле времени, называемый выдержкой времени, размыкающий контакт *KT* замкнется в цепи катушки контактора *KM2*, последний включится и главным контактом закоротит пусковой резистор $R_д$ в цепи якоря. Таким образом, при пуске двигатель в течение времени $\Delta t_{к.т}$ разгоняется по искусственной характеристике *1* (рис. 3.1, *б*), а после шунтирования резистора $R_д$ — по естественной *2*. Величина сопротивления резистора $R_д$ выбрана таким образом, что в момент включения двигателя ток I_1 в цепи и соответственно момент M_1 не превосходят допустимого уровня.

За время $\Delta t_{к.т}$ после начала пуска скорость вращения двигателя достигает величины ω_1, а ток в цепи якоря снижается до уровня I_2 (рис. 3.1, *в*). После шунтирования $R_д$ происходит бросок тока в цепи якоря от I_2 до I_1, который не превышает допустимого уровня. Изменение скорости, тока и момента во времени происходит по экспоненте.

Останов двигателя осуществляется нажатием кнопки *SB2*, что приведет к отключению якоря двигателя от источника питания и его торможению под действием момента сопротивления на его валу. Такой способ останова двигателя получил название «торможение выбегом».

Схема пуска двигателя в две ступени по принципу ЭДС и динамического торможения по принципу времени. В этой схеме (рис. 3.2, *а*) в качестве датчика ЭДС использован якорь двигателя, к которому подключены катушки контакторов ускорения *KM1* и *KM2*, обеспечивающих шунтирование пусковых резисторов $R_{д1}$ и $R_{д2}$. С помощью регулировочных резисторов $R_{у1}$ и $R_{у2}$ эти контакторы могут быть настроены на срабатывание при определенных скоростях двигателя.

Для осуществления торможения в схеме предусмотрен резистор $R_{д3}$, подключение и отключение которого осуществляется контактором торможения *KM3*. Для обеспечения выдержки времени используется электромагнитное реле времени *KT*, размыкающий контакт которого включен в цепь катушки контактора торможения *KM2*.

После подключения схемы к источнику питания происходит возбуждение двигателя, а аппараты схемы остаются в исходном положении. Пуск двигателя осуществляется нажатием кнопки *SB1*,

что приводит к срабатыванию линейного контактора *KM* и подключению двигателя к источнику питания. Двигатель начинает разбег с включенными резисторами $R_{д1}+R_{д2}$ в цепи якоря по характеристике *1* (рис. 3.2, *б*). По мере увеличения скорости двигателя растет его ЭДС и соответственно напряжение на катушках контакторов *KM1* и *KM2*. При скорости ω_1 срабатывает контактор *KM1*, закорачивая своим контактом первую ступень пускового резистора $R_{д1}$, и двигатель переходит на характеристику *2*. При скорости ω_2 срабатывает контактор *KM2*, шунтируя вторую ступень пускового резистора $R_{д2}$. Двигатель выходит на естественную характеристику *3* и заканчивает свой разбег в точке установившегося режима с координатами ω_c — M_c, определяемой пересечением естественной характеристики *3* двигателя и характеристики нагрузки.

PDF Compressor Free Version

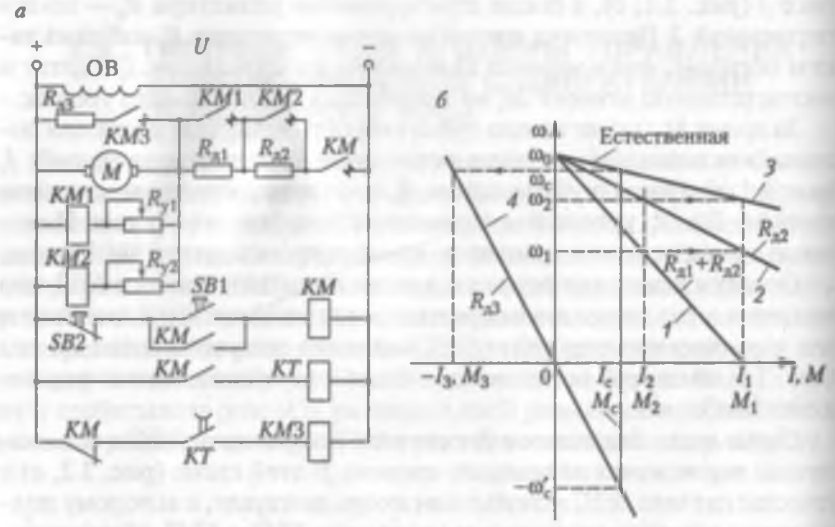


Рис. 3.2. Схема пуска двигателя по принципу ЭДС и динамического торможения по принципу времени (*а*) и характеристики двигателя (*б*)

Для перехода к режиму торможения нажимается кнопка *SB2*. Катушка контактора *KM* теряет питание, размыкается замыкающий силовой контакт *KM* в цепи якоря двигателя, и он отключается от источника питания. Размыкающий блок-контакт *KM* в цепи катушки контактора торможения *KM3* замыкается, последний срабатывает и своим главным контактом подключает резистор $R_{д3}$ к якорю *M*, переводя двигатель в режим динамического торможения по характеристике *4* (рис. 3.2, *б*). Одновременно раз-

мыкается замыкающий контакт контактора *КМ* в цепи реле времени *КТ*, оно теряет питание и начинает отсчет времени. Через интервал времени, который соответствует снижению скорости двигателя до нуля, реле времени отключается и своим контактом разрывает цепь питания контактора *КМ3*. Резистор $R_{д3}$ отключается от якоря *М* двигателя, торможение заканчивается, и схема возвращается в свое исходное положение.

Применение динамического торможения обеспечивает более быстрый останов двигателя и тем самым быстрое прекращение движения исполнительного органа рабочей машины.

Схема пуска двигателя в одну ступень по принципу времени и динамического торможения по принципу ЭДС. Управление двигателем при пуске происходит по аналогии со схемой рис. 3.1. При включении двигателя в этой схеме (рис. 3.3) и работе от источника питания размыкающий контакт линейного контактора *КМ* в цепи контактора торможения *КМ2* разомкнут, что предотвращает перевод двигателя в режим торможения.

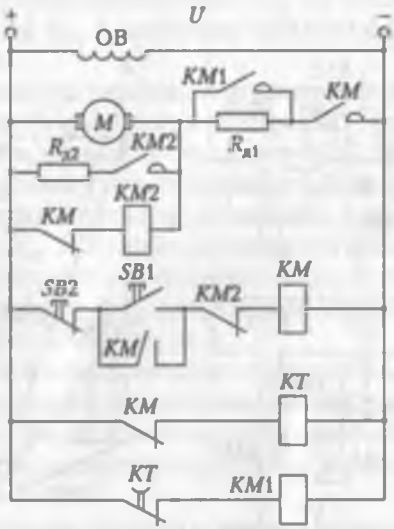


Рис. 3.3. Схема пуска двигателя по принципу времени и динамического торможения по принципу ЭДС

Торможение осуществляется нажатием кнопки *SB2*. Контактор *КМ*, потеряв питание, отключает якорь двигателя от источника питания и замыкает своим контактом цепь питания катушки кон-

тактора *KM2*. Последний от действия наведенной в якоре ЭДС срабатывает и замыкает якорь *M* на резистор торможения $R_{д2}$. Процесс динамического торможения происходит до тех пор, пока при небольшой скорости двигателя его ЭДС не станет меньше напряжения отпускания контактора *KM2*. Тот отключится, и схема вернется в исходное положение.

PDF Compressor Free Version

Схема управления пуском двигателя по принципу времени, реверсом и торможением противовключением по принципу ЭДС. В этой схеме (рис. 3.4, *а*) предусмотрено два линейных контактора *KM1* и *KM2*, обеспечивающих его вращение соответственно в условных направлениях «Вперед» и «Назад». Главные контакты этих аппаратов образуют реверсивный контактный мостик, с помощью которого можно изменить полярность напряжения на якоре *M* и тем самым осуществлять торможение противовключением и реверс (изменение направления вращения) двигателя. В якорной цепи помимо пускового резистора $R_{д1}$ включен резистор противовключения $R_{д2}$, который управляется контактором противовключения *KM3*.

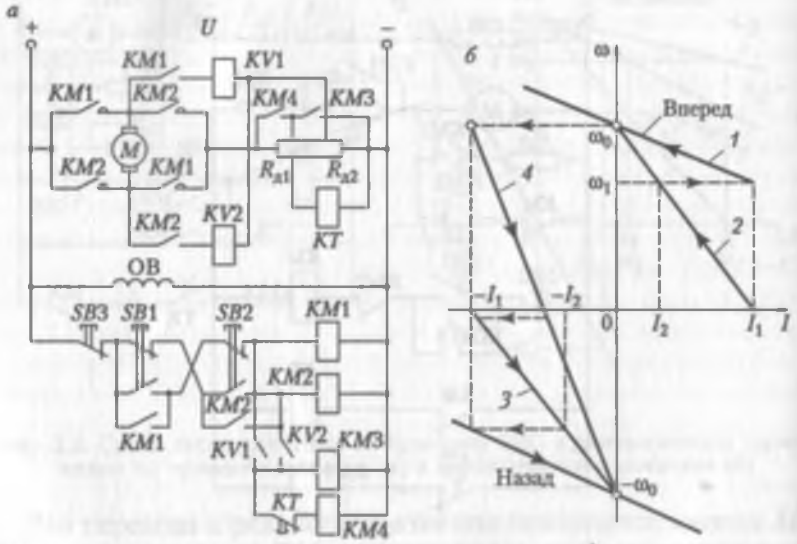


Рис. 3.4. Схема управления пуском и реверсом двигателя (*а*) и характеристики двигателя (*б*)

Управление двигателем при торможении противовключением и реверсе осуществляется с помощью двух реле противовключения *KV1* и *KV2*. Их назначение в том, чтобы в режиме противовключе-

ния для ограничения тока в якоре до допустимого уровня обеспечить ввод в цепь якоря в дополнение к пусковому резистору $R_{д1}$ резистор противовключения $R_{д2}$, что достигается выбором точки присоединения катушек реле *KV1* и *KV2* к резистору ($R_{д1} + R_{д2}$).

Пуск двигателя в любом направлении осуществляется в одну ступень в функции времени. При нажатии, например, кнопки *SB1* срабатывает контактор *KM1* и подключает якорь *M* к источнику питания. За счет падения напряжения на резисторе $R_{д1}$ от пускового тока срабатывает реле времени *KT*, размыкающее свой контакт в цепи контактора *KM4*.

Включение *KM1* приведет также к срабатыванию реле *KV1*, которое замкнет свой замыкающий контакт в цепи контактора противовключения *KM3*. Это вызовет включение *KM3*, что приведет к закорачиванию ненужного при пуске резистора противовключения $R_{д2}$ и одновременно катушки реле времени *KT*. Двигатель начнет разбег по характеристике *2* (рис. 3.4, *б*), а реле времени *KT* — отсчет выдержки времени.

По истечении выдержки времени реле *KT* замкнет свой контакт в цепи катушки контактора *KM*, он включится, закоротит пусковой резистор $R_{д1}$, и двигатель выйдет на свою естественную характеристику *1*.

Для осуществления торможения нажимается кнопка *SB2*, в результате чего отключаются контактор *KM1*, реле *KV1*, контакторы *KM3* и *KM4* и включается контактор *KM2*. Напряжение на якоре двигателя изменяет свою полярность, и двигатель переходит в режим торможения противовключением с двумя резисторами в цени якоря $R_{д1}$ и $R_{д2}$. Несмотря на замыкание контакта *KM2* в цепи реле *KV2*, оно в результате оговоренной выше настройки не включается и тем самым не дает включиться аппаратам *KM3* и *KM4* и зашунтировать резисторы $R_{д1}$ и $R_{д2}$.

Перевод двигателя в режим противовключения соответствует его переходу с естественной характеристики *1* на искусственную характеристику *4* (рис. 3.4, *б*). Во всем диапазоне скоростей $0 < \omega < \omega_0$ на этой характеристике двигатель работает в режиме противовключения.

По мере снижения скорости двигателя растет напряжение на катушке реле *KV2*, и при скорости, близкой к нулю, оно достигнет напряжения срабатывания. Если к этому моменту времени кнопка *SB2* будет отпущена, то отключается контактор *KM2*, схема возвращается в исходное положение и на этом процесс торможения заканчивается.

Если же при достижении малой скорости кнопка *SB2* остается нажатой, то включается реле *KV2* и процесс пуска двигателя по-

вторяется, но уже в противоположную сторону. Таким образом, реверсирование двигателя включает в себя два этапа: торможение противовключением и пуск в противоположном направлении. Второй этап реверса изображен на рис. 3.4, *б* переходом двигателя с характеристики *4* на характеристику *3*, соответствующую обратной полярности напряжения на якоре двигателя и наличию в якоре добавочного резистора $R_{д1}$.

PDF Compressor Free Version

Схема пуска двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением по принципу тока. В этой схеме (рис. 3.5) используется реле тока *KA*, катушка которого включена в цепь якоря *M*, а размыкающий контакт — в цепь питания контактора ускорения *KM2*. Реле тока настраивается таким образом, чтобы его ток отпускания соответствовал току I_2 (см. рис. 3.1, *б*). В схеме используется также дополнительное блокировочное реле *KV* с временем срабатывания большим, чем у реле *KA*.

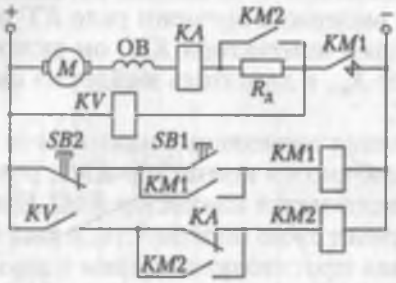


Рис. 3.5. Схема пуска двигателя по принципу тока

Работа схемы при пуске происходит следующим образом. После нажатия на кнопку *SB1* срабатывает контактор *KM1*, двигатель подключается к источнику питания и начинает свой разбег. Бросок тока в якорной цепи после замыкания главного контакта контактора *KM1* вызовет срабатывание реле тока *KA*, которое разомкнет свой размыкающий контакт в цепи контактора *KM2*. Через некоторое время после этого срабатывает *KV* и замыкает свой замыкающий контакт в цепи контактора *KM2*, подготавливая его к включению.

По мере разбега двигателя ток якоря снижается до значения тока переключения I_2. При этом токе отключается реле тока и замыкает свой размыкающий контакт в цепи катушки контактора *KM2*. Последний срабатывает, его главный контакт закорачивает пусковой резистор $R_д$ в цепи якоря, а вспомогательный контакт

шунтирует контакт реле тока *KA*. Поэтому вторичное включение реле тока *KA* после закорачивания $R_д$ и броска тока не вызовет отключения контактора *KM2* и двигатель продолжит разбег по своей естественной характеристике.

Схема типовой панели управления двигателем, обеспечивающая пуск, динамическое торможение и регулирование скорости ослаблением магнитного потока. Типовые релейно-контакторные схемы управления ЭП содержат элементы блокировок, защит, сигнализации, а также связи с технологическим оборудованием. Для унификации схемных решений электротехническая промышленность выпускает стандартные станции, блоки и панели управления, специализированные по видам ЭП рабочих механизмов, функциональным возможностям, условиям эксплуатации, роду тока и т.д. Ниже в качестве примера рассмотрена схема одного из таких типовых устройств.

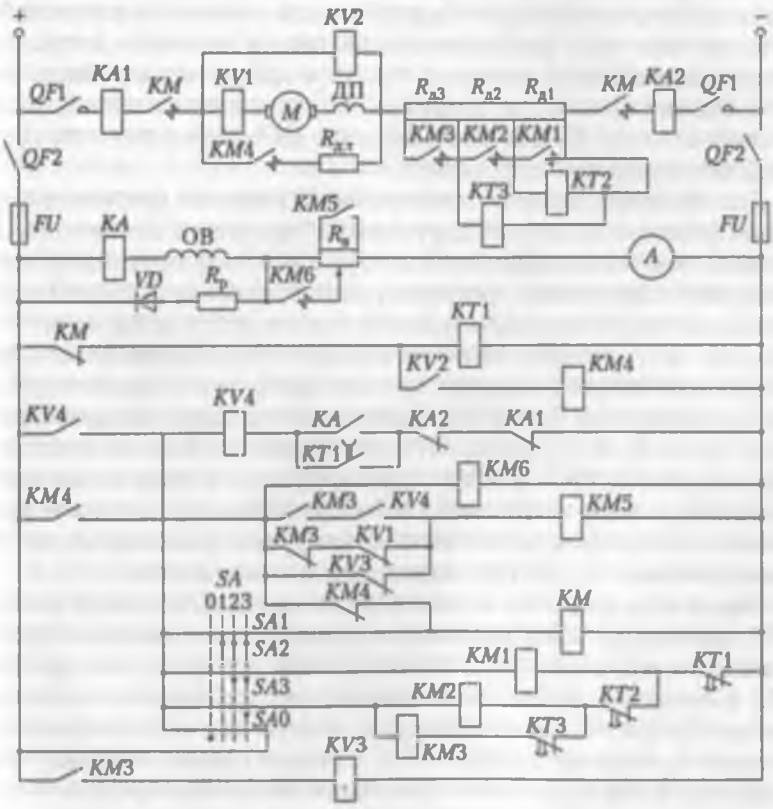


Рис. 3.6. Схема типовой панели управления двигателем

Органом управления в этой схеме является командоконтроллер *SA*, имеющий четыре положения рукоятки: одно нулевое (начальное) и три рабочих (см. рис. 3.6). Пуск двигателя осуществляется в три ступени по принципу времени, торможение — динамическое по принципу ЭДС.

PDF Compressor Free Version

Перед пуском командоконтроллер устанавливается в нулевое положение, затем включаются автоматические выключатели *QF1* и *QF2* и ЭП подключается к источнику питания. По обмотке *OB* возбуждения начинает протекать ток возбуждения, и, кроме того, срабатывает реле времени *KT1*, шунтируя в цепи реле контроля напряжения своим контактом контакт реле *KA* обрыва цепи обмотки возбуждения. Если при этом реле максимального тока *KA1* и *KA2* находятся в нормальном (отключенном) положении, то срабатывает реле *KV4*, подготавливая питание схемы управления через свой замыкающий контакт. Если в процессе работы произойдет недопустимое снижение напряжения питания или тока возбуждения двигателя или ток в якоре превысит допустимый уровень, то произойдет отключение реле *KV4*, схема управления лишится питания и двигатель будет отключен от сети. Таким образом, реле выполняет роль исполнительного элемента трех защит.

Для пуска двигателя до максимальной скорости рукоятка командоконтроллера *SA* перемещается в крайнее третье положение. Это приведет к срабатыванию контактора *KM* и подключению якоря *M* двигателя к источнику питания, после чего он начнет свой разбег с полным сопротивлением пускового резистора в цепи якоря. Реле времени *KT1*, потеряв питание вследствие размыкания контакта *KM*, начнет отсчет выдержки времени работы на первой ступени, а реле времени *KT2* и *KT3*, сработав от падения напряжения на резисторах $R_{д1}$ и $R_{д2}$, разомкнут свои контакты в цепях контакторов ускорения *KM2* и *KM3*. Одновременно с этим включаются «экономический» контактор *KM6* и контактор управления возбуждением *KM5*, в результате чего шунтируется резистор $R_в$, и пуск двигателя происходит при полном магнитном потоке.

Через определенное время замкнется размыкающий контакт *KT1*, контактор *KM1* включится, зашунтирует первую ступень пускового резистора $R_{д1}$ и одновременно катушку реле времени *KT2*. Последнее, отсчитав свою выдержку времени, включит контактор *KM2*, который зашунтирует вторую ступень пускового резистора $R_{д2}$ и катушку реле *KT3*. Это реле, также отсчитав свою выдержку времени, вызовет срабатывание контактора *KM3* и шунтирование последней ступени пускового резистора, после чего двигатель выходит на свою естественную характеристику.

После шунтирования третьей ступени пускового резистора начинается ослабление магнитного потока, которое подготавливается включением реле *KV3* срабатывания *KM3*. В процессе ослабления тока возбуждения с помощью реле управления *KV1* обеспечивается контроль за током якоря. При бросках тока реле *KV1* обеспечивает включение или отключение контактора *KM5*, усиливая или ослабляя ток возбуждения, в результате чего ток в якорной цепи не выходит за допустимые пределы. При размыкании контакта *KM5* часть тока возбуждения замыкается через диод *VD* и разрядный резистор $R_р$.

Торможение двигателя осуществляется перестановкой рукоятки командоконтроллера *SA* в нулевое положение. Это приводит к выключению контактора *KM* и отключению якоря *M* от источника питания. Поскольку в процессе пуска двигателя реле динамического торможения *KV2* включилось, замыкание размыкающего контакта *KM* в цепи контактора торможения *KM4* вызовет его включение. Резистор $R_{д.т}$ окажется подключенным к якорю *M* двигателя, который перейдет в режим динамического торможения. При малых скоростях двигателя, когда его ЭДС станет ниже напряжения отпускания (удержания) реле *KV2*, оно отключится, выключит контактор *KM4* и процесс торможения закончится. Отметим, что динамическое торможение происходит при полном магнитном потоке.

Для снижения скорости двигателя рукоятка командоконтроллера *SA* переводится в положения *1* или *2*. В положении *1* двигатель работает на искусственной характеристике, соответствующей наличию в цепи якоря резисторов $R_{д2} + R_{д3}$, а в положении *2* — на характеристике, обусловленной резистором $R_{д3}$.

Разомкнутая схема регулирования скорости двигателя с использованием задатчика интенсивности. Разомкнутая схема электропривода, выполненного по структуре «управляемый преобразователь — двигатель постоянного тока независимого возбуждения» с использованием задатчика интенсивности приведена на рис. 3.7, *а*. На схеме приняты обозначения: *1* — потенциометр задания скорости; *2* — задатчик интенсивности; *3* — управляемый преобразователь.

Получение требуемых графиков изменения скорости, тока и момента двигателя в переходных процессах осуществляется в этой системе за счет соответствующего регулирования ЭДС преобразователя $E_{т.п}$ и тем самым напряжения *U*, подводимого к якорю двигателя. Допустим, что скорость двигателя должна изменяться по графику, показанному на рис. 3.7, *б*, и при этом ток и момент не должны превосходить допустимый уровень. В соответствии с этим графиком в момент времени $t = 0$ осуществляется пуск двигателя (замыкаются контакты *B*), в момент времени t_1 — реверс (размы-

каются контакты *В* и замыкаются контакты *Н*), а в момент t_2 — торможение (размыкаются контакты *Н*). Для реализации этого графика скорости в момент $t = 0$ скачкообразно подается задающий сигнал по скорости $U_{зс}$ (см. рис. 3.7, *в*), в момент времени t_1 он скачкообразно изменяет свою полярность на противоположную по сравнению с пуском, а в момент времени t_2 этот сигнал снимается.

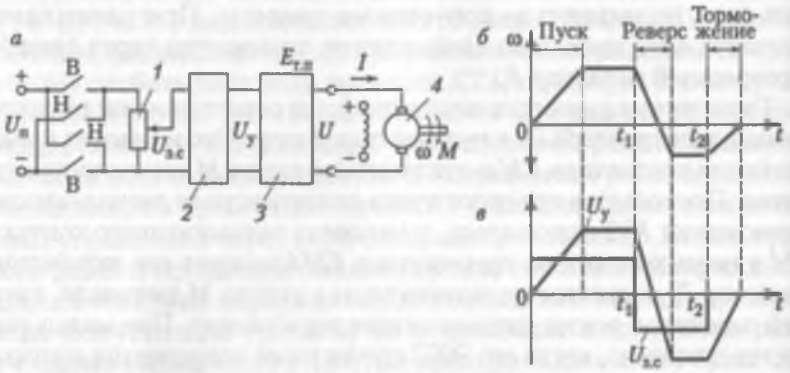


Рис. 3.7. Схема управления двигателем с использованием задатчика интенсивности

Если не предпринять специальных мер по формированию графика скорости, то переходные процессы будут существенно отличаться от заданных, а из-за малой инерционности преобразователя и небольших значений сопротивления цепи якоря будут иметь место недопустимо большие броски тока и момента.

Для получения желаемых графиков переменных в переходных процессах между источником задающего сигнала потенциометром *1* и преобразователем *3* включается задатчик интенсивности *2*. При подаче на вход задатчика ступенчатого сигнала $U_{зс}$ сигнал на его выходе начинает изменяться во времени плавно по линейному (или экспоненциальному) закону и достигает уровня входного сигнала за определенный интервал времени. Аналогичное постепенное изменение сигнала на выходе задатчика интенсивности и тем самым на входе преобразователя имеет место и при смене полярности сигнала задания скорости $U_{зс}$ или его снятии (отключении). Скорость изменения выходного сигнала задатчика интенсивности регулируется и может быть установлена в широких пределах — от долей секунды до нескольких десятков секунд.

На рис. 3.7, *в* показано требуемое изменение во времени сигнала управления $U_у$, которое вызывает в силу малой инерционно-

сти преобразователя практически такое же изменение ЭДС преобразователя $E_{т.п}$. За счет плавного изменения ЭДС и напряжения U на двигателе график скорости двигателя будет близок к показанному на рис. 3.7, *б*, а ток и момент в переходных процессах за счет соответствующего выбора темпа изменения напряжения U не превысят своих допустимых значений.

Рассмотрим типовые задачи.

Задача 3.1. Составить схему управления, которая обеспечивает пуск двигателя постоянного тока независимого возбуждения в одну ступень в функции ЭДС и торможение противовключением в функции времени.

Задача 3.2. Составить схему управления, которая обеспечивает пуск двигателя постоянного тока независимого возбуждения в две ступени в функции времени и динамическое торможение в функции ЭДС.

Задача 3.3. Схема электропривода приведена на рис. 3.2, *а*. Двигатель постоянного тока типа 4ПФ132S имеет следующие номинальные паспортные данные: мощность $P_{ном} = 11$ кВт, напряжение питания $U_{ном} = 220$ В, ток якоря $I_{ном} = 61{,}5$ А, сопротивление якоря $R_я = 0{,}8$ Ом, частота вращения $n_{ном} = 1060$ об/мин, КПД $\eta_{ном} = 78{,}5\%$. Момент сопротивления на валу двигателя M_c равен номинальному.

Рассчитать:

- величины пусковых $R_{д1}$ и $R_{д2}$ и тормозного $R_{д3}$ резисторов, при включении которых броски тока при пуске и торможении не будут больше двукратного номинального тока якоря;
- уровни напряжения, при которых должны сработать контакторы *KM1* и *KM2*;
- выдержку времени реле времени *KT*.

По каталогам выбрать пусковые и тормозной резисторы и электрические аппараты.

Указание. Перед расчетами построить характеристики, аналогичные приведенным на рис. 3.2, *б*.

Задача 3.4. Схема электропривода приведена на рис. 3.1, *а*. Как изменится вид кривых переходного процесса, показанных на рис. 3.1, *в* для случая пуска двигателя, если выдержка реле времени *KT* или момент нагрузки M_c будет отличаться от расчетных значений?

Задача 3.5. Схема электропривода приведена на рис. 3.5. Какие изменения в работе электропривода произойдут при пуске в случае, если время срабатывания реле *KV* будет меньше времени срабатывания реле *KA*?

Задача 3.6. Схема электропривода приведена на рис. 3.3. Какие изменения в работе электропривода произойдут в случае, если кон-

такт аппарата *KM* в цепи катушки реле времени *KT* обгорит или приварится (т.е. эта цепь будет постоянно разомкнута или замкнута)?

Пример 3.1. Схема электропривода приведена на рис. 3.1, *а*. Двигатель постоянного тока типа 4ПФ132S имеет номинальные паспортные данные, приведенные в условиях задачи 3.3, а момент нагрузки равен 0,9 номинального значения. Требуется рассчитать выдержку реле времени *KT* и сопротивление пускового резистора $R_д$, при включении которого ток в момент включения двигателя не превысит трехкратного значения номинального тока. Суммарный момент инерции электропривода составляет $J = 0{,}6$ кг·м².

PDF Compressor Free Version

При решении задачи используем характеристики и обозначения, представленные на рис. 3.1, *б, в*.

Определяем номинальную скорость вращения, произведение конструктивного коэффициента и магнитного потока двигателя и скорость холостого хода двигателя:

$$\omega_{ном} = \frac{2\pi m_{ном}}{60} = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 1060/60 = 111 \text{ рад/с};$$

$$k\Phi_{ном} = c = \frac{U_{ном} - I_{ном} R_я}{\omega_{ном}} = (220 - 61{,}5 \cdot 0{,}8)/111 = 1{,}54 \text{ В·с};$$

$$\omega_0 = \frac{U_{ном}}{c} = 220/1{,}54 = 143 \text{ рад/с}.$$

Рассчитываем моменты номинальный, нагрузки и заданный пусковой, который при трехкратном пусковом токе будет равен трехкратному номинальному моменту:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = 11000/111 = 99{,}1 \text{ Н·м};$$

$$M_c = 0{,}9 M_{ном} = 0{,}9 \cdot 99{,}1 = 89{,}2 \text{ Н·м};$$

$$M_1 = 3 M_{ном} = 3 \cdot 99{,}1 = 297{,}3 \text{ Н·м}.$$

Находим из подобия треугольников скорости вращения ω_c и ω_1:

$$\omega_c = \omega_0 - \frac{M_c(\omega_0 - \omega_{ном})}{M_{ном}} = 143 - 0{,}9(143 - 111) = 114 \text{ рад/с};$$

$$\omega_1 = \omega_0 - \frac{M_1(\omega_0 - \omega_{ном})}{M_{ном}} = 143 - 3(143 - 111) = 47 \text{ рад/с}.$$

Рассчитываем величину пускового резистора:

$$R_д = \frac{U_{ном}}{3I_{ном}} - R_я = \frac{220}{3 \cdot 61{,}5} - 0{,}8 = 0{,}4 \text{ Ом}.$$

Находим механическую постоянную времени электропривода при работе на искусственной характеристике, скорость ω_{c1} двигателя на этой характеристике, соответствующую моменту нагрузки, и выдержку времени реле времени *KT*:

$$T_м = \frac{J\omega_0}{M_{ном}} = \frac{0{,}6 \cdot 143}{297{,}3} = 0{,}29 \text{ с};$$

$$\omega_{c1} = \omega_0 \frac{1 - M_c}{M_1} = 143 \frac{1 - 89{,}2}{297{,}3} = 100 \text{ рад/с};$$

$$\Delta t_{к.т} = T_м \ln\left[\frac{\omega_{c1}}{\omega_{c1} - \omega_1}\right] = 0{,}29 \ln\left[\frac{100}{100 - 47}\right] = 0{,}18 \text{ с}.$$

3.3. ТИПОВЫЕ УЗЛЫ И СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Типовые узлы и схемы релейно-контакторного управления асинхронными двигателями строятся по тем же принципам, что и схемы управления двигателями постоянного тока.

Типовые схемы управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Двигатели этого типа малой и средней мощности обычно пускаются прямым подключением к сети без ограничения пусковых токов. В этих случаях они управляются с помощью магнитных пускателей, которые одновременно обеспечивают и некоторые виды их защиты.

Схема управления асинхронным двигателем с использованием магнитного пускателя (рис. 3.8) включает в себя магнитный пускатель, состоящий из контактора *KM* и трех встроенных в него тепловых реле защиты *KK*. Схема обеспечивает прямой (без ограничения тока и момента) пуск двигателя, отключение его от сети, а также защиту от коротких замыканий (предохранители *FA*) и перегрузки (тепловые реле *KK*).

Для пуска двигателя замыкают выключатель *QF* и нажимают кнопку пуска *SB1*. Получает питание катушка контактора *KM*, который, включившись, своими главными силовыми контактами в цепи статора двигателя подключает его к источнику питания,

а вспомогательным контактом шунтирует кнопку *SB1*. Происходит разбег двигателя по его естественной характеристике. Для отключения двигателя нажимается кнопка остановки *SB2*, контактор *KM* теряет питание и отключает двигатель от сети. Начинается процесс торможения двигателя выбегом под действием момента нагрузки на его валу.

PDF Compressor Free Version

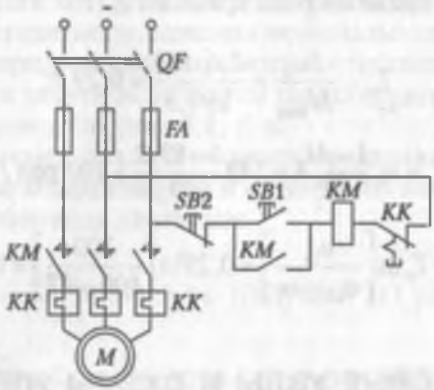


Рис. 3.8. Схема управления асинхронным двигателем с использованием нереверсивного магнитного пускателя

Реверсивная схема управления асинхронным двигателем. Основным элементом этой схемы является реверсивный магнитный пускатель, который включает в себя два линейных контактора *KM1* и *KM2* и два тепловых реле защиты *KK* (рис. 3.9). Схема обеспечивает прямой пуск и реверс двигателя, а также торможение противовключением при ручном (неавтоматическом) управлении.

В схеме предусмотрена защита от перегрузок двигателя (реле *KK*) и коротких замыканий в цепи статора (автоматический выключатель *QF*) и управления (предохранители *FA*). Кроме того, схема управления обеспечивает и нулевую защиту от исчезновения (снижения) напряжения сети (контакторы *KM1* и *KM2*).

Пуск двигателя при включенном автоматическом выключателе *QF* в условных направлениях «Вперед» или «Назад» осуществляется нажатием соответственно кнопок *SB1* или *SB2*. Это приводит к срабатыванию контактора *KM1* или *KM2*, подключению двигателя к сети и его разбегу.

Для реверса или торможения двигателя вначале нажимается кнопка *SB3*, что приводит к отключению включенного до сих пор контактора (например, *KM1*), после чего нажимается кнопка *SB2*.

Это приводит к включению контактора *KM2* и подаче на *АД* напряжения источника питания с другим порядком чередования фаз. Магнитное поле двигателя изменяет свое направление вращения на противоположное, и начинается процесс реверса, состоящий из двух этапов: торможения противовключением и разбега в противоположную сторону.

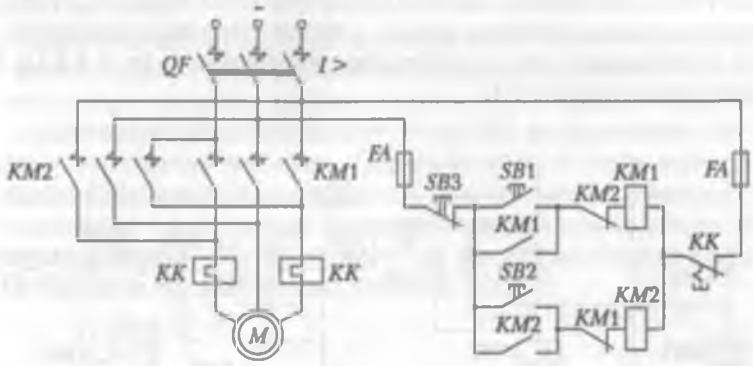


Рис. 3.9. Схема управления асинхронным двигателем с использованием реверсивного магнитного пускателя

В случае необходимости только торможения двигателя при достижении им нулевой скорости должна быть вновь нажата кнопка *SB3*, что приведет к отключению двигателя от сети и возвращению схемы в исходное положение. Если кнопка *SB3* нажата не будет, то это приведет к разбегу двигателя в другую сторону, т.е. к его реверсу.

Во избежание короткого замыкания в цепи статора, которое может возникнуть в результате одновременного ошибочного нажатия кнопок *SB1* и *SB2*, в реверсивных магнитных пускателях иногда предусматривается специальная механическая блокировка. Она представляет собой рычажную систему, которая предотвращает втягивание одного контактора, если включен другой. В дополнение к механической блокировке в схеме используется типовая электрическая блокировка, применяемая в реверсивных схемах управления. Она предусматривает перекрестное включение размыкающих контактов аппарата *KM1* в цепь катушки аппарата *KM2* и, наоборот.

Отметим, что повышению надежности и удобства в эксплуатации способствует использование в схеме воздушного автомати-

ческого выключателя *QF*. Его наличие исключает возможность работы привода при обрыве одной фазы, при однофазном коротком замыкании, как это может иметь место при установке предохранителей, а также он не требует замены элементов (как в предохранителях при сгорании их плавкой вставки).

PDF Compressor Free Version

Схема управления многоскоростным асинхронным двигателем. Эта схема (рис. 3.10) обеспечивает получение двух скоростей двигателя путем соединения секций (полуобмоток) обмотки статора в треугольник или двойную звезду, а также его реверсирование. Защита электропривода осуществляется тепловыми реле *KK1* и *KK2* и предохранителями *FA*.

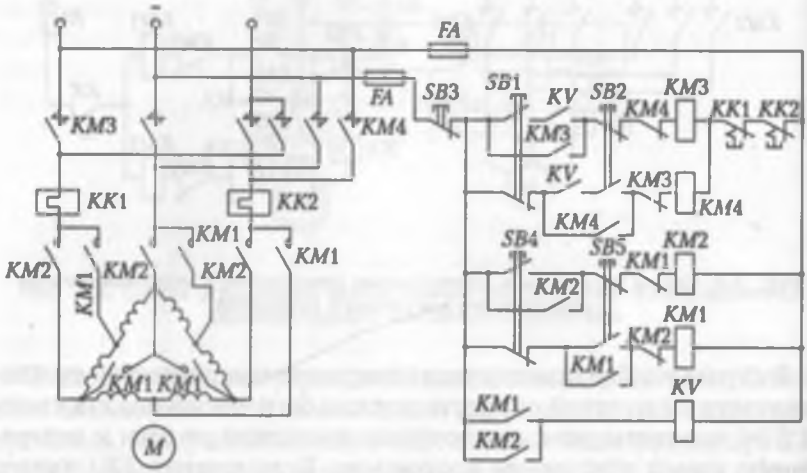


Рис. 3.10. Схема управления двухскоростным асинхронным двигателем

Для пуска двигателя на низкую скорость вращения нажимается кнопка *SB4*, после чего срабатывает контактор *KM2* и блокировочное реле *KV*. Статор двигателя оказывается включенным по схеме треугольника, а реле *KV*, замкнув свои контакты в цепях катушек аппаратов *KM3* и *KM4*, подготавливает подключение двигателя к источнику питания. Далее нажатие кнопки *SB1* или *SB2* приводит к включению соответственно в направлении «Вперед» или «Назад».

После разбега двигателя до низкой скорости может быть осуществлен его разгон до высокой скорости. Для этого нажимается кнопка *SB5*, что приведет к отключению контактора *KM2*, включению контактора *KM1* и пересоединению тем самым секций обмоток статора с треугольника на двойную звезду.

Остановка двигателя производится нажатием кнопки *SB3*, что вызовет отключение всех контакторов от сети и торможение двигателя выбегом.

Применение в схеме двухцепных кнопок управления не допускает одновременного включения контакторов *KM1* и *KM2*, *KM3* и *KM4*. Этой же цели служит перекрестное включение размыкающих блок-контактов контакторов *KM1* и *KM2*, *KM3* и *KM4* в цепи их катушек.

Схема управления асинхронным двигателем, обеспечивающая прямой пуск и динамическое торможение в функции времени. Пуск двигателя осуществляется нажатием кнопки *SB1* (рис. 3.11), после чего срабатывает линейный контактор *KM*, подключающий двигатель к источнику питания. Одновременно с этим замыкание контакта *KM* в цепи реле времени *KT* вызовет его срабатывание и замыкание его контакта в цепи контактора торможения *KM1*. Однако последний не срабатывает, так как перед этим разомкнулся в этой цепи размыкающий контакт *KM*.

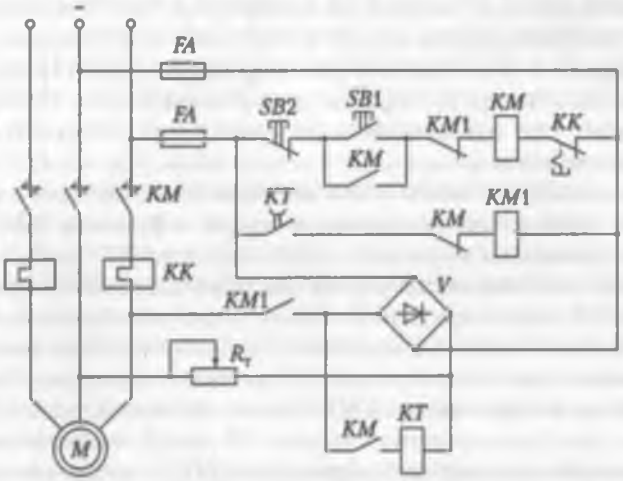


Рис. 3.11. Схема управления пуском и динамическим торможением асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Для остановки двигателя нажимается кнопка *SB3*. Контактор *KM* отключается, размыкая свои контакты в цепи статора двигателя и отключая тем самым его от сети переменного тока. Одновременно с этим замыкается контакт *KM* в цепи аппарата *KM1* и размыкается контакт *KM* в цепи реле *KT*. Это приводит к вклю-

чению контактора торможения *KM1*, подаче в обмотки статора постоянного тока от выпрямителя *V* через резистор $R_т$ и переводу двигателя в режим динамического торможения.

PDF Compressor Free Version

Реле времени *KT*, потеряв питание, начинает отсчет выдержки времени. Через интервал времени, соответствующий времени останова двигателя, реле *KT* размыкает свой контакт в цепи контактора *KM1*, тот отключается, прекращая подачу постоянного тока в цепь статора. Схема возвращается в исходное положение.

Интенсивность динамического торможения регулируется резистором $R_т$, с помощью которого устанавливается необходимый постоянный ток в статоре двигателя.

Для исключения возможности одновременного подключения статора к источникам переменного и постоянного тока в схеме использована типовая блокировка с помощью размыкающих контактов *KM* и *KM1*, включенных перекрестно в цепи катушек этих аппаратов.

Типовые схемы управления асинхронным двигателем с фазным ротором. Схемы управления двигателя с фазным ротором, которые рассчитаны в основном на среднюю и большую мощность, должны предусматривать ограничение токов при их пуске, реверсе и торможении с помощью добавочных резисторов в цепи ротора. За счет включения резисторов в цепь ротора можно также увеличить момент при пуске вплоть до уровня критического (максимального) момента.

Схема одноступенчатого пуска асинхронного двигателя в функции времени и торможения противовключением в функции ЭДС. После подачи напряжения включается реле времени *KT* (рис. 3.12), которое своим размыкающим контактом разрывает цепь питания контактора *KM3*, предотвращая тем самым его включение и преждевременное закорачивание пусковых резисторов в цепи ротора.

Включение двигателя производится нажатием кнопки *SB1*, после чего включается контактор *KM1*. Статор двигателя подсоединяется к сети, электромагнитный тормоз *YB* растормаживается, и начинается разбег двигателя. Включение *KM1* одновременно приводит к срабатыванию контактора *KM4*, который своим контактом шунтирует ненужный при пуске резистор противовключения $R_{д2}$, а также разрывает цепь катушки реле времени *KT*. Последнее, потеряв питание, начинает отсчет выдержки времени, после чего замыкает свой контакт в цепи катушки контактора *KM3*, который срабатывает и шунтирует пусковой резистор $R_{д1}$ в цепи ротора, и двигатель выходит на свою естественную характеристику.

Управление торможением обеспечивает реле торможения *KV*, контролирующее уровень ЭДС (скорости) ротора. С помощью

резистора $R_р$ оно отрегулировано таким образом, что при пуске, когда скольжение двигателя $0 < s < 1$, наводимая в роторе ЭДС будет недостаточна для включения, а в режиме противовключения, когда $1 < s < 2$, уровень ЭДС достаточен для его включения.

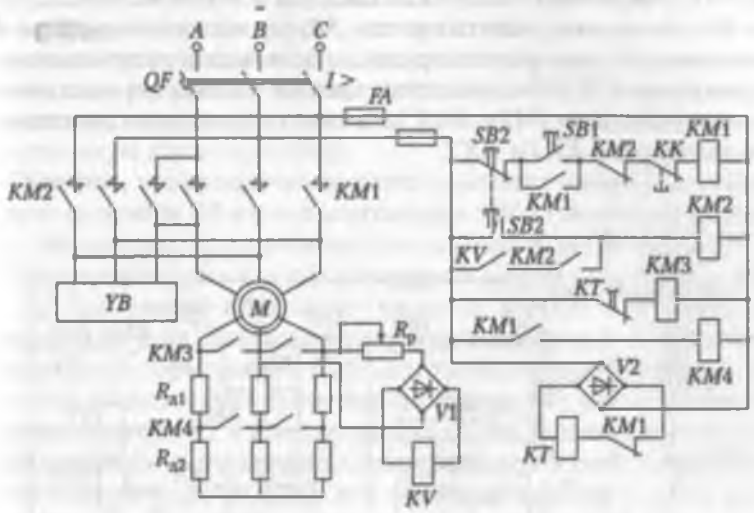


Рис. 3.12. Схема управления пуском и торможением противовключением асинхронного двигателя с фазным ротором

Для осуществления торможения двигателя нажимается сдвоенная кнопка *SB2*, размыкающий контакт которой разрывает цепь питания катушки контактора *KM1*. После этого двигатель отключается от сети и разрывается цепь питания контактора *KM4* и замыкается цепь питания реле *KT*. В результате этого контакторы *KM3* и *KM4* отключаются и в цепь ротора двигателя вводится сопротивление $R_{д1} + R_{д2}$.

Нажатие кнопки *SB2* приводит одновременно к замыканию цепи питания катушки контактора *KM2*, который, включившись, вновь подключает двигатель к сети, но уже с другим чередованием фаз сетевого напряжения на статоре. Двигатель переходит в режим торможения противовключением. Реле *KV* срабатывает и после отпускания кнопки *SB2* будет обеспечивать питание контактора *KM2* через свой контакт и замыкающий контакт этого аппарата.

В конце торможения, когда скорость будет близка к нулю и ЭДС ротора уменьшится, реле *KV* отключится и своим размыкающим контактом разомкнет цепь катушки контактора *KM2*. Последний,

потеряв питание, отключит двигатель от сети, и схема придет в исходное положение. После отключения *KM2* тормоз *YB*, потеряв питание, обеспечит фиксацию (торможение) вала двигателя.

PDF Compressor Free Version

Схема одноступенчатого пуска асинхронного двигателя в функции тока и динамического торможения в функции скорости. Схема (рис. 3.13) включает в себя контакторы *KM1*, *KM2* и *KM3*; реле тока *KA*; реле контроля скорости *SR*, промежуточное реле *KV*; понижающий трансформатор для динамического торможения *T*; выпрямитель *VD*. Максимальная токовая защита осуществляется предохранителями *FA1* и *FA2*, защита от перегрузки двигателя — тепловыми реле *KK1* и *KK2*.

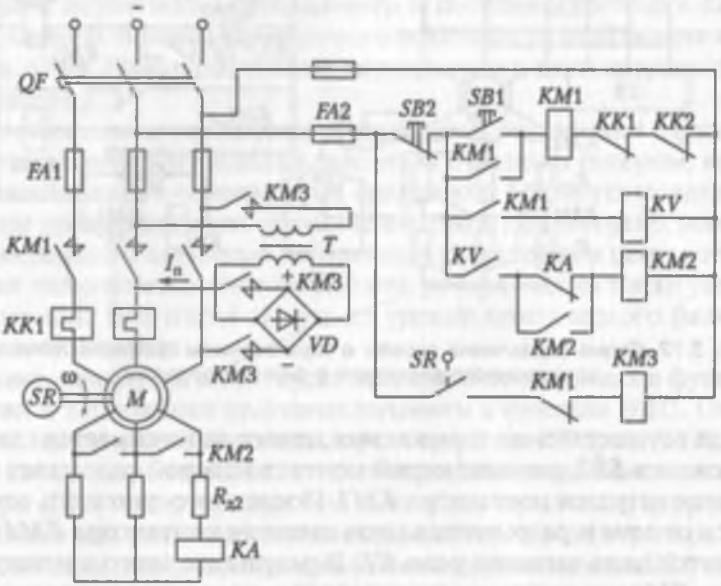


Рис. 3.13. Схема управления пуском и динамическим торможением асинхронного двигателя с фазным ротором

Схема работает следующим образом. После подачи с помощью автоматического выключателя *QF* напряжения для пуска двигателя нажимается кнопка *SB1*, включается контактор *KM1*, силовыми контактами которого статор двигателя подключается к сети. Бросок тока в цепи ротора вызовет включение реле тока *KA* и размыкание цепи контактора ускорения *KM2*. Тем самым разбег двигателя начнется с пусковым резистором $R_{д2}$ в цепи ротора.

Включение контактора *KM1* приводит также к шунтированию кнопки *SB1*, размыканию цепи катушки контактора торможения *KM3* и включению промежуточного реле напряжения *KV*, что, тем не менее, не приведет к включению контактора *KM2*, так как до этого в этой цепи разомкнулся контакт реле *KA*.

По мере увеличения скорости двигателя уменьшаются ЭДС и ток в роторе. При некотором значении тока в роторе, равном току отпускания реле *KA*, оно отключится и своим размыкающим контактом замкнет цепь питания контактора *KM2*. Тот включится, зашунтирует пусковой резистор $R_{д2}$, и двигатель выйдет на свою естественную характеристику.

Отметим, что вращение двигателя вызовет замыкание контакта реле скорости *SR* в цепи контактора *KM3*, однако он не сработает, так как до этого разомкнулся контакт контактора *KM1*.

Для перевода двигателя в тормозной режим нажимается кнопка *SB2*. Контактор *KM1* теряет питание и отключает *АД* от сети переменного тока. Благодаря замыканию контактов *KM1* включится контактор торможения *KM3*, контакты которого замкнут цепь питания обмотки статора от выпрямителя *VD*, подключенного к трансформатору *T*, и тем самым двигатель переводится в режим динамического торможения. Одновременно с этим потеряют питание аппараты *KV* и *KM2*, что приведет к вводу в цепь ротора резистора $R_{д2}$. Двигатель начинает тормозиться.

При скорости двигателя, близкой к нулю, реле контроля скорости *SR* разомкнет свой контакт в цепи катушки контактора *KM3*. Он отключится и прекратит торможение двигателя. Схема придет в исходное положение и будет готова к последующей работе.

Принцип действия схемы не изменится, если катушку реле тока *KA* включить в фазу статора, а не ротора.

Панель типа ПДУ6220. Эта панель входит в состав нормализованной серии панелей управления двигателей с фазным и короткозамкнутым ротором и обеспечивает пуск двигателей в две ступени и динамическое торможение по принципу времени (рис. 3.14).

При подаче на схему напряжений постоянного 220 В и переменного 380 В тока (замыкание рубильников *Q1*, *Q2* и автомата *QF*) включается реле времени *KT1*, чем подготавливается двигатель к пуску с полным пусковым резистором в цепи ротора. Одновременно с этим, если рукоятка командоконтроллера находится в нулевой (средней) позиции и максимально-токовые реле *FA1–FA3* не включены, включится реле защиты *KV* от понижения питающего напряжения и подготовит схему к работе.

Пуск двигателя осуществляется по любой из двух искусственных характеристик или естественной характеристике, для чего

рукоятка *SA* должна устанавливаться соответственно в положение *1*, *2* или *3*. При переводе рукоятки в любое из указанных положений *SA* включаются линейный контактор *KM2*, подключающий двигатель к сети, контактор управления тормозом *KM5*, подключающий к сети катушку *YA* электромагнитного тормоза, который при этом растормаживает двигатель, и реле времени *KT3*, управляющее процессом динамического торможения. При переводе *SA* в положение *2* или *3* включаются контакторы ускорения *KM3* и *KM4* и двигатель начинает разгоняться.

PDF Compressor Free Version

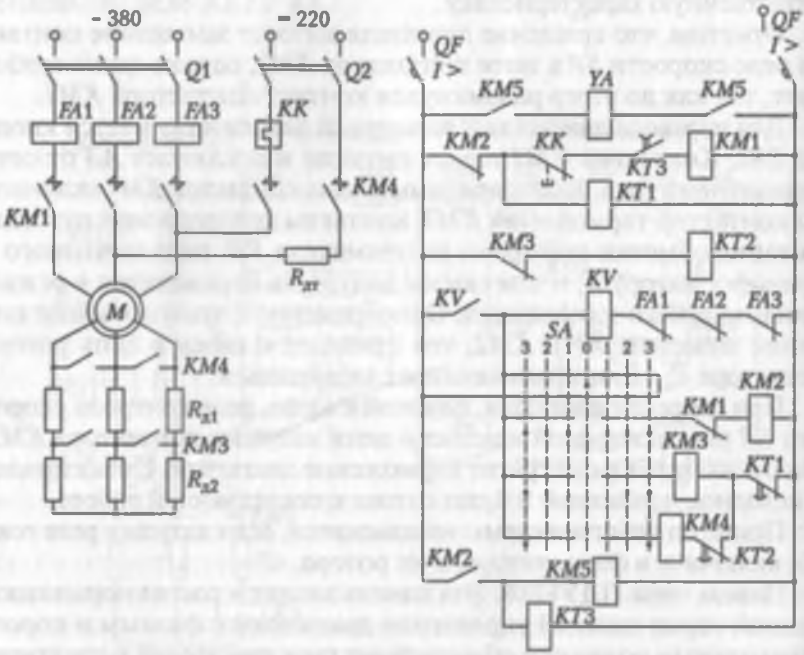


Рис. 3.14. Схема асинхронного электропривода с использованием типовой панели управления

Торможение двигателя происходит при переводе рукоятки *SA* в нулевое (среднее) положение. При этом отключатся контакторы *KM2* и *KM5* и включится контактор динамического торможения *KM1*, который подключит двигатель к источнику постоянного тока. В результате этого будет идти интенсивный процесс комбинированного (механического и динамического) торможения двигателя, которое закончится после отсчета реле *KT3* своей выдержки времени, соответствующей времени торможения.

Схемы управления двигателя с использованием тиристорных пусковых устройств. Эффективным методом формирования желаемых графиков изменения тока и момента двигателя в переходных режимах является регулирование напряжения на его статоре с помощью тиристорных пусковых устройств (ТПУ). Чаще всего это делается для ограничения тока и момента двигателя при пуске («мягкий» способ пуска), хотя с помощью этих устройств можно обеспечить и повышение момента двигателя при пуске («жесткий» способ пуска).

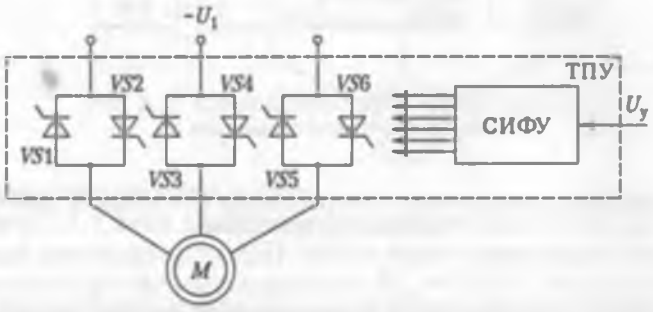


Рис. 3.15. Схема асинхронного электропривода с тиристорным пусковым устройством

Упрощенная схема электропривода, иллюстрирующая этот метод, приведена на рис. 3.15. Тиристорное пусковое устройство включается между источником питания (сетью переменного тока) с напряжением U_1 и статором двигателя. В нереверсивном ТПУ его силовую часть образуют три пары встречно-параллельно включенных тиристоров *VS1–VS6*, управление которыми осуществляется импульсами напряжения, поступающими на них от системы импульсно-фазового управления *СИФУ*. Ограничение тока и момента осуществляется за счет снижения подводимого к двигателю напряжения, что достигается соответствующим изменением во времени угла управления тиристорами. Напряжение при пуске может изменяться по различным законам — линейно нарастать от нуля до сетевого, быть пониженным в течение всего времени пуска или изменяться по так называемому бустерному варианту, при котором для облегчения пуска двигателя на него вначале подается скачком некоторое напряжение, которое затем продолжает нарастать уже по линейному закону. В замкнутой системе может быть обеспечено и поддержание тока статора на заданном уровне.

Добавление в схему рис. 3.15 еще двух пар тиристоров позволяет получить реверсивную схему управления двигателем, обеспечивающую возможность вращения двигателя в двух направлениях. На базе схемы ТПУ может быть обеспечено и динамическое торможение двигателя.

PDF Compressor Free Version

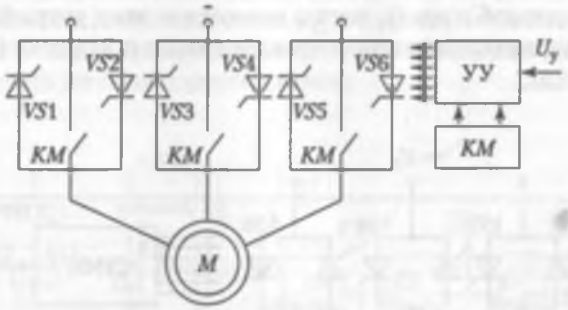


Рис. 3.16. Схема асинхронного электропривода с гибридным тиристорным пусковым устройством

Дополнительными положительными свойствами обладают *гибридные* ТПУ, которые получаются добавлением в схему рис. 3.15 электромагнитного контактора, как это показано на рис. 3.16. В такой схеме тиристорная часть обеспечивает регулирование напряжения при пуске, а после его завершения включается контактор *КМ* и подключает двигатель к сети напрямую. Это повышает экономичность и надежность работы электропривода. В этой схеме тиристоры не имеют охладителей, а контактор — дугогасительных камер, что обусловливает их небольшие массу и габаритные размеры.

Схема квазичастотного регулирования скорости двигателя. На базе схемы рис. 3.15 может быть реализовано так называемое квазичастотное регулирование скорости двигателя. Схема, иллюстрирующая такое регулирование, показана на рис. 3.17. В ее состав входит блок квазичастотного управления *БКЧУ*, который с помощью схемы управления *СИФУ* обеспечивает периодическое подключение двигателя к источнику питания и его отключение. За счет изменения частоты и длительности интервалов включения и отключения двигателя могут быть получены механические характеристики, позволяющие регулировать скорость двигателя или его момент при пуске. Особенностью квазичастотного управления являются вибрации и шум при работе двигателя, а также повышенные потери мощности, что вызывает дополнительный нагрев двигателя и требует определенного завышения его мощности в случае регулирования скорости.

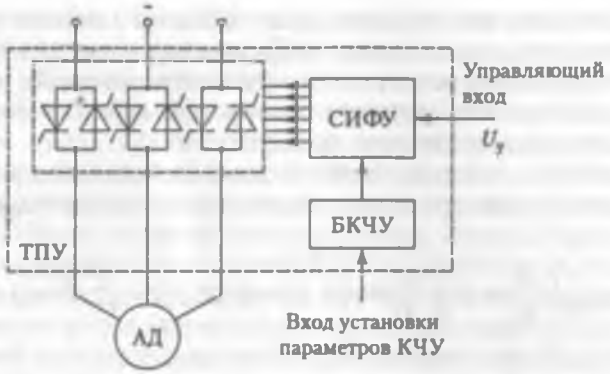


Рис. 3.17. Схема асинхронного электропривода с квазичастотным управлением

Рассмотрим типовые задачи.

Задача 3.7. Схема электропривода приведена на рис. 3.8. Асинхронный двигатель типа АИР180М4 имеет следующие номинальные паспортные данные: мощность $P_{ном} = 30$ кВт, напряжение питания $U_{1ном} = 380/220$ В, ток статора $I_{1ном} = 56{,}8$ А, частота вращения холостого хода $\omega_0 = 157$ рад/с, КПД $\eta_{ном} = 92\%$, коэффициент мощности $\cos\varphi_{ном} = 0{,}87$, скольжение $s_{ном} = 0{,}02$, кратность пускового тока $I_{1п}/I_{1ном} = 7$, кратности максимального и пускового моментов $M_{max}/M_{ном} = 2{,}7$, $M_п/M_{ном} = 1{,}7$.

При длительном режиме работы двигателя требуется:

- выбрать магнитный пускатель с тепловыми реле защиты;
- выбрать автоматический выключатель;
- рассчитать параметры предохранителей и выбрать их по каталогу;
- рассчитать уставки тепловых реле.

Задача 3.8. Схема электропривода приведена на рис. 3.11. Требуется выбрать по каталогу контакторы *KM* и *KM1*. К каким последствиям в работе электропривода приведет обгар контакта аппарата *KM* в цепи катушки контактора *KM1*?

Задача 3.9. Составить схему управления, которая обеспечивает пуск асинхронного двигателя с фазным ротором в две ступени в функции времени и торможение противовключением в функции скорости (с использованием реле контроля скорости).

Задача 3.10. Составить схему управления, которая обеспечивает прямой пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и его торможение противовключением в функции времени.

Пример 3.2. Схема электропривода приведена на рис. 3.12, двигатель имеет данные, представленные в задаче 3.7. Суммарный

момент инерции электропривода $J = 0{,}7$ кг·м², момент нагрузки равен номинальному моменту. Определить соотношение сопротивлений пускового резистора $R_{д1}$ и обмотки ротора R_2, при котором пусковой момент двигателя будет равен максимальному (критическому), и выдержку реле времени.

PDF Compressor Free Version

Рассчитываем величину критического скольжения двигателя на естественной характеристике, используя его паспортные данные:

$$s_{кр.е} = s_{ном}\left(\frac{M_{max}}{M_{ном}} + \sqrt{\left(\frac{M_{max}}{M_{ном}}\right)^2 - 1}\right) = 0{,}02(2{,}7 + \sqrt{2{,}7^2 - 1}) = 0{,}1.$$

Находим требуемое соотношение сопротивлений, учитывая, что на искусственной характеристике при заданном условии критическое скольжение $s_{кр.и} = 1$:

$$\frac{R_{д1}}{R_2} = \frac{s_{кр.и}}{s_{кр.е}} - 1 = \frac{1}{0{,}1} - 1 = 9.$$

Определяем величину критического момента двигателя:

$$M_{max} = 2{,}7M_{ном} = 2{,}7\frac{P_{ном}}{\omega_0}(1 - s_{ном}) = \frac{2{,}7 \cdot 30000}{157}(1 - 0{,}02) = 526{,}5 \text{ Н·м}.$$

Принимая искусственную характеристику двигателя в первом квадранте линейной и полагая момент переключения на 15% превышающим номинальный момент, оценим механическую постоянную времени и выдержку реле времени:

$$T_м = \frac{J\omega_0}{M_{max}} = \frac{0{,}7 \cdot 157}{526{,}5} = 0{,}21 \text{ с};$$

$$\Delta t_{к.т} = T_м \ln\left[\frac{M_{max} - M_{max}}{1{,}15M_{ном} - M_{max}}\right] = 0{,}21 \ln\left[\frac{2{,}7 - 1}{0{,}15}\right] = 0{,}51 \text{ с}.$$

3.4. ТИПОВЫЕ УЗЛЫ И СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Релейно-контакторные схемы управления синхронными двигателями, кроме обычных операций по включению и отключению (торможению) двигателя и ограничению пусковых токов, долж-

ны обеспечивать управление током возбуждения двигателей, имеющих обмотку возбуждения. При пуске используются два способа такого управления: с «глухоподключенной» (постоянно включенной) обмоткой возбуждения и с подключением обмотки в конце пуска перед синхронизацией двигателя с сетью. Первый вариант характеризуется более простой схемой и используется при легких условиях пуска двигателя — небольших моментах и инерционных массах нагрузки электропривода. Второй вариант реализуется с помощью более сложной схемы управления, но зато может обеспечивать пуск двигателя при значительных моментах сопротивления и инерционности нагрузки электропривода.

Типовой узел управления током возбуждением двигателя в функции скорости. В этой схеме подключение обмотки возбуждения к источнику питания $U_в$ осуществляется контактором *KM2* (рис. 3.14, *а*), который управляется реле скорости *KR*. Катушка этого реле связана с частью разрядного резистора $R_р$ через диод *VD*.

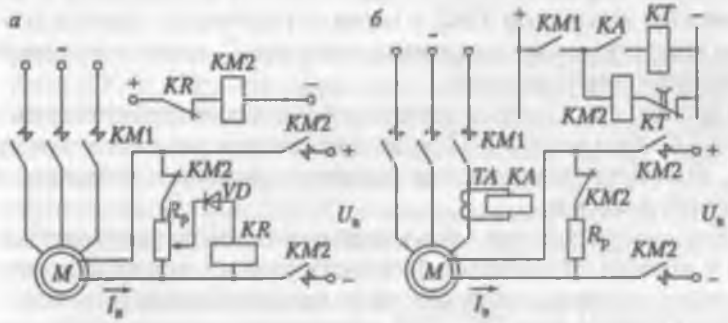


Рис. 3.18. Узлы схем управлением возбуждением синхронного двигателя с использованием принципа скорости (*а*) и тока (*б*)

При включении контактора *KM1* (его цепи управления на рисунке не показаны) обмотка статора двигателя подключается к сети переменного тока и образует вращающееся магнитное поле, которое вызовет появление момента двигателя, под действием которого он начнет разбег, и, кроме того, наведет ЭДС в обмотке возбуждения двигателя. Под действием ЭДС по катушке реле *KR* начнет протекать выпрямленный ток, оно включится и разомкнет цепь питания контактора *KM2*. Тем самым разбег двигателя будет происходить без тока возбуждения с закороченной на разрядный резистор $R_р$ обмоткой возбуждения.

По мере роста скорости ротора его ЭДС, а тем самым и ток в катушке реле *KR*, снижаются. При подсинхронной скорости ток в катушке реле *KR* станет меньше тока отпускания, оно отключится и вызовет тем самым включение контактора *KM2*. Контактор *KM2* подключит обмотку возбуждения к источнику питания, и далее происходит процесс синхронизации двигателя с сетью.

PDF Compressor Free version

Схема управления возбуждением двигателя в функции тока. Эта схема (рис. 3.18, *б*) содержит реле тока *KA*, обмотка которого питается от трансформатора тока *TA*, и реле времени *KT*. При подключении двигателя к сети контактором *KM1* в цепи обмотки статора возникает бросок пускового тока, что приводит к срабатыванию реле *KA*. Контакт этого реле замыкает цепь питания реле времени *KT*, что вызовет отключение контактора возбуждения *KM2*. Разбег двигателя, как и в предыдущем случае, осуществляется с закороченной на разрядный резистор $R_р$ обмоткой возбуждения.

В конце пуска при подсинхронной скорости двигателя и уменьшении тока в статоре реле *KA* отключается и катушка реле времени *KT* теряет питание. Через заданную выдержку времени включается контактор *KM2*, и через его контакты обмотка возбуждения подключается к источнику питания $U_в$, после чего двигатель втягивается в синхронизм.

Отметим, что в рассмотренных схемах после срабатывания контактора возбуждения *KM2* разрывается цепь разрядного резистора $R_р$, что облегчает тепловой режим его работы и повышает экономичность схемы.

Электротехническая промышленность выпускает типовые панели и шкафы управления двигателя разных типов. Рассмотрим в качестве примера схему одной из таких панелей.

Схема панели типа ПУ 7502 управления двигателем низкого напряжения. Панель (рис. 3.19) обеспечивает прямой (без токоограничения) пуск с глухоподключенным источником питания обмотки возбуждения (возбудителем) *G* и форсировку возбуждения при снижении уровня питающего напряжения. В схеме предусмотрены также защиты: тепловая (реле *KK* и трансформаторы тока *TA1* и *TA2*), токовая (автоматы *QF1* и *QF2*), от снижения напряжения сети переменного тока (реле *KV2*, *KV3*) и постоянного тока (реле *KV1*).

Пуск двигателя может быть осуществлен только при нормальных уровнях питающих схему напряжений постоянного и переменного тока. В этом случае, если рукоятка командоконтроллера *SA* находится в среднем положении и включены автоматы *QF1* и *QF2*, срабатывают реле напряжения *KV2*, *KV3* и реле времени *KT*, что подготавливает схему к пуску двигателя.

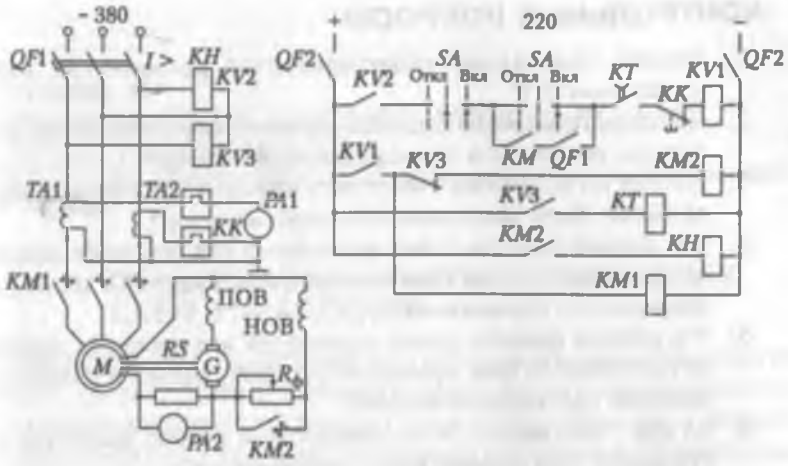


Рис. 3.19. Схема синхронного электропривода с использованием типовой панели управления

При переводе рукоятки *SA* в положение «Включено» срабатывает реле *KV1* и катушка линейного контактора *KM1* подключается к источнику питания, к обмотке статора двигателя подводится напряжение переменного тока, и тот начинает разбег. При подсинхронной скорости происходит возбуждение возбудителя *G*, имеющего независимую (НОВ) и последовательную (ПОВ) обмотки возбуждения, и соответственно двигателя, который втягивается в синхронизм.

Схема управления обеспечивает увеличение (форсирование) тока возбуждения двигателя при резком снижении питающего напряжения, что позволяет сохранять максимальный момент двигателя и тем самым его перегрузочную способность. При нормальном уровне питающего напряжения реле напряжения *KV3* включено, цепь катушки контактора *KM2* разомкнута и резистор форсировки $R_ф$ введен в цепь тока возбуждения двигателя.

При резком снижении напряжения реле *KV3* отключается, замыкает цепь катушки контактора форсировки *KM2*, который включается и своим контактом шунтирует резистор $R_ф$, вызывая тем самым увеличение тока возбуждения двигателя. О включении *KM2* сигнализирует указательное реле *KH*.

Для контроля тока статора двигателя в схеме предусмотрен амперметр *PA1*, а тока возбуждения двигателя — амперметр *PA2*, питаемый от шунта *RS*.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими признаками характеризуются разомкнутые схемы управления ЭП?
PDF Compressor Free Version
2. По каким принципам строятся разомкнутые схемы управления пуском, реверсом и торможением двигателей?
3. Почему по истечении некоторого времени при пуске двигателя может быть закорочен пусковой резистор?
4. Что должна сделать схема управления для перевода двигателя постоянного тока независимого возбуждения в режим динамического торможения?
5. Что должна сделать схема управления для перевода двигателя постоянного тока независимого возбуждения в режим торможения противовключением?
6. За счет чего может быть осуществлен реверс двигателя постоянного тока независимого возбуждения?
7. Что должна сделать схема управления для перевода асинхронного двигателя в режим динамического торможения?
8. Что должна сделать схема управления для реверса асинхронного двигателя?
9. Какие варианты возбуждения синхронного двигателя применяются при его пуске?

Глава 4. ЗАМКНУТЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

4.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАМКНУТЫХ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Замкнутые схемы управления электроприводов применяются в тех случаях, когда требуется обеспечить движение исполнительных органов рабочих машин с высокими показателями качества — большими диапазоном регулирования координат и точностью их поддержания, заданным качеством переходных процессов, а также высокой экономичностью или оптимальным (наилучшим) функционированием технологического оборудования и самого электропривода.

Для обеспечения такого управления в структуру электропривода входит силовой управляемый полупроводниковый преобразователь электроэнергии — выпрямитель, регулятор напряжения, преобразователь частоты, а схема управления строится с использованием обратных связей по регулируемым координатам (переменным). Другими словами, силовая часть такого электропривода имеет структуру «преобразователь — двигатель», в которой двигатель питается от управляемого преобразователя.

Важной характеристикой большинства современных замкнутых систем управления является возможность гибкой настройки их параметров, программирования и перепрограммирования алгоритмов управления электропривода, что обеспечивается применением микропроцессорных средств управления. Использование микропроцессорных средств позволяет также повышать надежность функционирования электроприводов и технологического оборудования за счет диагностики при их работе, резервирования каналов управления и т.д.

4.2. ЗАМКНУТЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Характеристики разомкнутых электроприводов, построенных по системе «преобразователь — двигатель» (П-Д), могут имеют относительно невысокую жесткость из-за наличия внутреннего сопротивления преобразователя и самого двигателя. Для получения зна-

чительных диапазонов и высокой точности регулирования скорости требуется иметь более жесткие характеристики, которые можно подучить лишь в замкнутой системе П-Д. Кроме того, характеристики разомкнутой системы не обеспечивают точного регулирования (или ограничения) тока и момента, что также требует перехода к замкнутой системе П-Д. Рассмотрим принципы построения и действия замкнутых схем регулирования скорости, тока, момента и положения с использованием различных обратных связей.

PDF Compressor Free Version

Замкнутая система П-Д с отрицательной обратной связью по скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Основу системы составляет разомкнутая схема П-Д. На валу двигателя находится датчик скорости — тахогенератор *ТГ* (рис. 4.1, *а*), выходное напряжение которого $U_{тг} = \gamma\omega$, пропорциональное скорости двигателя, является сигналом обратной связи. Коэффициент пропорциональности γ носит название коэффициента обратной связи по скорости и может регулироваться за счет изменения тока возбуждения тахогенератора $I_{в.тг}$.

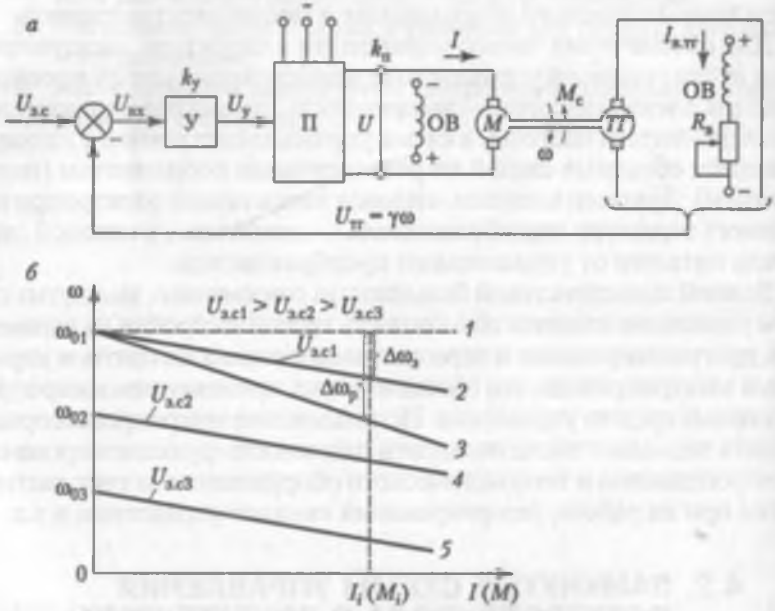


Рис. 4.1. Схема (*а*) и характеристики (*б*) замкнутой системы с обратной связью по скорости

Сигнал обратной связи $U_{тг}$ сравнивается с задающим сигналом скорости $U_{з.с}$, и их разность в виде сигнала рассогласования (ошибки) $U_{вх}$ подается на вход усилителя *У*, который с коэффициентом

k_y усиливает сигнал рассогласования $U_{вх}$ и подает его в виде сигнала управления U_y на вход преобразователя $П$, в качестве которого используется управляемый выпрямитель. Усилитель в этой схеме является пропорциональным регулятором скорости.

Для получения формул характеристик двигателя в замкнутой системе воспользуемся выражениями для электромеханической $\omega(I)$ и механической $\omega(M)$ характеристик двигателя в разомкнутой схеме и соотношениями, следующими из рассмотрения рис. 4.1, *а*:

$$\omega(I) = \frac{E_п}{k\Phi} - \frac{I(R_я + R_п)}{k\Phi}; \tag{4.1}$$

$$\omega(M) = \frac{E_п}{k\Phi} - \frac{M(R_я + R_п)}{(k\Phi)^2}; \tag{4.2}$$

$$U_{вх} = U_{з.с} - \gamma\omega; \tag{4.3}$$

$$U_y = k_y U_{вх}; \tag{4.4}$$

$$E_п = k_п U_y, \tag{4.5}$$

где $E_п$ — ЭДС преобразователя; k — конструктивный коэффициент двигателя; Ф — магнитный поток двигателя; I — ток якоря двигателя; $R_я$, $R_п$ — соответственно сопротивление якоря двигателя и преобразователя; M — момент двигателя.

Заменяя в (4.1) и (4.2) последовательно $E_п$ на ее выражение из (4.5), U_y на его выражение из (4.4) и далее $U_{вх}$ — на его выражение из (4.3), после несложных преобразований получаем следующие формулы для характеристик двигателя в замкнутой системе:

$$\omega = \frac{k_y k_п U_{з.с}}{c(1+k_c)} - \frac{I(R_я + R_п)}{c(1+k_c)}; \tag{4.6}$$

$$\omega = \frac{k_y k_п U_{з.с}}{c(1+k_c)} - \frac{M(R_я + R_п)}{c^2(1+k_c)}. \tag{4.7}$$

где $c = k\Phi_{ном}$; $k_c = \gamma k_y k_п / c$ — общий коэффициент усиления замкнутой системы П-Д.

Для анализа жесткости получаемых характеристик сопоставим перепады скорости в разомкнутой $\Delta\omega_р$ и замкнутой $\Delta\omega_з$ системах при одном и том же токе или моменте. Согласно (4.1), (4.2), (4.6) и (4.7) имеем

$$\Delta\omega_р = \frac{I_y(R_я + R_п)}{c}; \tag{4.8}$$

$$\Delta\omega_з = \frac{I_у(R_я + R_п)}{c(1+k_с)} = \Delta\omega_р(1+k_с). \qquad (4.9)$$

PDF Compressor Free Version

Так как всегда $k_с > 0$, то $\Delta\omega_з < \Delta\omega_р$, т.е. жесткость получаемых характеристик в замкнутой системе больше жесткости характеристик в разомкнутой системе. Сами характеристики, показанные на рис. 4.1, *б*, представляют собой прямые параллельные линии *2*, *4* и *5*, расположение которых определяется уровнем задающего сигнала по скорости $U_{з.с}$ и соответственно скоростью холостого хода ω_0. Здесь же для сравнения приведена характеристика двигателя в разомкнутой (прямая *3*) системе.

Для нахождения предельной по жесткости характеристики устремим коэффициент усиления системы $k_с$ в бесконечность. Из (4.9) видно, что при $k_с \to \infty$ $\Delta\omega_з \to 0$, т.е. в пределе в данной замкнутой системе может быть получена абсолютно жесткая характеристика, которая изображена на рис. 4.1, *б* в виде штриховой линии *1*.

Рассмотрим физическую сторону процесса регулирования скорости в данной системе. Предположим, что двигатель работает под нагрузкой в установившемся режиме и по каким-то причинам увеличился момент нагрузки $M_с$. Так как развиваемый двигателем момент стал меньше момента нагрузки, его скорость начнет снижаться, и соответственно будет снижаться сигнал обратной связи по скорости $U_{тг} = \gamma\omega$. Это, в свою очередь, согласно (4.3)–(4.5) вызовет увеличение сигналов рассогласования $U_{вх}$ и управления $U_у$ и приведет к повышению ЭДС преобразователя, а следовательно, напряжения и скорости двигателя.

При уменьшении момента нагрузки обратная связь действует в другом направлении, приводя к снижению ЭДС преобразователя. Таким образом, благодаря наличию обратной связи осуществляется автоматическое регулирование ЭДС преобразователя и тем самым подводимого к двигателю напряжения, за счет чего получаются более жесткие характеристики электропривода. В разомкнутой системе, напротив, при изменении момента нагрузки ЭДС преобразователя не изменяется, в результате чего жесткость характеристик электропривода оказывается меньше.

Для получения жестких характеристик в системе П-Д кроме обратной связи по скорости используются также отрицательная обратная связь по напряжению и положительная обратная связь по току двигателя и их сочетания. Схемы ЭП и получаемые характеристики при использовании этих связей рассмотрены в [20].

Схема управления, обеспечивающая ограничение тока и момента двигателя постоянного тока с помощью нелинейной отрицательной

обратной связи по току. В качестве датчика тока в этой схеме (рис. 4.2, *а*) используется шунт с сопротивлением $R_ш$, падение напряжения на котором пропорционально току якоря I. В результате сигнал обратной связи по току

$$U_{о.т} = \beta I, \qquad (4.10)$$

где β — коэффициент обратной связи по току, Ом.

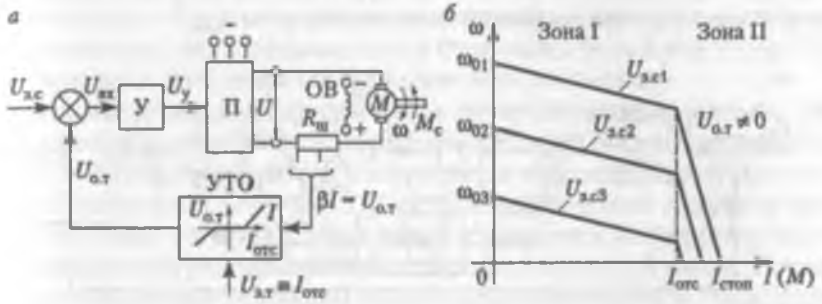


Рис. 4.2. Схема (а) и характеристики (*б*) замкнутой системы с обратной связью по току

Отметим, что в качестве шунта $R_ш$ часто используется обмотка дополнительных полюсов или компенсационная обмотка двигателя.

Сигнал обратной связи $U_{о.т}$ поступает на узел токоограничения *УТО*, называемый также узлом токовой отсечки, вместе с сигналом задания тока $U_{з.т}$. Этот сигнал определяет уровень тока отсечки $I_{отс}$, с которого начинается регулирование (ограничение) тока.

Работа *УТО* в соответствии с его характеристикой $U_{о.т}(I)$ (рис. 4.2, *а*) происходит следующим образом. При токе в якоре, меньшем заданного тока отсечки, т.е. пока $I \leq I_{отс}$, сигнал обратной связи на выходе *УТО* равен нулю. Другими словами, схема в диапазоне тока $0...I_{отс}$ является разомкнутой и двигатель имеет характеристики, изображенные на рис. 4.2, *б* в зоне I.

При $I > I_{отс}$ на выходе *УТО* появляется сигнал отрицательной обратной связи $U_{о.т} = \beta I$. Электропривод становится замкнутым и начинает работать в зоне II (рис. 4.2, *б*). Для пояснения вида характеристик электропривода в этой зоне запишем выражение для сигнала рассогласования

$$U_{вх} = U_{з.с} - \beta I. \qquad (4.11)$$

Из (4.11) видно, что при увеличении тока I сигнал $U_{вх}$ уменьшается, что в соответствии с (4.4) и (4.5) вызовет уменьшение сигнала $U_у$ и $E_п$. Это приведет к уменьшению напряжения на двигателе U и соответствующему снижению тока в якоре двигателя. Характеристики двигателя становятся крутопадающими (мягкими), что и отражает эффект регулирования (ограничения) тока и соответственно момента. При увеличении коэффициента усиления системы характеристики в зоне II все ближе приближаются к вертикальным линиям. Уровень ограничения тока определяется задающим сигналом (уставкой) $U_{з.т}$. Ток при нулевой скорости двигателя получил название тока стопорения $I_{стоп}$.

PDF Compressor Free Version

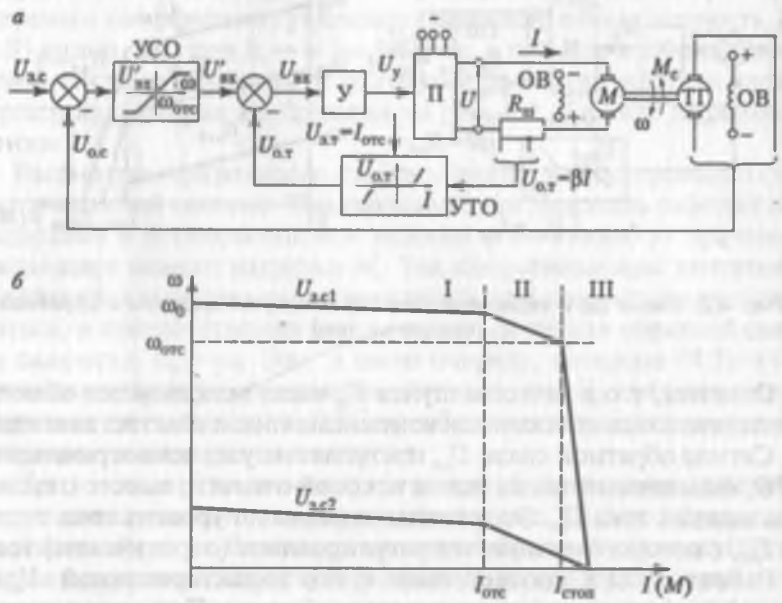


Рис. 4.3. Схема (*а*) и характеристики (*б*) замкнутой системы с обратными связями по скорости и току

Замкнутая схема электропривода с двигателем постоянного тока и обратными связями по скорости и току. Эта схема обеспечивает получение характеристик двигателя, имеющих различную жесткость участков, — высокую для точного поддержания скорости на заданном уровне и малую, что требуется для ограничения тока и момента двигателя в переходных процессах. Это определяется использованием в схеме двух нелинейных обратных связей по скорости и току (рис. 4.3, *а*). Для создания нелинейности цепей об-

ратных связей использованы рассмотренный ранее узел *УТО* и узел ограничения скорости *УСО*, характеристики которых показаны внутри соответствующих условных изображений. Нелинейность обратных связей приводит к разделению области механических характеристик (рис. 4.3, *б*) на три зоны: I, II и III.

В зоне I в диапазоне токов $0...I_{отс}$ действует только обратная связь по скорости, обеспечивая жесткие характеристики электропривода. В зоне II при $I > I_{отс}$ вступает в действие обратная связь по току и характеристики становятся мягче. При дальнейшем увеличении тока и уменьшении скорости ниже скорости отсечки $\omega_{отс}$ перестает действовать обратная связь по скорости и за счет действия обратной связи по току характеристики становятся еще мягче (зона III), обеспечивая требуемое ограничение тока и момента.

Схема управления с подчиненным регулированием координат. Эффективное и качественное регулирование координат в системе П-Д обеспечивает принцип подчиненного регулирования, реализуемый по структурной схеме рис. 1.7. Напомним, что этот принцип предусматривает регулирование каждой координаты с помощью своего отдельного регулятора и соответствующей обратной связи. Тем самым регулирование каждой координаты происходит в своем замкнутом контуре, и требуемые характеристики электропривода в статике и динамике могут быть получены за счет выбора схемы и параметров регулятора этой координаты и цепи ее обратной связи.

Управление внутренним контуром с помощью выходного сигнала внешнего контура определяет еще одно ценное свойство таких систем. Оно заключается в возможности простыми средствами ограничивать любую регулируемую координату, например ток и момент, на заданном уровне. Для этого требуется всего лишь ограничить сигнал, поступающий с внешнего контура.

Рассмотрим схему электропривода (рис. 4.4, *а*) с подчиненным регулированием, выходной регулируемой координатой которого является скорость. Управляющая часть схемы состоит из двух замкнутых контуров регулирования: тока (момента), содержащего регулятор тока *РТ* и датчик тока *ДТ*, и скорости, содержащего регулятор скорости *РС* и датчик скорости (тахогенератор) *ТГ*.

Регуляторы тока и скорости в большинстве схем электропривода этого типа выполняются на базе операционных усилителей (ОУ). Включение в цепи *РС* задающего сигнала скорости $U_{з.с}$ и его обратной связи — резисторов $R1$ и $R_{ос1}$ обеспечивает изменение (усиление или ослабление) этого сигнала с коэффициентом $k_1 = R_{ос1}/R1$. Аналогично изменение сигнала обратной связи по скорости $U_{о.с}$ происходит с коэффициентом $k_2 = R_{ос1}/R2$. Такой регулятор получил название пропорционального (П) регулятора скорости.

PDF Compressor Free Version

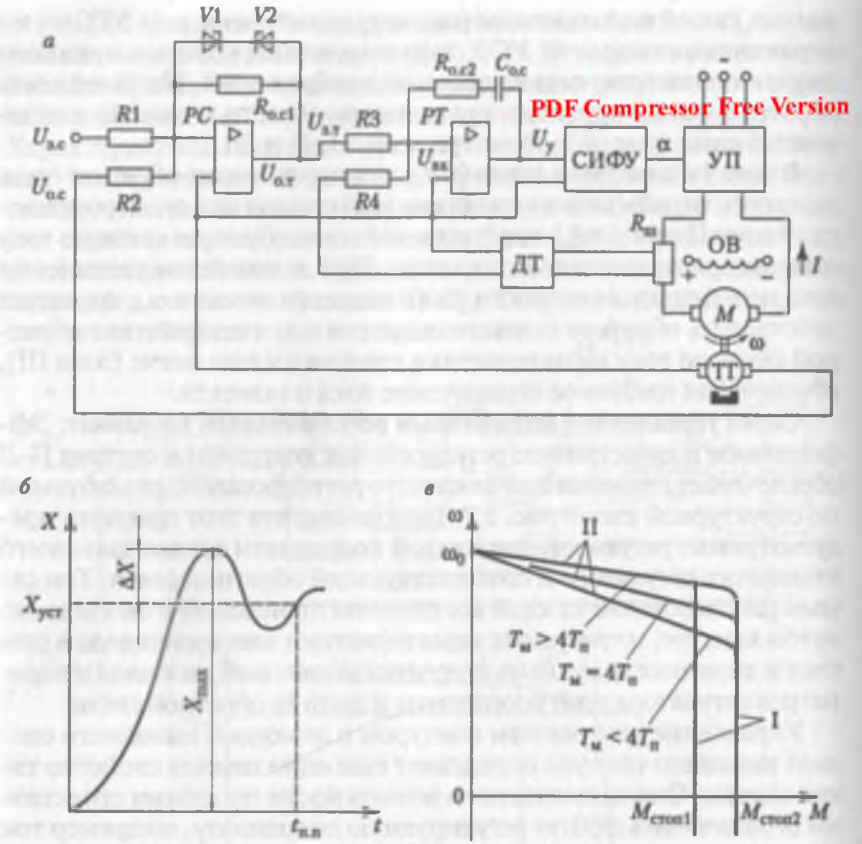


Рис. 4.4. Схема (*а*), динамические (*б*) и статические (*в*) характеристики электропривода с подчиненным регулированием координат

При включении в цепи ОУ конденсаторов (реактивных электрических элементов) его функциональные возможности по преобразованию электрических сигналов становятся шире. Так, схема *PT* с включением в цепь обратной связи конденсатора $C_{о.с}$ последовательно с резистором $R_{о.с2}$ позволяет получить сигнал $U_у$ на выходе *PT* в виде суммы двух составляющих

$$U_у = k_3 U_{вх} + \frac{1}{T}\int U_{вх} dt. \qquad (4.12)$$

Сигнал $U_у$ содержит пропорциональную и интегральную составляющие входного сигнала $U_{вх}$, т.е. *PT* является в этом случае пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором.

По каким же критериям и условиям выбираются схема и параметры цепей того или иного регулятора? Основным условием здесь является желаемый (заданный) характер переходных процессов при регулировании координат. Из всех возможных видов обычно выбирают график с затухающими колебаниями (рис. 4.4, *б*). Такой график является оптимальным в том смысле, что он позволяет обеспечить устойчивые переходные процессы при небольших длительностях и перерегулированиях. Распространенной настройкой регуляторов такого вида является так называемый технический оптимум, при котором перерегулирование $\Delta X = X_{max} - X_{уст}$ (рис. 4.4, *б*) составляет 4,3% от установившегося уровня, а время переходного процесса $t_{п.п} = 4{,}1\,T_{п}$, где $T_{п}$ — электромагнитная постоянная времени тиристорного преобразователя, принимаемая обычно равной 0,01 с. В теории электропривода [2, 14] разработаны методы расчета параметров цепей *РС* и *РТ*, обеспечивающих такой характер регулирования координат электропривода.

Как уже отмечалось, схема подчиненного регулирования координат позволяет простыми средствами ограничивать координаты электропривода на заданном уровне. В схеме рис. 4.4, *а* для ограничения тока и момента в цепь обратной связи *РС* включены стабилитроны *VD1* и *VD2*. В результате этого выходное напряжение *РС*, являющееся входным задающим сигналом (уставкой) тока $U_{зт}$, ограничивается, и тем самым ток и момент двигателя не могут превзойти заданного уровня.

На рис. 4.4, *в* приведены статические характеристики электропривода с подчиненным регулированием координат и настройкой на «технический оптимум». Их особенностью является наличие вертикального участка I, обеспечивающего ограничение тока и момента, и участка II с высокой жесткостью характеристики, определяемой соотношениями двух постоянных времени — электромеханической двигателя $T_{м}$ и электромагнитной $T_{п}$ преобразователя.

В схемах подчиненного регулирования используется и другой критерий настройки регуляторов по так называемому симметричному оптимуму, который позволяет получить абсолютно жесткие статические характеристики на участке II (рис. 4.4, *в*), но переходные процессы в этом случае характеризуются большим перерегулированием, доходящим до 55%. При настройке на «симметричный оптимум» *РС* выполняется как ПИ-регулятор.

При необходимости регулирования положения вала двигателя схема на рис. 4.4, *а* дополняется контуром положения, включающим в себя регулятор положения и датчик положения вала двигателя.

Отметим в заключение, что в силу своих больших функциональных возможностей схемы с подчиненным регулированием

координат нашли очень широкое распространение в регулируемом электроприводе как постоянного, так и переменного тока.

Замкнутая схема управления электроприводом по системе «источник тока — двигатель постоянного тока». В электроприводах с двигателями постоянного тока нашли применение источники питания двигателей со свойствами источника тока. Такие электроприводы в разомкнутой структуре обладают свойствами источника момента, регулируемого по цепи возбуждения, а при введении обратной связи по скорости позволяют получать характеристики, пригодные и для целей регулирования скорости.

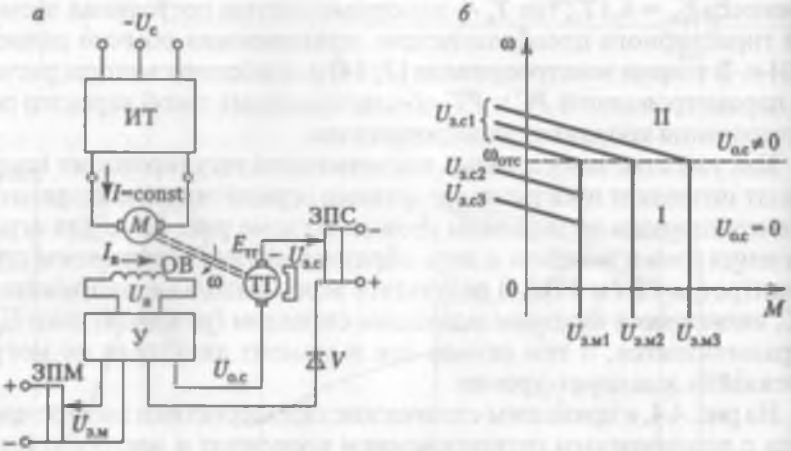


Рис. 4.5. Схема (*а*) и характеристики (*б*) замкнутой системы при питании двигателя от источника тока

Силовую часть этой схемы (рис. 4.5, *а*) образуют источник тока *ИТ* и якорь двигателя *М*, обмотка возбуждения которого *ОВ* подключена к усилителю *У*, имеющему два входа. По первому входу на усилитель с потенциометра *ЗПМ* поступает задающий сигнал момента $U_{з.м}$, уровень которого определяет величину момента на вертикальном участке механической характеристики (рис. 4.5, *б*).

На второй вход *У* по цепи, состоящей из тахогенератора *ТГ*, диода *V* и задающего потенциометра скорости *ЗПС*, подается сигнал нелинейной отрицательной обратной связи по скорости $U_{о.с}$. Цепь обратной связи собрана и настроена таким образом, что диод *V* начнет пропускать ток по ней только тогда, когда ЭДС тахогенератора превышает задающий сигнал по скорости $U_{з.с}$, что произойдет при скоростях, больших $\omega_{отс}$. При скоростях $\omega < \omega_{отс}$ диод *V* закрыт и обратная связь по скорости не действует ($U_{о.с} = 0$).

Нелинейный характер обратной связи по скорости определяет наличие двух зон на плоскости механических характеристик рис. 4.5, *б*. При $\omega < \omega_{отс}$ (зона I) $U_{о.с} = 0$ и на вход *У* подается неизменный по величине сигнал задания момента $U_{з.м}$, напряжение возбуждения на его выходе $U_в$, ток возбуждения $I_в$ и определяемый им момент M постоянны, что и определяет вертикальные участки характеристик на рис. 4.5, *б*.

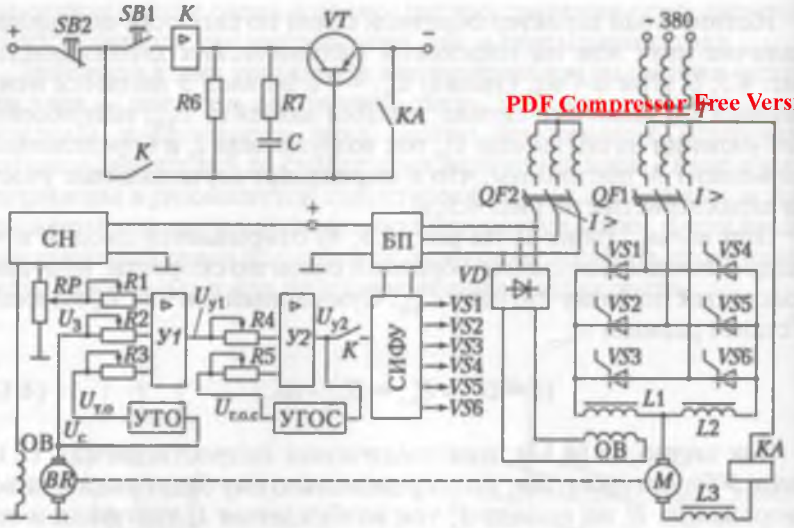
При $\omega > \omega_{отс}$ (зона II на рис. 4.5, *б*) открывается диод *V* и на входе *У* появляется сигнал обратной связи по скорости, противоположный по знаку сигналу $U_{з.м}$. Суммарный сигнал $U_у$ на входе *У* станет равным

$$U_у = U_{з.м} - U_{о.с} = U_{з.м} - \gamma\omega. \qquad (4.13)$$

Как видно из (4.13), при увеличении скорости сигнал $U_у$ на входе *У* будет снижаться, пропорционально ему будут уменьшаться напряжение $U_в$ на выходе *У*, ток возбуждения $I_в$ двигателя и тем самым его момент. Механические характеристики приобретают вид наклонных прямых, показанных на рис. 4.5, *б*. Таким образом, рассматриваемая схема электропривода обеспечивает регулирование двух координат — скорости и момента. Величина сигнала $U_{з.м}$ определяет уровень момента двигателя в зоне I характеристик, а величина сигнала $U_{з.с}$ — уровень скорости двигателя. Жесткость механических характеристик в зоне II определяется общим коэффициентом усиления электропривода.

В качестве примера рассмотрим схему реализации реального замкнутого электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения.

Схема управления серийного электропривода типа ЭТ3Р. Для привода механизмов различных металлообрабатывающих станков, требующих регулирования скорости при мощности до 11 кВт, используется серийный комплектный электропривод типа ЭТ3Р (рис. 4.6) с двигателями серий ПБСТ, 2П или ПГТ. Электропривод этого типа выполнен в виде замкнутой системы регулирования скорости с отрицательной обратной связью по скорости, которая в зависимости от настройки обеспечивает относительный перепад скорости в пределах 0,5–10% при изменении момента нагрузки от $0{,}1M_{ном}$ до $M_{ном}$. В электроприводе обеспечивается также регулирование (ограничение) тока с помощью устройства токоограничения *УТО*. Для обеспечения устойчивости и требуемого качества переходных процессов электропривода в схеме применены гибкие обратные связи по скорости двигателя и результирующему сигналу управления $U_{у2}$.



PDF Compressor Free Version

Рис. 4.6. Схема серийного электропривода типа ЭТЗР

Якорь двигателя, имеющего встроенный тахогенератор *BR*, получает питание от реверсивного тиристорного преобразователя с двумя комплектами тиристоров *VS1–VS6*, составляющих выпрямительную и инверторную группы. Управление этими группами осуществляется с использованием согласованного совместного принципа.

Для уменьшения переменной составляющей уравнительного тока, протекающей между выпрямительной и инверторной группами, в схеме используются ограничительные реакторы *L1* и *L2*. Включение в цепь якоря сглаживающего реактора *L3* позволяет исключить режим прерывистого тока и повысить использование двигателя по току.

Управление тиристорами *VS1–VS6* обеспечивается транзисторной схемой импульсно-фазового управления *СИФУ*, работающей по вертикальному принципу. Она имеет три канала, каждый из которых работает на два тиристора, включенных в одну фазу.

Питание электропривода осуществляется от трехфазного трансформатора *T* с двумя вторичными обмотками. К одной из них, имеющей нулевой вывод, подключена силовая часть привода, а ко второй — обмотка возбуждения *ОВ* (через выпрямитель *VD*) и блок питания *БП*, от которого питается схема управления. Обмотка *ОВ* тахогенератора получает питание от стабилизатора напряжения *СН*.

В состав схемы управления электропривода входят промежуточный усилитель *У1*, усилитель мощности (эмиттерный повторитель) *У2*, узел токоограничения *УТО*, узел гибкой обратной связи *УГОС*, задающий потенциометр *RP*, кнопки управления *SB1* и *SB2* и пусковое реле *K*.

Сигнал управления U_{y1} формируется как алгебраическая сумма сигналов задающего $U_з$, обратной связи по скорости $U_с$ и токоограничения $U_{то}$, для выработки которого используется нелинейная положительная обратная связь по скорости двигателя. При токе якоря, меньшем тока отсечки, работает только контур регулирования скорости. При токе якоря, превышающем ток отсечки, за счет нелинейности цепи токоограничения отрицательная обратная связь по скорости ДПТ отключается и начинает действовать положительная обратная связь, обеспечивая ограничение тока и момента на заданном уровне.

Для обеспечения необходимого качества переходных процессов электропривода в схеме используется гибкая обратная связь, действующая только в переходных процессах. Сигнал корректирующей гибкой обратной связи $U_{гос}$ вместе с сигналом управления U_{y1} поступает на вход усилителя мощности *У2* и после усиления в виде результирующего сигнала U_{y2} подается на вход *СИФУ* через замыкающий контакт пускового реле *K*. Управление этим реле осуществляется с помощью кнопок управления: *SB1* при пуске двигателя и *SB2* при его останове. Реверсирование двигателя осуществляется путем изменения полярности задающего сигнала $U_з$.

В электроприводе типа ЭТЗР реализуется ряд защит, блокировок и сигнализаций. Токовое реле *KA*, катушка которого включена в цепь якоря двигателя, а контакт — в цепь питания реле *K*, обеспечивает максимальную токовую защиту электропривода. При его срабатывании отключается реле *K*, с тиристоров снимаются сигналы управления и двигатель отключается от источника питания.

Автоматические выключатели *QF1* и *QF2* осуществляют максимальную токовую защиту силовой части тиристорного преобразователя, обмотки возбуждения двигателя и схемы управления.

Схема электропривода с микропроцессорным управлением. Рассмотрим схему электропривода с двигателем постоянного тока для регулирования положения исполнительного органа робототехнического устройства с использованием микропроцессорного управления (рис. 4.7, *а*). Этот электропривод должен обеспечивать перемещение и точное позиционирование исполнительного органа робота, для чего в нем используется обратная связь по положению. Для обеспечения высокой точности позиционирования в ЭП осуществляется также регулирование тока (момента) и скорости.

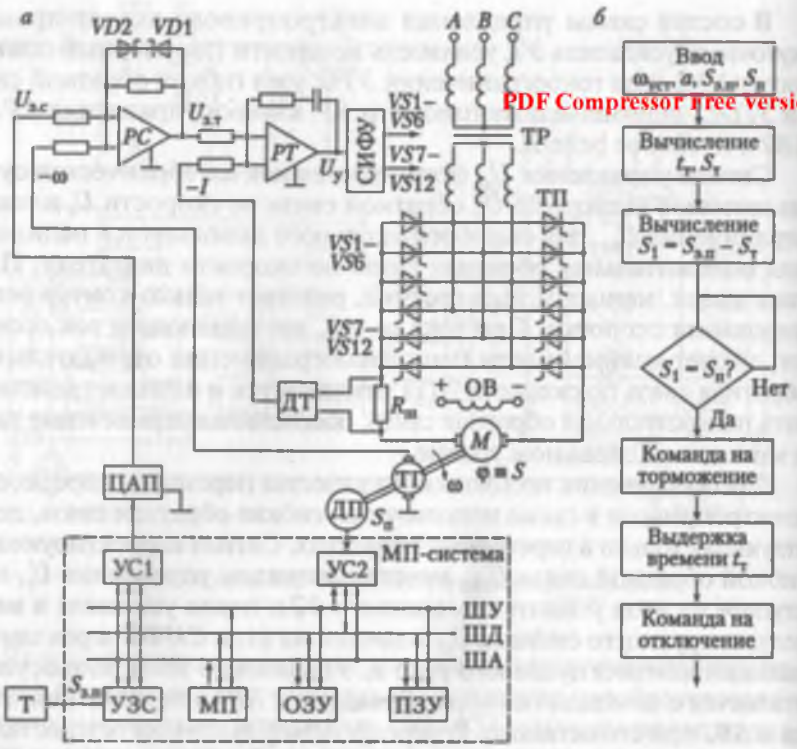


Рис. 4.7. Схема (*а*) и фрагмент программы (*б*) электропривода с микропроцессорным управлением

Схема на рис. 4.7, *а* иллюстрирует характерный пример выполнения подобных схем, когда в них применяются как аналоговые, так и цифровые узлы и устройства управления. Такие схемы, получившие название цифроаналоговых, сочетают в себе лучшие свойства тех и других устройств.

Силовая часть электропривода образована трехфазным мостовым реверсивным тиристорным преобразователем *ТП*, питаемым от трансформатора *ТР*.

Схема управления построена по принципу подчиненного регулирования координат. Регулирование тока производится аналоговым пропорционально-интегральным регулятором тока *РТ*, на вход которого поступают сигналы обратной связи по току от датчика тока *ДТ* и задания тока $U_{з.т}$, с выхода регулятора скорости.

Аналоговый П-регулятор скорости *РС* формирует сигнал задания тока $U_{з.т}$ на основе своего задающего сигнала $U_{з.с}$, поступа-

ющего на него с внешнего по отношению к нему контура положения, и сигнала обратной связи по скорости, вырабатываемого тахогенератором *ТГ*. Стабилитроны *VD1* и *VD2* ограничивают сигнал на выходе *РС*, чем обеспечивается ограничение тока и момента двигателя.

Регулирование положения осуществляется с помощью микропроцессорной системы, включающей в себя микропроцессор *МП*, устройства памяти *ОЗУ* и *ПЗУ*, устройства сопряжения *УС1–УС3*, цифровой датчик положения *ДП*, цифроаналоговый преобразователь *ЦАП*. Сигнал задания положения $S_{з.п}$ поступает (задается) с терминала *Т*, подключаемого к микропроцессорной системе через *УС3*. Тем самым микропроцессорная система выполняет, по существу, роль регулятора положения *РП*.

Работа цифрового регулятора положения в микропроцессорной системе может основываться на одном из двух принципов. Первый из них предусматривает реализацию статической характеристики *РП* в виде параболы, которая обеспечивает оптимальный график движения электропривода. Такой регулятор можно реализовать программным путем, записав в *ПЗУ* эту нелинейную характеристику *РП*.

Второй принцип работы *РП* основан на вычислении момента начала торможения электропривода, что также позволяет получить требуемую точность регулирования положения. Рассмотрим этот способ подробнее.

Реализация способа основана на том, что при известных скорости $\omega_{уст}$ и ускорении $a = \dfrac{M - M_c}{J}$ могут быть рассчитаны время $t_т$ и путь $S_т$ на участке торможения электропривода в конце отработки заданного перемещения $S_{з.п}$ по следующим формулам:

$$t_т = \frac{\omega_{уст}}{a}; \qquad (4.14)$$

$$S_т = \frac{\omega_{уст}^2}{2a}. \qquad (4.15)$$

Алгоритм работы микропроцессорной системы при выработке сигнала на торможение приведен на рис. 4.7, *б*. Для его реализации в микропроцессорную систему вводятся данные по величинам $\omega_{уст}$, a, $S_{з.п}$ и сигнал $S_п$ датчика положения *ДП*, пропорциональный текущему положению вала двигателя и исполнительного органа. Микропроцессорная система производит вычисление $t_т$ и $S_т$ по (4.14) и (4.15) и разности $S_1 = S_{з.п} - S_т$. Затем сопоставляются

величины этой разности S_1 с сигналом датчика положения $S_п$. Как только S_1 станет равной $S_п$, от микропроцессорной системы выдается команда на торможение электропривода, начинается отсчет выдержки времени $t_з$, и по истечении этого интервала вырабатывается команда на отключение электропривода.

PDF Compressor Free Version

Рассмотрим типовые задачи.

Задача 4.1. Электропривод выполнен по схеме рис. 4.1. Двигатель постоянного тока в этой схеме имеет следующие паспортные данные: номинальная мощность $P_{ном} = 14$ кВт, напряжение питания $U_{ном} = 220$ В, номинальная скорость $\omega_{ном} = 104{,}7$ рад/с, номинальный ток якоря $I_{ном} = 82$ А, номинальный КПД $\eta_{ном} = 82\%$, сопротивление цепи якоря $R_я = 0{,}22$ Ом, индуктивность цепи якоря $L_я = 4{,}4$ мГн. Требуется выбрать серийный преобразователь для этого двигателя и рассчитать его коэффициент усиления по напряжению.

Задача 4.2. Для условий задачи 4.1 рассчитать перепад скорости двигателя при номинальном моменте нагрузки. Внутреннее сопротивление преобразователя принять равным сопротивлению цепи якоря двигателя.

Задача 4.3. Для условий задач 4.1 и 4.2 рассчитать коэффициент усиления $k_у$ усилителя $У$ (рис. 4.1), при котором перепад скорости в замкнутой схеме при номинальном моменте нагрузки снизится в 80 раз. Коэффициент передачи тахогенератора γ принять равным 0,6 В/(рад/с).

Пример 4.1. Электропривод выполнен по схеме рис.4.4. Двигатель имеет данные, приведенные в задаче 4.1. Параметры других элементов схемы:

- преобразователь: коэффициент усиления $k_п = 23$, постоянная времени $T_п = 0{,}01$ с, внутреннее сопротивление $R_п = 0{,}15$ Ом;
- тахогенератор: коэффициент передачи $\gamma = 0{,}6$ В/(рад/с);
- шунт: сопротивление шунта $R_ш = 0{,}00075$ Ом;
- датчик тока $ДТ$: коэффициент передачи $k_{д.т} = 100$.

Суммарный момент инерции электропривода $J = 0{,}8$ кг · м^2.

Требуется рассчитать по критерию технического оптимума параметры регуляторов тока и скорости и определяющие параметры цепей операционных усилителей.

При расчете используем методику, изложенную в [14].

Определяем суммарное сопротивление якорной цепи:

$$R_{я.ц} = R_я + R_п = 0{,}22 + 0{,}15 = 0{,}37 \text{ Ом}.$$

Находим постоянную времени цепи якоря двигателя:

$$T_я = \frac{L_я}{R_я} = \frac{0{,}0044}{0{,}22} = 0{,}02 \text{ с}.$$

Находим коэффициент обратной связи по току. При $R3 = R4$ он равен

$$k_{о.т} = k_{д.т} R_ш = 100 \cdot 0{,}00075 = 0{,}075.$$

Рассчитываем постоянную интегрирования ПИ-регулятора тока:

$$T = \frac{2T_п k_{о.т} k_п}{R_{я.ц}} = \frac{2 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}075 \cdot 23}{0{,}37} = 0{,}093 \text{ с}.$$

Определяем коэффициент усиления регулятора тока:

$$k_3 = \frac{T_я}{T} = \frac{0{,}02}{0{,}093} = 0{,}22.$$

Задаваясь $R_{о.с2} = 10$ кОм, находим параметры операционного усилителя, на котором реализован регулятор тока:

$$C_{о.с} = \frac{T_я}{R_{2о.с}} = \frac{0{,}02}{10000} = 2 \text{ мкФ};$$

$$R3 = R4 = \frac{R_{о.с2}}{k_3} = \frac{10}{0{,}22} = 45{,}45 \text{ кОм}.$$

Для нахождения параметров П-регулятора скорости определяем следующие параметры двигателя и электропривода:

произведение конструктивной постоянной двигателя на магнитный поток

$$c = k\Phi_{ном} = \frac{U_{ном} - I_{ном} R_я}{\omega_{ном}} = \frac{220 - 82 \cdot 0{,}22}{104{,}7} = 1{,}93 \text{ В} \cdot \text{с};$$

скорость вращения холостого хода

$$\omega_0 = \frac{U}{c} = \frac{220}{1{,}93} = 114 \text{ рад/с};$$

механическая постоянная времени электропривода

$$T_м = \frac{JR_{я.ц}}{c^2} = \frac{0{,}8 \cdot 0{,}37}{1{,}93^2} = 0{,}08 \text{ с}.$$

Определяем коэффициент передачи регулятора скорости:

$$k_1 = k_{р.с} = \frac{T_м k_{о.т} c \omega_0}{4 T_п R_{я.ц} U_{з\,max}} = \frac{0{,}08 \cdot 0{,}075 \cdot 1{,}93 \cdot 114}{4 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}37 \cdot 10} = 8{,}92;$$

ЭДС тахогенератора при скорости ω_0

$$E_{тг} = \gamma\omega_0 = 0{,}6 \cdot 114 = 68{,}4 \text{ В}.$$

Задаваясь $R_{o.c1} = 100$ кОм, получим

$$R1 = \frac{R_{o.c1}}{k_{yc}} = \frac{100}{8{,}92} = 11{,}2 \text{ кОм};$$

PDF Compressor Free Version

$$R2 = \frac{E_{т} R1}{U_{з.стах}} = \frac{68{,}4 \cdot 11{,}2}{10} = 76{,}7 \text{ кОм}.$$

4.3. ЗАМКНУТЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Замкнутая схема «тиристорный регулятор напряжения — асинхронный двигатель» (ТРН-АД) с использованием обратной связи по его скорости (рис. 4.8, *а*). Силовую часть *ТРН*, как и в схеме на

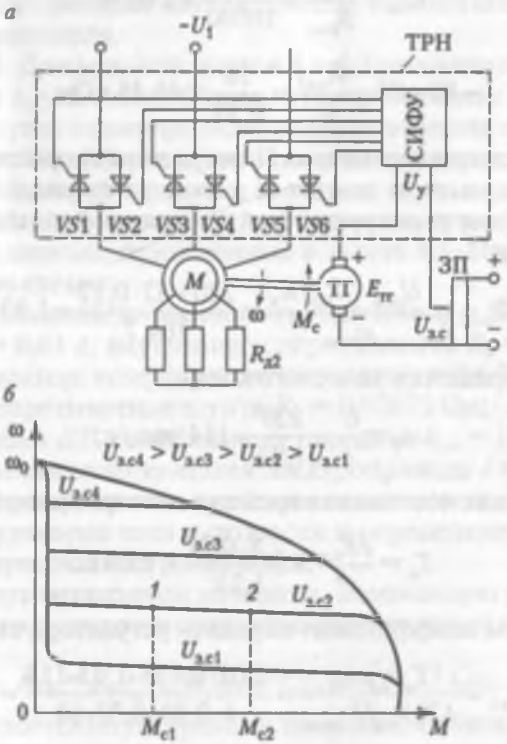


Рис. 4.8. Схема (*а*) и характеристики (*б*) замкнутой системы асинхронного электропривода с использованием тиристорного регулятора напряжения

рис. 3.15, образуют три пары встречно-параллельно соединенных тиристоров *VS1–VS6*. Управляющие электроды тиристоров подсоединены к выходам *СИФУ ТРН*, которая распределяет управляющие импульсы на все тиристоры и осуществляет их сдвиг в зависимости от входного сигнала управления U_y. К валу двигателя, который в этой схеме имеет фазный ротор, для реализации обратной связи по скорости подсоединен тахогенератор *ТГ*. Его ЭДС $E_{тг}$ сравнивается с задающим напряжением скорости $U_{зс}$, снимаемым с задающего потенциометра *ЗП*, причем эти напряжения действуют навстречу друг другу, а их разность образует сигнал управления

$$U_y = U_{зс} - E_{тг} = U_{зс} - \gamma\omega, \qquad (4.16)$$

который поступает на вход *СИФУ*. При увеличении этого сигнала угол управления тиристорами α уменьшается, подаваемое на двигатель напряжение увеличивается, и наоборот. Важно отметить, что при снижении скорости двигателя в цепи ротора увеличиваются потери мощности (потери скольжения), которые вызывают дополнительный нагрев двигателя, снижая экономичность работы электропривода. Для облегчения теплового режима двигателя при его работе на пониженных скоростях в цепь ротора двигателя включен добавочный резистор $R_{д2}$, наличие которого позволяет также расширить диапазон регулирования скорости.

Рассмотрим работу электропривода при изменении момента нагрузки M_c на валу двигателя и постоянном задании скорости $U_{зс2}$. Допустим, что в исходном положении двигатель работал в т. *1* при моменте нагрузки M_{c1} (рис. 4.8, *б*), а затем произошло его увеличение до значения M_{c2}.

При увеличении нагрузки на валу двигателя его скорость начнет снижаться, соответственно начнет уменьшаться и ЭДС тахогенератора $E_{тг}$. Уменьшение $E_{тг}$ вызывает согласно (4.16) увеличение напряжения управления U_y, что приведет к уменьшению угла управления тиристорами α и увеличению тем самым подаваемого на двигатель напряжения. Момент двигателя будет увеличиваться и в т. *2* сравняется с M_{c2}. Таким образом, увеличение момента нагрузки привело к небольшому снижению скорости двигателя, т.е., другими словами, его характеристики в схеме рис. 4.8, *а* стали жесткими.

При уменьшении момента нагрузки M_c будет автоматически снижаться напряжение на двигателе и тем самым поддерживаться его скорость вращения на заданном уровне.

Изменяя с помощью потенциометра *ЗП* значение задающего напряжения $U_{зс}$, можно получить ряд механических характерис-

тик электропривода с относительно высокой жесткостью и необходимой перегрузочной способностью двигателя.

Выражение (4.16) является исходным для получения формул для расчета параметров схемы на рис. 4.8, *а*. Используя уравнения связи выходного U_1 и входного управляющего U_y напряжений *ТРН*

PDF Compressor Free Version

$$U_1 = k_{т.р.н} U_y, \tag{4.17}$$

а также момента двигателя и приложенного к нему напряжения в относительной форме

$$M^* = \frac{M}{M_{ном}} = U_1^* = \frac{U_1}{U_{1ном}}, \tag{4.18}$$

получаем после последовательной подстановки (4.17) и (4.18) в (4.16) и несложных преобразований

$$\gamma = \frac{U_{1ном}(\sqrt{M_{c2}^*} - \sqrt{M_{c1}^*})}{k_{т.р.н}\Delta\omega}, \tag{4.19}$$

где перепад скорости $\Delta\omega$ соответствует изменению момента нагрузки в пределах $M_{c2} - M_{c1}$.

Если в схеме рис. 4.8, *а* используется усилитель сигнала U_y (пропорциональный регулятор скорости) с коэффициентом усиления k_y, то формула (4.19) принимает вид:

$$\gamma = \frac{U_{1ном}(\sqrt{M_{c2}^*} - \sqrt{M_{c1}^*})}{k_{т.р.н} k_y \Delta\omega}. \tag{4.20}$$

Замкнутая схема импульсного регулирования скорости АД с помощью резистора в цепи ротора. В схеме электропривода (рис. 4.9, *а*) с импульсным регулированием сопротивления в цепи выпрямленного тока ротора для получения жестких характеристик использована отрицательная обратная связь по скорости двигателя.

В роторную цепь двигателя включен неуправляемый трехфазный выпрямитель *В*, к выходу которого подключен резистор $R_{д2}$. Параллельно резистору включен управляемый ключ, выполняемый, как правило, на основе полупроводниковых приборов.

Управление ключом происходит от широтно-импульсного модулятора *ШИМ*, на вход которого поступают сигналы задания $U_{зс}$ и обратной связи $U_{ос}$ по скорости. При поступлении на вход блока *ШИМ* сигнала ошибки $U_y = U_{зс} - U_{ос}$ он начинает генерировать импульсы управления. Эти импульсы с помощью схемы управления ключом *СУК* распределяются по полупроводниковым прибо-

рам ключа и вызывают периодическое включение и закорачивание резистора $R_{д2}$.

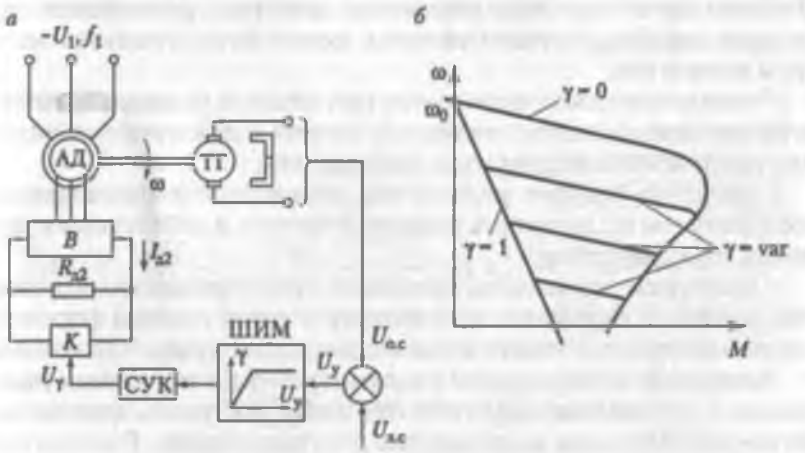


Рис. 4.9. Схема (*а*) и характеристики (*б*) замкнутой системы асинхронного электропривода с импульсным регулированием сопротивления в роторной цепи

Принцип получения жестких характеристик ЭП соответствует рассмотренному выше механизму действия обратной связи по скорости и состоит в следующем. Допустим, что двигатель работает в установившемся режиме при каком-то заполнении (скважности) ключа K и соответствующем эквивалентном сопротивлении цепи ротора. Пусть по каким-то причинам произошло увеличение момента нагрузки двигателя, в результате чего начнет снижаться его скорость. Тогда в соответствии с формулой (4.16) для сигнала управления U_y он начнет повышаться, что вызовет увеличение заполнения γ работы ключа K и уменьшение тем самым эквивалентного сопротивления в цепи ротора $R_{2\,экв} = (1-\gamma)R_{д2}$. Это, в свою очередь, приведет к увеличению тока в роторе и момента двигателя и прекращению снижения скорости, что соответствует жестким характеристикам электропривода, показанным на рис. 4.9, *б*. В схеме может быть достигнуто и регулирование (ограничение) тока и момента, для чего она должна быть дополнена контуром регулирования тока. В этом случае механические характеристики имеют вертикальный участок, соответствующий заданному уровню ограничения тока и момента.

Следует отметить, что работа этого электропривода, как и в случае использования *ТРН*, характеризуется при регулировании скорости двигателя увеличением в цепи ротора потерь мощнос-

ти, пропорциональных скольжению, что должно учитываться при выборе двигателя и добавочного резистора.

Замкнутые ЭП с использованием преобразователей частоты. В общем случае частотное управление двигателя, реализуемое с помощью преобразователей частоты, может быть осуществлено по трем вариантам:

PDF Compressor Free Version

- параметрическое управление, при котором управляющим воздействием на двигатель являются частота и действующее значение подаваемого на двигатель напряжения;
- частотно-токовое управление, при котором управляющим воздействием на двигатель являются частота и действующее значение тока двигателя;
- векторное управление, связанное с регулированием мгновенных значений питающих напряжений и токов с целью формирования электромагнитного момента двигателя нужной величины.

Замкнутый электропривод с параметрическим частотным управлением. С использованием этого принципа построены многие частотно-регулируемые асинхронные электроприводы. В них за счет использования различных обратных связей и функциональных блоков формируются жесткие рабочие участки механических характеристик двигателя для качественного регулирования его скорости, ограничиваются ток и момент и обеспечивается требуемое соотношение между регулируемыми частотой и напряжением. Обобщенная схема [27] такого электропривода представлена на рис. 4.10, *а*.

В качестве силового преобразователя используется преобразователь частоты со звеном постоянного тока, состоящий из неуправляемого выпрямителя *В* и инвертора напряжения, выполненного на шести силовых модулях, состоящих из транзистора и диода. Между выпрямителем и инвертором включен фильтр, состоящий из реактора *L* и конденсатора *С*, обеспечивающий сглаживание выходного напряжения выпрямителя и необходимую циркуляцию реактивной энергии в силовой части схемы.

Инвертор работает в режиме широтно-импульсной модуляции и преобразует нерегулируемое напряжение постоянного тока на выходе фильтра в регулируемое по частоте и амплитуде напряжение на статоре двигателя *М*. Силовая схема электропривода нереверсивная и не предусматривает электрического торможения.

Управление инвертором осуществляется сигналами f_y и U_y, определяющими значения выходных частоты и напряжения преобразователя частоты. Формирование этих сигналов осуществляется схемой управления, в состав которой входят регулятор скорости *РС*, регулятор тока *РТ*, датчики скорости *ТГ* и тока *ДТ*, суммирующие усилители (пропорциональные регуляторы) Σ_1 и Σ_2;

блок ограничения *БО* сигнала *РС*, функциональный преобразователь *ФП*, задатчик интенсивности *ЗИ*.

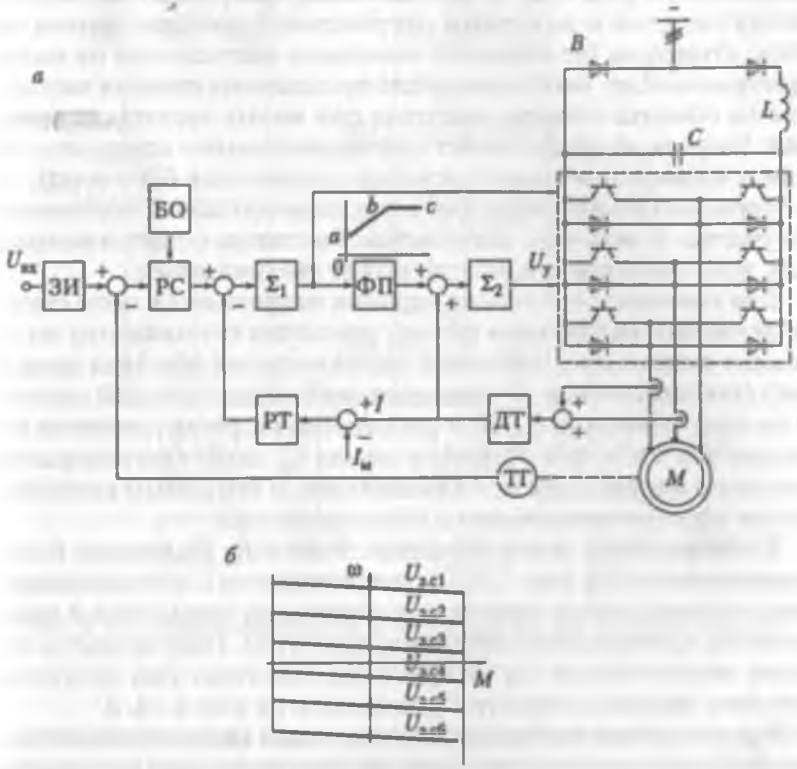


Рис. 4.10. Схема (*а*) и характеристики (*б*) асинхронного электропривода при частотном управлении

Регулятор скорости *РС* в совокупности с задатчиком интенсивности *ЗИ* и сумматором Σ_1 обеспечивают требуемое регулирование скорости и ускорения двигателя в установившемся и переходных режимах работы электропривода с помощью сигнала f_y.

Ограничение тока статора и момента двигателя производится регулятором тока *РТ*: когда ток статора двигателя меньше тока уставки $I_м$, сигнал на выходе *РТ* равен нулю и схема управления обеспечивает режим поддержания заданной скорости. Когда ток статора превысит уставку тока $I_м$, резко увеличивается сигнал на выходе *РТ*, из-за чего резко снижается и сигнал на выходе сумматора Σ_1. Это приводит к уменьшению частоты и напряжения на статоре двигателя и тем самым к ограничению тока статора и момента двигателя.

Функциональный преобразователь *ФП*, характеристика которого в виде ломаной линии 0*abc* показана над его условным изображением на рис. 4.10, *а*, обеспечивает требуемое соотношение между частотой и выходным напряжением преобразователя частоты. Отрезком 0*а* создается начальное напряжение на выходе преобразователя, необходимое для преодоления падения напряжения на обмотке статора двигателя при малых частотах напряжения. Участок *ab* обеспечивает пропорциональное изменение частоты и напряжения (закон частотного управления $U/f = \text{const}$), при котором магнитный поток двигателя поддерживается постоянным. На участке *bc* величина напряжения на статоре остается неизменной, хотя при этом его частота может увеличиваться.

PDF Compressor Free Version

Для уменьшения влияния падения напряжения в цепи статора на величину магнитного потока двигателя и тем самым на его момент в схеме предусмотрена положительная обратная связь по току (так называемая *IR*-компенсация), сигнал которой поступает на вход сумматора Σ_2. При увеличении нагрузки двигателя возрастает его ток и увеличивается сигнал U_y, за счет чего возрастает выходное напряжение преобразователя, и тем самым компенсируется падение напряжения в обмотке статора.

В современных электроприводах этого типа реализация блоков управления схемы рис. 4.10, *а* осуществляется с использованием микропроцессорных средств, а настройка их параметров и характеристик производится программным путем. Получаемые в этой схеме механические характеристики двигателя при различных сигналах задания скорости $U_{зс}$ показаны на рис. 4.10, *б*.

В ряде случаев требуемое регулирование скорости может быть получено и в разомкнутой схеме без обратной связи по скорости. В этом случае в схеме отсутствуют *РС* и *ТГ*, а сигнал с выхода *ЗИ* непосредственно поступает на вход сумматора Σ_1; во всем остальном схема остается без изменения.

Схема частотно-токового управления АД. Схема электропривода представлена на рис. 4.11. Тиристоры *VS1—VS6* образуют схему управляемого выпрямителя *УВ*, а тиристоры *VS7—VS12* — схему автономного инвертора тока *АИТ*. Между этими блоками включен реактор *L* большой индуктивности с тем, чтобы придать инвертору свойства источника тока. Конденсаторы *С1—С6* с диодами *VD1—VD6* образуют цепи искусственной коммутации тиристоров *VS7—VS12*. Остальные элементы схемы имеют следующее назначение: *СУВ* и *СУИ* — схемы управления тиристорами выпрямителя и инвертора; *РТ*, *ДТ* — соответственно регулятор и датчик тока статора; *ДС* — датчик скорости; *УО* — усилитель-ограничитель; *ФП* — функциональный преобразователь. Схема работает следующим образом.

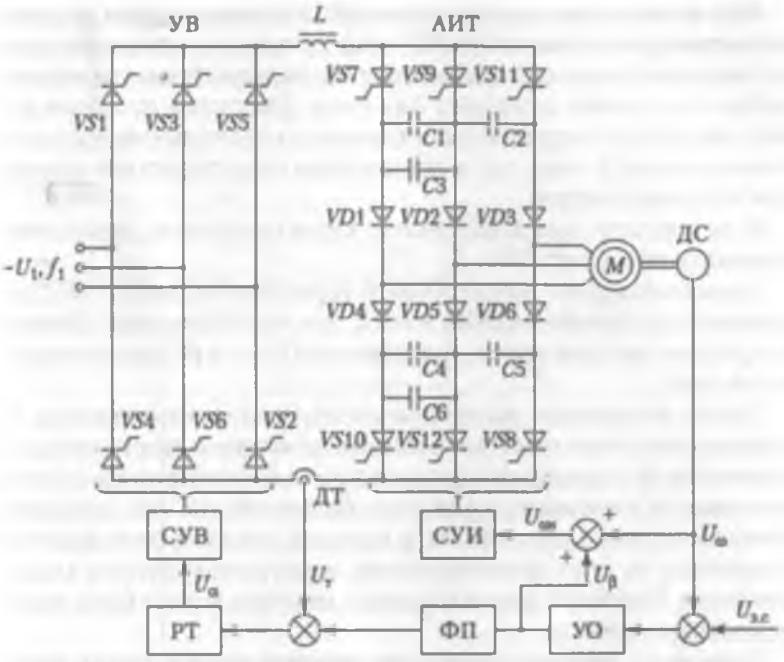


Рис. 4.11. Схема асинхронного электропривода при частотно-токовом управлении

Задающий сигнал $U_{з.с}$ задает частоту переключения тиристоров инвертора и тем самым частоту тока статора двигателя *М*. После вычитания из сигнала $U_{з.с}$ сигнала обратной связи по скорости $U_{ос}$ получается сигнал U_{β}, пропорциональный относительной частоте ротора $\beta = f_2/f_{1ном}$ (величину β называют также абсолютным скольжением двигателя). Она связана со скольжением *s* двигателя следующим соотношением: $\beta = \alpha s$, где $\alpha = f_1/f_{1ном}$.

Сигнал U_{β}, пройдя через *УО*, вместе с сигналом $U_{ос}$ поступает на вход *СУИ*. Частота на выходе инвертора определяется сигналом $U_{\alpha и} = U_{ос} + U_{\beta}$; *СУИ* настроена таким образом, что пока *УО* работает в линейной зоне, частота на выходе инвертора будет постоянной и независимой от нагрузки. Двигатель при этом имеет жесткие механические характеристики.

Сигнал U_{β} после прохождения через *ФП* является также сигналом для контура регулирования тока. Так как этот сигнал пропорционален абсолютному скольжению, то и ток двигателя при всех частотах будет ему пропорционален.

При резких изменениях задающего сигнала или при значительных перегрузках двигателя *УО* входит в зону ограничения (постоянства) своего выходного сигнала $U_в$, ограничивая тем самым на требуемом уровне и задание для тока. Двигатель при этом работает при любой скорости с постоянными значениями абсолютного скольжения и тока, т.е. механическая характеристика становится абсолютно мягкой.

PDF Compressor Free Version

В результате двигатель имеет характеристики, аналогичные показанным на рис. 4.10, *б*.

Схема позволяет осуществлять торможение двигателя с рекуперацией (отдачей) энергии в сеть, для чего инвертор переводится в режим выпрямления, и выпрямитель — в режим инвертирования тока.

Схемы векторного управления асинхронными двигателями. При необходимости получения высокого качества и диапазонов регулирования переменных асинхронного электропривода в установившемся и переходных режимах применяются так называемые схемы векторного управления, в которых решение этих задач обеспечивается за счет формирования электромагнитного момента двигателя. Принцип формирования момента может быть показан следующим образом.

Уравнение электромагнитного момента асинхронного двигателя может иметь различные формы записи в зависимости от используемых в этих уравнениях переменных и выбранной системы координат для их представления. При построении систем векторного управления процессы в двигателе удобно рассматривать в системе координат X–Y, в которой ось X совпадает по направлению с потокосцеплением ротора Ψ_2 и вращается с его скоростью. В этом случае уравнение электромагнитного момента трехфазного асинхронного двигателя имеет вид:

$$M = \frac{3pL_{12}\Psi_2 i_{1y}}{2L_2}, \qquad (4.21)$$

где p — число пар полюсов двигателя; L_{12} — взаимоиндуктивность между статором и ротором; i_{1y} — составляющая тока статора по оси Y; L_2 — полная индуктивность ротора.

Так как составляющая тока статора i_{1x} по оси X определяет потокосцепление ротора Ψ_2, то из рассмотрения формулы (4.21) следует, что за счет регулирования i_{1x} и i_{1y} можно обеспечивать формирование момента двигателя. Составляющая i_{1x} может рассматриваться как намагничивающая реактивная составляющая тока статора двигателя, а i_{1y} его активная составляющая, идущая на создание момента двигателя.

Отметим, что уравнение (4.21) по своему виду аналогично формуле момента двигателя постоянного тока. В нем Ψ_2 отражает магнитный поток двигателя постоянного тока, а i_{1y} — ток его якоря.

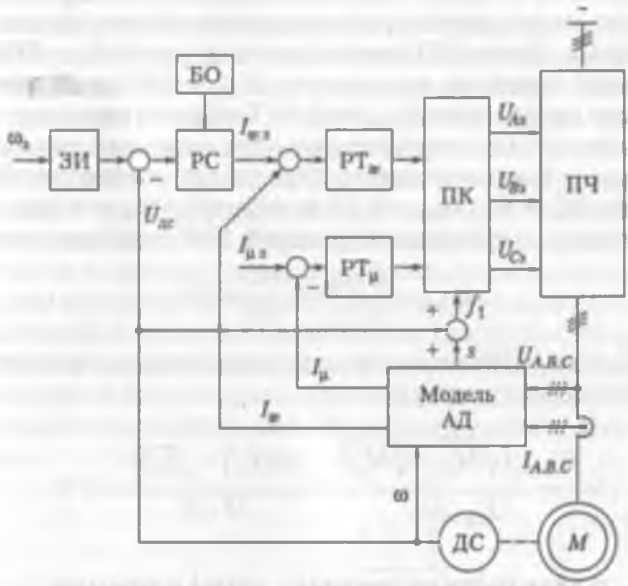


Рис. 4.12. Схема асинхронного электропривода при частотном векторном управлении

Принцип построения схемы векторного управления иллюстрирует рис. 4.12 из [27]. Асинхронный двигатель *М*, на валу которого установлен датчик скорости (тахогенератор) *ДС*, получает питание от преобразователя частоты *ПЧ*. Регулирование момента производится регуляторами PT_w активной I_w и PT_μ реактивной I_μ составляющих тока. Значения этих переменных получаются косвенным путем с помощью модели асинхронного двигателя «Модель АД», на вход которой подаются сигналы фазных токов I_A, I_B, I_C, напряжений U_A, U_B, U_C и угловой скорости двигателя ω. Модель двигателя выдает информацию о скольжении двигателя s и составляющих токов I_w и I_μ.

Регулирование скорости производится по принципу подчиненного регулирования координат с использованием ПИ-регулятора скорости *РС*, задатчика интенсивности *ЗИ* и блока токоограничения *БО*. Управление *ПЧ* осуществляется системой трехфазных напряжений $U_{Aз}$, $U_{Bз}$, $U_{Cз}$, которые формируются преобразователем координат *ПК* на основе сигналов регуляторов PT_w и PT_μ и сигнала, пропорционального частоте f_1.

Векторное регулирование момента асинхронного двигателя обеспечивает его точное поддержание во всем диапазоне регулирования скорости, включая режимы работы электропривода на упор и его очень низкие «ползучие» скорости, что выгодно отличает его от параметрического (скалярного) регулирования.

PDF Compressor Free Version

Пример 4.2. Схема ЭП представлена на рис. 4.8, *а*; *ТРН* имеет номинальное выходное напряжение $U_{1ном} = 380$ В и номинальное напряжение управления $U_{у.ном} = 10$ В. Требуется рассчитать коэффициент передачи тахогенератора γ, при котором перепад скорости $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ будет составлять 20 рад/с при изменении момента нагрузки от $M_{c1}^* = M_{c1}/M_{ном} = 0{,}25$ до $M_{c2}^* = M_{c2}/M_{ном} = 1$ (рис. 4.8, *б*).

Определяем коэффициент передачи *ТРН* по напряжению:

$$k_{т.р.н} = \frac{U_{1ном}}{U_{у.ном}} = \frac{380}{10} = 38.$$

По формуле (4.20) находим требуемое значение коэффициента передачи тахогенератора:

$$\gamma = \frac{U_{1ном}(\sqrt{M_{c2}^*} - \sqrt{M_{c1}^*})}{k_{т.р.н}\Delta\omega} = \frac{380(\sqrt{1} - \sqrt{0{,}5})}{38 \cdot 20} = 0{,}25.$$

4.4. ЗАМКНУТЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Электропривод с вентильным двигателем. Вентильным двигателем (ВД) называется синхронный двигатель с электронным коммутатором напряжения, к которому подключена обмотка статора двигателя, и датчиком положения ротора, установленным на валу двигателя и управляющего работой коммутатора в зависимости от положения ротора. Датчик положения ротора генерирует периодические сигналы, по которым открываются и закрываются полупроводниковые ключи коммутатора, подключающего к источнику питания обмотки статора. В результате этого сохраняется необходимое взаимное направление магнитного поля двигателя и тока в обмотках и двигатель развивает постоянный по направлению вращающий момент при любой скорости вращения.

Тем самым ВД по принципу своего действия аналогичен двигателю постоянного тока, но при этом у него нет механического коллекторно-щеточного узла, и поэтому он является полностью бесконтактным двигателем при возбуждении от постоянных магнитов или имеет два контактных кольца при использовании об-

мотки возбуждения. Совпадение принципов действия двигателя постоянного тока и ВД определяет схожесть их механических характеристик, вследствие чего ВД иногда называют бесконтактным двигателем постоянного тока.

Двигатели с возбуждением от постоянных магнитов выполняются на мощности до 30 кВт обычно в многополюсном исполнении. Двигатели с постоянными магнитами имеют меньшие габаритные размеры и массу и более высокий КПД по сравнению с двигателями, имеющими обмотку возбуждения.

В ВД средней и большой мощности обычно используются синхронные двигатели обычной конструкции с обмоткой возбуждения, расположенной на роторе. Перспективным направлением развития ВД является получение сигнала по положению ротора двигателя косвенным путем, без установки датчика положения на валу.

Коммутатор в схеме ВД представляет собой инвертор, если ВД питается от источника постоянного тока (сети постоянного тока, аккумуляторной батареи выпрямителя), или является, по существу, преобразователем частоты, если ВД подключается к сети переменного тока.

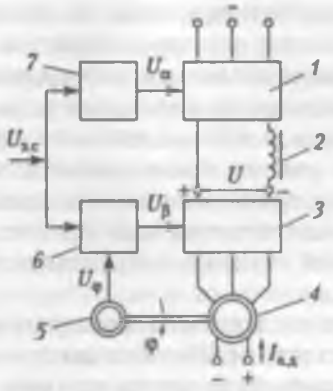


Рис. 4.13. Схема вентильного двигателя

Схема ВД приведена на рис. 4.13. Силовой преобразователь включает в себя выпрямитель *1*, инвертор *3* и реактор *2*, включенный между выпрямителем и инвертором и выполняющий роль фильтра. На валу двигателя *4* расположен датчик положения ротора *5*, который обеспечивает посредством сигнала U_φ требуемую коммутацию вентилей инвертора *3*. Управление вентилями инвертора и выпрямителя осуществляется сигналами управления U_β и U_α, поступающими с блоков управления *6* и *7*.

Регулирование скорости вентильного двигателя может производиться за счет изменения величины напряжения и тока возбуждения $I_{в.д}$. Уровень скорости ВД определяется задающим сигналом $U_{з.с}$.

PDF Compressor Free Version

Для получения высокого качества регулирования координат в статических и динамических режимах в электроприводах с ВД используются различные обратные связи.

В последнее время в ВД мощностью от 30 до 200 кВт стали использоваться бесконтактные синхронные двигатели с обмоткой возбуждения, специальным образом располагаемой на статоре вместе с трехфазной обмоткой. Ротор в этом случае представляет собой безобмоточное зубчатое колесо (зубчатку), через зубцы которого замыкается магнитный поток, создаваемый обмотками возбуждения и переменного тока. Ротор вращается синхронно с вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазной обмоткой. Обмотка возбуждения усиливает магнитный поток и тем самым увеличивает вращающий момент двигателя.

Электропривод с шаговым двигателем. Исполнительные органы некоторых рабочих машин и механизмов должны совершать строго дозированные перемещения с фиксацией своего положения в конце движения. В электроприводах таких машин и механизмов успешно применяются шаговые двигатели (ШД) различных типов, образующие основу дискретного электропривода. Дискретный электропривод используется для металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением (ЧПУ), роботов и манипуляторов, в гибком автоматизированном производстве, электронной и часовой промышленности, газорезательных и сварочных автоматах, приборах времени, нажимных устройствах прокатных станов, лентопротяжных и регистрирующих устройствах, в медицинской технике, в производстве элементов микроэлектроники и т.д.

Распространение дискретного электропривода определяется еще и тем, что он естественным образом сочетается с микропроцессорными средствами управления, которые все шире применяются во всех отраслях техники.

Электропривод с ШД в настоящее время используется на мощности от долей ватта до нескольких киловатт, что определяется мощностью серийно выпускаемых ШД. Расширение шкалы мощности дискретного ЭП может быть достигнуто использованием в нем серийных АД, которые за счет соответствующего управления могут работать в шаговом режиме.

Шаговый двигатель по принципу своего действия является синхронным двигателем. Однако в отличие от последнего магнитное поле ШД перемещается (вращается) не непрерывно, а дискретно, шагами.

Это достигается за счет импульсного возбуждения обмоток ШД с помощью электронного коммутатора, который преобразует одноканальную последовательность управляющих импульсов в многофазную систему напряжений, прикладываемых к обмоткам (фазам) ШД.

Дискретному характеру напряжения на фазах ШД соответствует дискретное вращение (перемещение) электромагнитного поля в воздушном зазоре, вследствие чего движение ротора состоит из последовательных элементарных поворотов, или шагов.

Угловое перемещение α ШД в общем случае определяется выражением $\alpha = 2\pi/(pn)$, где p — число пар полюсов ротора; n — число переключений (тактов) в цикле, равное числу фаз ШД при симметричной и удвоенному числу фаз при несимметричной коммутации.

Как видно, шаговое перемещение ротора соответствует последовательности управляющих импульсов, при этом каждому импульсу соответствует одно переключение обмотки ШД (один такт коммутации) и один шаг ротора. Суммарный угол поворота ШД пропорционален числу импульсов, а его скорость — частоте коммутации обмоток $f_к$: $\omega = \alpha f_к$.

Для реверса ШД при симметричной схеме коммутации необходимо изменить полярность напряжения обмотки, которая была отключена на данном такте коммутации. Тогда ротор ШД совершит шаг в противоположном направлении.

Основным режимом работы шагового привода является динамический. В отличие от обычного синхронного двигателя ШД рассчитаны на вхождение в синхронизм из состояния покоя и принудительное электрическое торможение. Благодаря этому в шаговом электроприводе обеспечивается пуск, торможение, реверс и переход с одной частоты управляющих импульсов на другую. Пуск ШД осуществляется скачкообразным или постепенным увеличением частоты входного сигнала от нуля до рабочей, торможение — снижением ее до нуля, а реверс — изменением последовательности коммутации обмоток ШД.

Обеспечение заданного характера переходных процессов является для электропривода с ШД основной и наиболее сложной задачей, так как вследствие электромагнитной инерции обмоток ШД, механической инерции его ротора и момента нагрузки на валу при резких изменениях частоты следования импульсов управления ротор ШД может не успеть отработать полностью все импульсы. Максимальная частота управляющих импульсов, при которой возможен пуск ШД из неподвижного состояния без выпадения из синхронизма (пропуска шагов), называется частотой приемистости. Чем выше электромагнитная и механическая инерция ШД и больше момент его нагрузки, тем меньше частота приемистости.

Современные ШД различны по конструктивному исполнению. В зависимости от числа фаз и устройства магнитной системы ШД бывают одно-, двух- и многофазными с активным или пассивным ротором.

PDF Compressor Free Version

Развитие дискретного электропривода привело к созданию специальных видов ШД — линейных, волновых, с малоинерционным и катящимся роторами.

На базе цилиндрических линейных ШД созданы двухкоординатные линейно-поворотные ШД, суммирующие на своем валу два независимых движения — вращательное и поступательное.

Важным достижением в области дискретного электропривода является создание так называемых многокоординатных ШД, осуществляющих перемещение исполнительных органов по трем координатам в пространстве. Двигатели такого рода, отличаясь высокой точностью позиционирования и скоростью, используются в приводах манипуляторов, роботов и автоматических линиях станков.

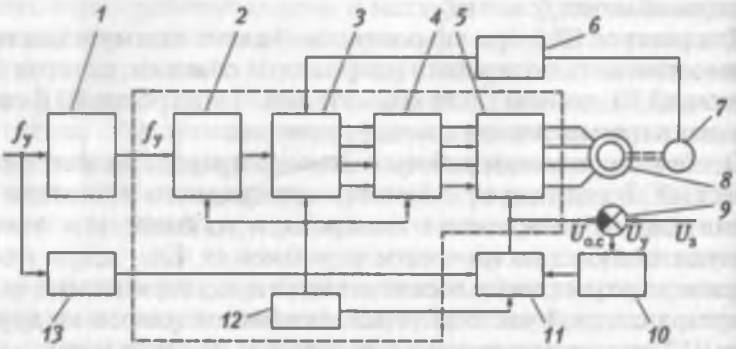


Рис. 4.14. Схема электропривода с шаговым двигателем

Обобщенная функциональная схема регулируемого электропривода с ШД показана на рис. 4.14. Основная ее часть, обычно называемая разомкнутой схемой, выделена штриховой линией.

Сигнал управления f_y в виде импульсов напряжения поступает на вход блока *2* от программного или другого внешнего командного устройства. Блок *2* видоизменяет эти импульсы, формируя их по длительности и амплитуде, как необходимо для нормальной работы последующих блоков схемы управления. Распределитель импульсов *3* преобразует последовательность сформированных импульсов, например, в четырехфазную систему однополярных импульсов напряжения, соответствующую числу фаз (обмоток) двигателя.

Импульсы с выхода распределителя *3* усиливаются с помощью промежуточного усилителя *4* и поступают на коммутатор 5, питающий обмотки ШД *8*. Обычно коммутатор питается от источника *12* постоянного тока (выпрямителя) и обеспечивает в обмотках ШД пульсирующий ток одного направления.

Рассмотренная разомкнутая схема управления ШД не всегда обеспечивает высокие динамические свойства, точность и энергетические показатели электропривода. Поэтому современные схемы управления ШД содержат дополнительные узлы, с помощью которых характеристики электропривода улучшаются. К таким узлам (рис. 4.14) относятся частотно-импульсный регулятор напряжения *11*, усилитель обратной связи по току *10*, блок электронного дробления шага *13*, блок плавного разгона и торможения (задатчик интенсивности) *1*, датчик положения ротора и скорости *7* и цифровой регулятор *6*.

Регулятор *11* и усилитель *10*, связанные с узлом сравнения *9*, служат для автоматической стабилизации тока в обмотках ШД и поддержания момента ШД, что существенно улучшает энергетические показатели его работы. Стабилизация тока осуществляется введением отрицательной обратной связи по току, с помощью которой за счет регулирования частоты переключения регулятора *11* (частотно-импульсная модуляция) изменяется среднее значение напряжения питания и тем самым регулируется ток в обмотках ШД.

Та же задача формирования тока в обмотках ШД решается при использовании коммутатора *5*, обладающего свойствами источника тока. В этом случае отпадает надобность в обратной связи по току и блоках *10* и *11*.

Для улучшения качества движения ШД при низких частотах и повышения точности отработки входных импульсов управления с помощью блока *13* уменьшается единичный шаг ШД.

Улучшение динамических свойств дискретного ШД, в частности увеличение диапазона рабочих частот входного сигнала, значительно превышающих частоту приемистости ШД, может быть достигнуто введением в схему блока *1*, обеспечивающего разгон и торможение ШД с заданным темпом, при котором еще не происходит пропуска управляющих импульсов. При использовании блока *1* область рабочих частот шагового электропривода может быть увеличена в 2–3 раза.

Возможности дискретного электропривода расширяются при создании замкнутых схем управления, выполняемых с помощью датчика *7* и регулятора *6*. В таком дискретном приводе информация о действительном положении вала и скорости ШД поступает на вход цифрового регулятора *6*, который обеспечивает заданный характер движения привода.

Перспективы дальнейшего развития электропривода с ШД связаны с использованием микропроцессорных средств управления. В этом случае функции всех показанных на рис. 4.14 блоков управления, за исключением силового коммутатора, датчиков скорости и положения, выполняет микропроцессор по соответствующей программе.

PDF Compressor Free Version

Схема вентильно-индукторного электропривода. Простота, технологичность и дешевизна индукторных электродвигателей определили разработку и применение для ряда рабочих машин и механизмов так называемого вентильно-индукторного электропривода (ВИП). Такой электропривод характеризуется широкими регулировочными возможностями и может иметь мощности от единиц до нескольких сотен киловатт и более.

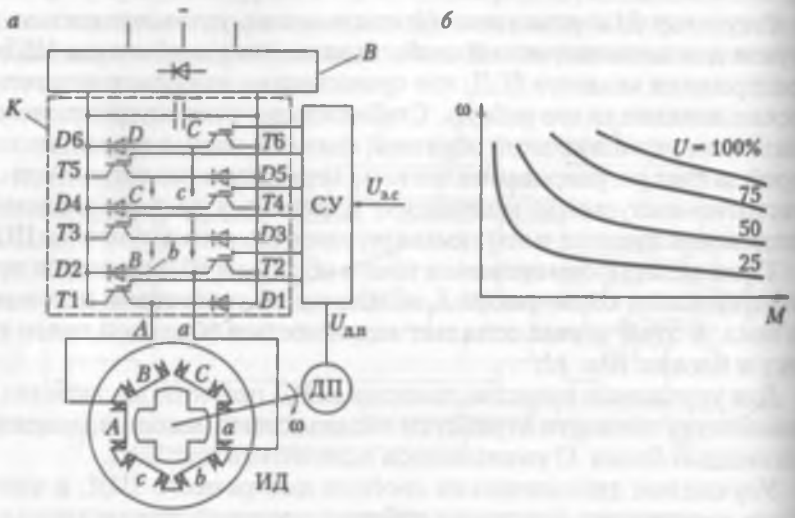


Рис. 4.15. Схема (*а*) и характеристики (*б*) вентильно-индукторного электропривода

Структурная схема силовой части ВИП в случае питания его от трехфазной сети переменного тока представлена на рис. 4.15, *а*. В ее состав входят индукторный двигатель *ИД*, электронный коммутатор *К* с выпрямителем *В*, датчик положения *ДП* ротора двигателя и система управления *СУ* ВИП. Особенность ВИП состоит в применении индукторного двигателя с неодинаковым количеством полюсов статора и зубцов ротора, лежащим обычно в пределах 4–12. На рисунке в качестве примера показан трехфазный двигатель, имеющий *6* полюсов статора и *4* зубца на роторе.

На полюсах статора *ИД* расположены четыре обмотки *A-a*, *B-b*, *C-c*, подключенные к электронному коммутатору, выполняемому обычно на силовых транзисторах того или иного типа. В схеме рис. 4.15, *а* в качестве управляемых ключей коммутатора используются силовые биполярные транзисторы *T1—T6* с изолированным затвором типа IGBT. Управление ключами осуществляет схема управления *СУ*, обеспечивающая подачу на них импульсов управления с необходимыми последовательностью и частотой, которые определяются сигналами задания скорости $U_{зс}$ и датчика положения $U_{д.п}$.

Принцип действия ВИП состоит в следующем. При подаче импульсов управления на пару транзисторов (ключей) одной фазы коммутатор подключает обмотку этой фазы двигателя к выходу выпрямителя *В*. По обмотке начинает протекать ток, создающий в двигателе магнитное поле. Это магнитное поле вызовет появление электромагнитных сил притяжения между полюсами статора и ближайшими к ним зубцами ротора, которые создадут вращающий момент на валу двигателя. Под его действием ротор переместится в согласованное положение, в котором оси возбужденных полюсов статора и ближайших к ним зубцов ротора будут совпадать.

Так как число полюсов статора и зубцов ротора различно, то в согласованном положении ротора для работающей фазы следующая фаза оказывается в рассогласованном положении и подготовлена к очередному подключению к источнику питания. Требуемая последовательность подключения фаз двигателя к источнику питания, при которой на его валу обеспечивается постоянное направление вращающего момента, осуществляется с помощью находящегося на валу датчика положения.

Скорость вращения ротора определяется следующей формулой:

$$\omega = \frac{2\pi f_к}{mn}, \qquad (4.22)$$

где $f_к$ — частота коммутации обмоток; m — число фаз двигателя; n — число зубцов ротора.

Эта формула показывает возможности выполнения ВИП на различные скорости. При высокой частоте коммутации обмоток могут быть реализованы *ИД* на большие скорости вращения, а выполнение их с большим числом полюсов статора и зубцов ротора позволяет получить низкие скорости ВИП. При низких скоростях *ИД* из кинематической схемы ВИП могут быть исключены редукторы.

Механические характеристики в разомкнутой структуре ВИП при различных напряжениях питания U показаны на рис. 4.15, *б*. При помощи различных обратных связей могут быть сформиро-

ваны характеристики, обеспечивающие регулирование координат электропривода с требуемым качеством. В ВИП может быть реализован и тормозной режим работы, осуществляемый за счет выбора моментов включения и отключения обмоток двигателя.

PDF Compressor Free Version

Показанные на схеме рис. 4.15, *а* диоды *D1–D6* служат для обеспечения возможности циркуляции электромагнитной мощности в электроприводе при отключении силовых транзисторов, а конденсатор *С* играет роль фильтра на выходе выпрямителя.

В современных схемах ВИП широко используются микропроцессорные средства управления. При их использовании в ряде случаев оказывается возможным отказаться от применения в электроприводе датчика положения, а необходимую для его работы информацию о положении ротора получить косвенным путем. Это позволяет упростить кинематическую схему ВИП и сделать его тем самым более простым и надежным.

Схема автоматического регулирования тока возбуждения синхронного двигателя. Синхронные двигатели (СД) за счет регулирования своего тока возбуждения могут изменять уровень циркулирующей между ним и сетью реактивной мощности, работая, в частности, как компенсаторы реактивной мощности. Кроме этого, с помощью регулирования тока возбуждения можно снижать потери энергии в двигателе и элементах системы электроснабжения, поддерживать напряжение питающей сети или коэффициент мощности СД. Такие схемы получили название схем автоматического регулирования возбуждения (АРВ).

На рис. 4.16 в качестве примера приведена схема АРВ СД. Она построена по принципу подчиненного регулирования координат и обеспечивает регулирование трех переменных: тока возбуждения, напряжения двигателя и реактивной составляющей тока статора СД.

Первый и второй контуры обеспечивают регулирование тока возбуждения с помощью регулятора возбуждения *РТВ*. Сигнал на входе *РТВ* формируется из сигналов задания тока возбуждения, поступающего с регулятора задания тока возбуждения *РЗТВ*, текущего значения тока возбуждения $I_в$, поступающего с датчика тока возбуждения *ДТВ*, и уставки минимального тока $I_{в\,min}$. Выходной сигнал *РТВ* с помощью *СИФУ* воздействует на тиристорный возбудитель *ТВ*, который и обеспечивает требуемое регулирование $I_в$.

На вход *РЗТВ* (второй контур регулирования) поступают сигналы, пропорциональные квадрату активной составляющей тока статора $I_а$ (канал: квадратичный преобразователь *ПК* — формирующий усилитель *УФ*), производной активного тока (канал: датчик активного тока *ДАТ* — дифференциальный преобразователь *ДП*) и реактивной составляющей тока с регулятора реактивного тока *РРТ*.

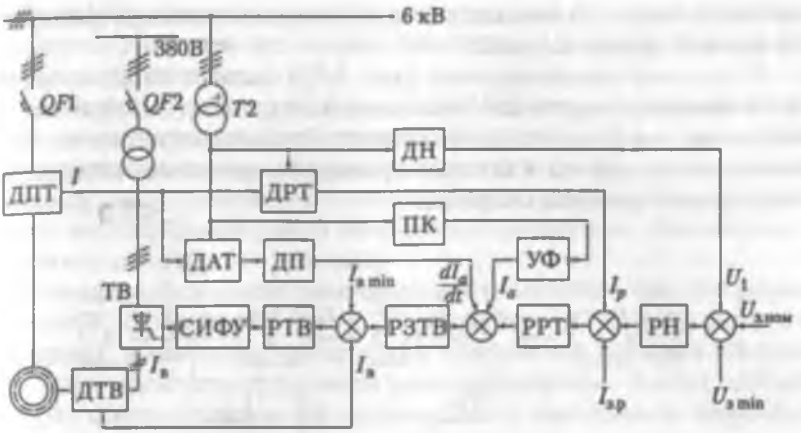


Рис. 4.16. Замкнутая схема автоматического регулирования тока возбуждения синхронного двигателя

Регулятор *РРТ* входит в третий контур — регулирования реактивной составляющей тока $I_р$. На его входе суммируются сигналы обратной связи по реактивной составляющей тока (датчик реактивного тока *ДРТ*) и два сигнала задания — от регулятора напряжения *РН* и сигнала задания уровня реактивного тока $I_{з.р}$.

На входе *РН* (четвертый контур регулирования) суммируются сигналы обратной связи по напряжению U_1 (датчик напряжения *ДН*) и два задающих сигнала — номинального $U_{з.ном}$ и минимального $U_{з\,min}$ напряжений. Контур регулирования напряжения обеспечивает также форсировку возбуждения *СД* при снижении напряжения в питающей сети до 0,8–0,85 номинального за счет наличия в схеме специального узла форсировки возбуждения.

4.5. СЛЕДЯЩИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ

Следящим называется электропривод, который обеспечивает (воспроизводит) с заданной точностью движение исполнительного органа рабочей машины в соответствии с произвольно изменяющимся входным сигналом управления. Этот сигнал может изменяться в широких пределах по произвольному временному закону и иметь механическую или электрическую природу. Чаще всего входной сигнал представляет собой скорость или угол поворота оси или вала задающего устройства. Следящий электропривод применяется для антенн радиотелескопов и систем спутниковой связи, в металлообрабатывающих станках, для привода роботов и

манипуляторов, в автоматических измерительных устройствах и во многих других случаях.

Следящий электропривод (рис. 4.17) состоит из датчика входного сигнала *1* и датчика *5* выходной координаты, измерителя рассогласования *2*, системы управления *3* и электродвигателя с механической передачей *4*, которая приводит в движение исполнительный орган *6* рабочей машины.

PDF Compressor Free Version

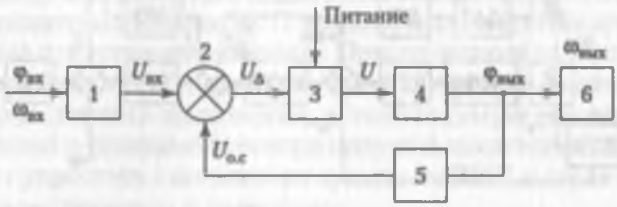


Рис. 4.17. Схема следящего электропривода

Датчики входной и выходной величин преобразуют механические величины (скорость или угол поворота вала) в электрические — входной сигнал $U_{вх}$ и сигнал обратной связи $U_{о.с}$. Измеритель рассогласования *2*, алгебраически суммируя эти сигналы, вырабатывает сигнал рассогласования U_{Δ}, поступающий в систему управления *3*. Следящий электропривод по своей структуре представляет собой замкнутую систему, действующую по принципу отклонения.

Система управления *3* состоит из регулятора (усилителя) и силового преобразователя, которые обеспечивают необходимое преобразование сигнала рассогласования U_{Δ} в напряжение U, поступающее на двигатель. За счет выбора схем регулятора и преобразователя или введения корректирующих устройств обеспечивается необходимый закон изменения этого напряжения во времени $U(t)$ при отработке входного воздействия $\omega_{вх}(t)$ или $\varphi_{вх}(t)$.

Электродвигатель и механическая передача *4* в соответствии с законом изменения $U(t)$ обеспечивают перемещение исполнительного органа *6*. Иногда двигатель с механической передачей называют исполнительным механизмом (сервомеханизмом).

Классификация следящего электропривода может быть выполнена по нескольким признакам. Если следящий электропривод предназначен для воспроизведения с заданной точностью скорости движения исполнительного органа, он называется скоростным, а если положения — то позиционным.

Различают следящие электроприводы с непрерывным и прерывным управлением; последние, в свою очередь, делятся на релейные и импульсные.

В *следящих электроприводах непрерывного действия* напряжение, пропорциональное сигналу рассогласования, постоянно подается на двигатель.

Следящий электропривод релейного действия характеризуется тем, что напряжение на двигатель подается только в том случае, когда сигнал рассогласования достигает определенного значения. Поэтому работа релейного следящего электропривода характеризуется определенной зоной нечувствительности по отношению к входному сигналу.

Импульсный следящий электропривод отличается тем, что управляющее воздействие на двигатель подается в виде импульсов напряжения, амплитуда, частота или заполнение которых изменяется в зависимости от сигнала рассогласования. В этих случаях говорят соответственно об амплитудно-, частотно- и широтно-импульсной модуляции сигнала управления.

В следящем электроприводе используются двигатели переменного и постоянного тока, различные виды усилителей (электромашинные, магнитные, полупроводниковые, пневматические, гидравлические), датчики скорости и положения и другие аналоговые и цифровые устройства управления.

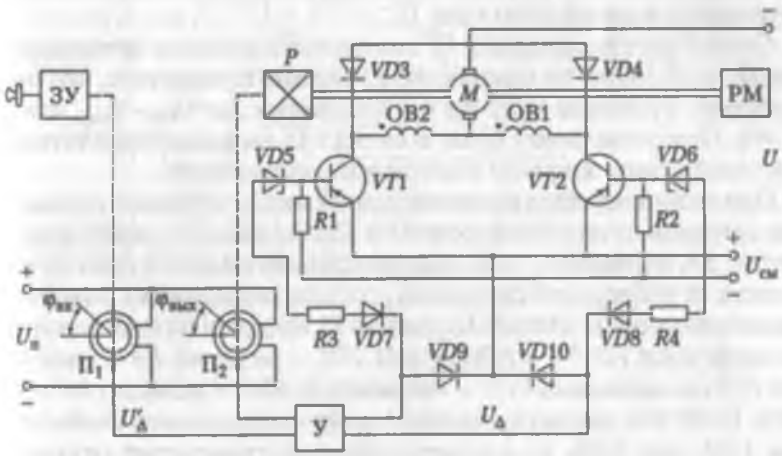


Рис. 4.18. Схема следящего электропривода с двигателем постоянного тока релейного действия

Следящий электропривод постоянного тока релейного действия. В этой схеме электропривода (рис. 4.18) используется двигатель постоянного тока последовательного возбуждения *М*, имеющий две обмотки возбуждения *ОВ1* и *ОВ2*. Управление двигателем осуще-

ствляется с помощью силовых транзисторов *VT1* и *VT2*. Каждый из транзисторов работает при определенной полярности сигнала согласования U_{Δ}, обеспечивая одно из направлений вращения двигателя. Если открыт транзистор *VT1*, ток проходит по *OB2* и двигатель вращается в одном направлении, если же открыт транзистор *VT2*, ток проходит по *OB1* и он вращается в другом направлении. Направление тока якоря в обоих случаях остается неизменным.

PDF Compressor Free Version

Разрядные диоды *VD3* и *VD4* служат для снятия перенапряжений, возникающих при отключении обладающих значительной индуктивностью обмоток возбуждения и якоря.

В рассматриваемом следящем электроприводе в качестве датчиков входной и выходной величин используются кольцевые потенциометры *П1* и *П2*, которые образуют так называемый потенциометрический измеритель рассогласования.

Движок потенциометра *П1* (датчика входной величины) связан с выходным валом задающего устройства *ЗУ*, который представляет собой в данном случае редуктор с ручным приводом. Движок потенциометра *П2* (датчика выходной величины) связан с валом редуктора *Р*, расположенного на валу двигателя и рабочей машины *РМ*. Редукторы *ЗУ* и *Р* имеют одинаковое передаточное число. Питание потенциометров *П1* и *П2* осуществляется напряжением постоянного тока $U_{\text{п}}$.

Сигнал рассогласования U_{Δ}' снимается с движков потенциометров *П1* и *П2*. При их одинаковом угловом положении, что соответствует нулевому углу рассогласования $\Delta\varphi = \varphi_{\text{вх}} - \varphi_{\text{вых}}$, сигнал $U_{\Delta}' = 0$. При этом равен нулю и сигнал U_{Δ} на выходе усилителя *У*, оба транзистора закрыты и двигатель неподвижен.

При возникновении рассогласования между угловыми положениями движков потенциометров *П1* и *П2*, вызванного поворотом рукоятки *ЗУ*, сигналы U_{Δ}' и U_{Δ} становятся отличными от нуля. В зависимости от полярности сигнала U_{Δ}', которая определяется знаком угла рассогласования (ошибки) $\Delta\varphi$, сигнал U_{Δ} подается на транзистор *VT1* (по цепи диод *VD10* — стабилитрон *VD5* — резистор *R3* — диод *VD7*) или *VT2* (по цепи диод *VD9* — стабилитрон *VD6* — резистор *R4* — диод *VD8*). Если этот сигнал превышает порог срабатывания стабилитронов *VD5* или *VD6*, то соответствующий транзистор откроется, подключая двигатель к источнику питания с напряжением *U*. Двигатель начнет вращаться, поворачивая вал рабочей машины *РМ* и ось движка потенциометра *П2* в направлении, при котором возникшее рассогласование в системе будет уменьшаться и стремиться к нулю. Когда сигнал U_{Δ} станет меньше напряжения открывания стабилитронов *VD5* или *VD6*, работающий транзистор (*VT1* или *VT2*) закроется и отключит двигатель от источника питания.

Таким образом, электропривод в данной схеме отрабатывает заданное перемещение $\varphi_{вх}$ с некоторой погрешностью, обусловленной нечувствительностью системы из-за порога срабатывания стабилитронов *VD5*, *VD6*. Зону нечувствительности системы стараются делать возможно меньшей в пределах 2...3° угла рассогласования. Однако снижение зоны нечувствительности может привести к возникновению нежелательного колебательного режима работы электропривода около положения равновесия. Эффективным средством устранения такого режима является введение в систему дополнительных сигналов по первой и второй производным сигнала рассогласования, а также использование электрического торможения после отключения двигателя.

Достоинствами следящих электроприводов релейного принципа действия являются их простота, надежность и возможность получения оптимальных траекторий движения исполнительных органов рабочих машин. К недостаткам таких систем следует отнести их склонность к колебаниям и наличие определенной нечувствительности (неточности) при слежении.

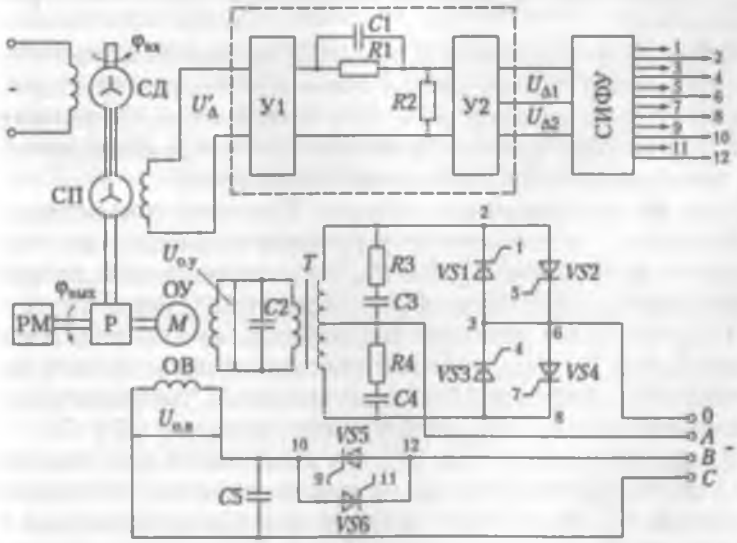


Рис. 4.19. Схема следящего электропривода с асинхронным двигателем

Следящий электропривод переменного тока пропорционального действия. В следящем электроприводе широкое применение находят асинхронные двигатели, которые отличаются надежностью в работе и долговечностью. При создании маломощных (до 1 кВт) следя-

щих электроприводов обычно используют двухфазные короткозамкнутые двигатели, в том числе и с полым ротором (рис. 4.19).

Двигатель *М* имеет обмотки возбуждения *ОВ* и управления *ОУ*, которые питаются сдвинутым по фазе на 90° напряжением. Регулирование скорости двигателя осуществляется изменением действующего значения напряжения на *ОУ*, которая получает питание от фазы *А* трехфазной сети переменного тока через тиристоры *VS1–VS4*. Обмотка возбуждения *ОВ* связана с фазами *В*, *С* через тиристоры *VS5–VS6*. Тиристоры *VS1–VS6* образуют стандартные схемы регуляторов напряжения переменного тока. Они попарно включены по встречно-параллельной схеме, что обеспечивает протекание тока по обмоткам в оба полупериода питающего напряжения.

PDF Compressor Free Version

Рассогласование между задающей осью и валом электропривода измеряется с помощью сельсинной пары, состоящей из сельсина-датчика *СД* и сельсина-приемника *СП*. Положение ротора *СД* задает входной сигнал $\varphi_{вх}$, а положение ротора *СП* определяет угол поворота вала электропривода $\varphi_{вых}$. Сигнал рассогласования U'_{Δ}, снимаемый с обмотки статора *СП*, пропорционален разности углов $\varphi_{вх}$ и $\varphi_{вых}$, а фаза этого напряжения определяется знаком этой разности (ошибки).

Сигнал рассогласования U'_{Δ} подается на вход фазочувствительного усилителя *У1*. После прохождения через корректирующее звено, состоящее из резисторов *R1*, *R2* и конденсатора *С1*, сигнал рассогласования усиливается усилителем *У2* и в виде напряжений $U_{\Delta 1}$ и $U_{\Delta 2}$ поступает на блок управления тиристорами.

Схема работает следующим образом. При появлении сигнала рассогласования U'_{Δ} в зависимости от его фазы на выходе усилителя *У2* появляются напряжения $U_{\Delta 1}$ или $U_{\Delta 2}$. При возникновении, например, напряжения $U_{\Delta 1}$ *СИФУ* подает импульсы управления на тиристоры *VS1*, *VS2*, *VS5*, *VS6*. Тиристоры открываются, и на *ОУ* и *ОВ* подаются напряжения $U_{оу}$ и $U_{ов}$, которые пропорциональны сигналу рассогласования $U_{\Delta 1}$. Двигатель *М* начинает вращаться, уменьшая угол рассогласования $\Delta\varphi = \varphi_{вх} - \varphi_{вых}$ между осями сельсинов *СД* и *СП*.

При другой фазе сигнала U'_{Δ}, что имеет место при изменении знака угла рассогласования $\Delta\varphi$, на выходе усилителя *У2* появляется напряжение $U_{\Delta 2}$. Этот сигнал вызывает включение тиристоров *VS3*, *VS4*, и на обмотку управления *ОУ* будет подано напряжение $U_{оу}$, сдвинутое по фазе на 180° по сравнению с предыдущим случаем. Поскольку одновременно с этим откроются тиристоры *VS5* и *VS6* и *ОВ* также получит питание, двигатель *М* начнет вращаться, но уже в другом направлении. Таким образом, за счет изменения фазы напряжения $U_{оу}$ осуществляется реверс двигателя *М*, что обеспечивает отработку угла рассогласования любого знака.

Конденсаторы *C2–C5* и резисторы *R3*, *R4* используются для сглаживания пульсаций напряжения на обмотках двигателя.

Цифроаналоговый позиционный следящий ЭП постоянного тока. При необходимости получения высокой точности слежения (до 0,001%) в следящих электроприводах применяются цифровые устройства управления (задатчики, сумматоры, счетчики и т.д.) и датчики координат. В ряде случаев цифровая измерительная часть сочетается с аналоговой, выполненной по принципу подчиненного регулирования координат, в результате чего образуются так называемые цифроаналоговые схемы управления электропривода, сочетающие в себе положительные свойства цифровых и аналоговых систем.

Аналоговая часть электропривода (рис. 4.20) выполнена по структуре подчиненного регулирования координат, в которой внешний контур регулирования положения выполнен цифровым, а внутренние контуры регулирования тока и скорости — аналоговыми. Аналоговая часть содержит регулятор тока *РТ*, на который поступают сигналы задания по току $U_{з.т}$ и обратной связи по току $U_{о.т}$, подаваемые соответственно с регулятора скорости *РС* и датчика тока *ДТ*. Выходной сигнал регулятора тока $U_у$ является управляющим для реверсивного преобразователя *ПУ*, питающего якорь двигателя постоянного тока независимого возбуждения *М*. Регулятор скорости *РС*, в свою очередь, получает сигналы $U_{о.с}$ от датчика скорости (тахогенератора) *BR* и $U_{з.с}$ от задатчика интенсивности *ЗИ*, входным сигналом которого является выходной сигнал $U'_{з.с}$ аналогового регулятора положения *РП*.

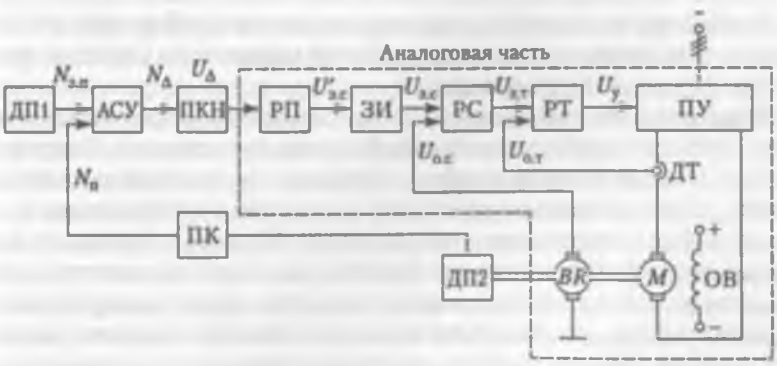


Рис. 4.20. Схема цифроаналогового следящего электропривода

В состав цифровой измерительной части электропривода, формирующей сигнал рассогласования $U_Δ$, входят датчики входной *ДП1* и выходной *ДП2* координат электропривода (его положения),

арифметическое суммирующее устройство *АСУ*, преобразователь кода в напряжение *ПКН* (преобразователь «код — аналог») и преобразователь кода положения вала *ДПТ* в двоичный код *ПК*.

PDF Compressor Free Version

Работа цифровой части следящего электропривода происходит следующим образом. Требуемое перемещение исполнительного агрегата рабочей машины вырабатывается задатчиком *ДП1* в виде числа $N_{з.п}$ в двоичном коде. Этот сигнал подается на вход сумматора *АСУ* вместе с числовым сигналом $N_п$ (также в двоичном коде), соответствующим действительному положению исполнительного органа рабочей машины.

Сумматор *АСУ* обеспечивает суммирование этих двух цифровых сигналов и выделение сигнала рассогласования (ошибки) в цифровом коде $N_Δ$. Далее цифровой сигнал $N_Δ$ с помощью преобразователя *ПКН* преобразуется в аналоговый сигнал $U_Δ$ (напряжение постоянного тока), который поступает на вход регулятора положения *РП*.

Цифроаналоговый следящий электропривод имеет хорошие динамические показатели работы за счет аналоговой части и высокую точность слежения, обеспечиваемую цифровой частью. Элементы и устройства такого электропривода могут быть реализованы на основе унифицированной серии аналоговых (УБСР-АИ) и цифровых (УБСР-ДИ) регуляторов.

4.6. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Электропривод с программным управлением обеспечивает движение исполнительного органа рабочей машины по определенной, наперед заданной программе.

Чаще всего электропривод с таким управлением применяется при обработке деталей на металлообрабатывающих станках. Например, партия деталей должна пройти обработку на многооперационном станке, позволяющем осуществлять сверление, фрезерование, точение и другие технологические операции. При использовании программного управления перед обработкой детали соответствующим образом составляется программа, в которой задаются порядок смены инструмента, необходимые перемещения стола, на котором крепится деталь, режимы работы инструментов и другие технологические данные. После этого электроприводы исполнительных органов станка реализуют выполнение этой программы.

Применение станков с ЧПУ позволяет резко (в 2–6 раз) увеличить их производительность, сократить сроки подготовки производства и технологической оснастки при смене детали, умень-

шить брак, перейти к многостаночному обслуживанию, обеспечить взаимозаменяемость, что позволит получить значительный экономический эффект. Использование ЧПУ особенно эффективно при мелкосерийном производстве и частой смене номенклатуры обрабатываемых деталей.

Обобщенная структура электропривода с ЧПУ приведена на рис. 4.21. От программного устройства *ПУ* сигнал управления $U_п$ поступает на электропривод, который обеспечивает отработку этого сигнала управления, перемещая соответствующим образом исполнительный орган *ИО* рабочей машины (станка). Совокупность программного устройства *ПУ* и электропривода иногда называют системой программного управления *СПУ*.

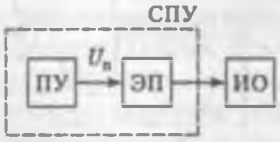


Рис. 4.21. Схема электропривода с программным управлением

В *СПУ* могут использоваться все рассмотренные ранее виды электроприводов постоянного и переменного тока, которые выполняются разомкнутыми и замкнутыми, с аналоговым и цифровыми элементами управления и т.д.

Вся совокупность существующих программных устройств делится на нечисловые (цикловые) и числовые программные устройства.

Электропривод с нечисловыми (цикловыми) программными устройствами. Эти приводы используются для обеспечения повторяющихся одинаковых циклов движения исполнительных органов. Программные устройства таких электроприводов выполняются с применением различных контактных и бесконтактных аппаратов релейного действия — конечных и путевых выключателей, шаговых искателей, счетчиков, средств программируемой логики. К электроприводам с нечисловыми программными устройствами относятся также системы с использованием шаблонов и копиров, которые нашли применение в различных копировальных станках и автоматах. В таких системах обычно используется следящий электропривод релейного действия.

В *нечисловой СПУ* (рис. 4.22) электродвигатель *М* приводит в движение исполнительный орган *ИО*, которым может быть, например, суппорт строгального станка, «рука» манипулятора и т.д. В крайних положениях исполнительного органа *ИО* установлены конечные выключатели *SQ1* и *SQ2*, которые вместе с контакто-

рами *K1* и *K2* и кнопками управления *SB1* и *SB2* образуют схему управления двигателем. При включении контактора *K1* двигатель *M* обеспечивает движение *ИО* в условном направлении «Вперед», а при включении контактора *K2* — в условном направлении «Назад». Предположим, что в исходном положении исполнительный орган *ИО* находится в промежуточном положении и ни один из конечных выключателей не нажат. Для начала работы нажимается кнопка *SB1*, в результате чего включается контактор *K1* и двигатель *M*, будучи подключенным к питающей сети, обеспечивает движение *ИО* в направлении «Вперед».

PDF Compressor Free Version

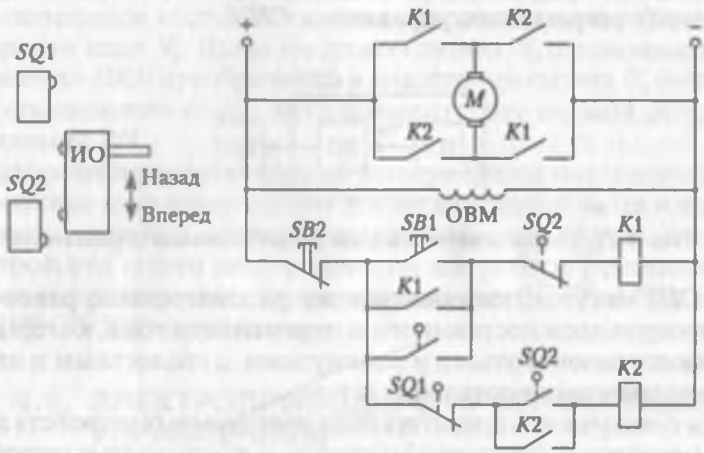


Рис. 4.22. Схема цикловой системы программного управления

При подходе *ИО* к конечному выключателю *SQ2* и воздействии на него происходит разрыв цепи катушки контактора *K1* и подключение к источнику питания контактора *K2*. За счет переключения этих аппаратов изменится на противоположную полярность напряжения на якоре двигателя *M*, и он начнет вращаться в обратную сторону, обеспечивая движение *ИО* в направлении «Назад».

При подходе *ИО* к конечному выключателю *SQ1* и воздействии на него произойдет обратное переключение в схеме, а именно: отключится контактор *K2* и включится *K1*, после чего исполнительный орган вновь начнет двигаться в направлении «Вперед». Такое цикловое возвратно-поступательное движение будет происходить до тех пор, пока не будет нажата кнопка *SB2*.

Схема рис. 4.22 может быть дополнена счетчиком, с помощью которого можно обеспечить определенное число циклов движения *ИО* и его останов после этого.

В последнее время широкое применение в схемах программного управления электропривода находят программируемые контроллеры (ПК), представляющие собой специализированные ЭВМ для автоматизации цикловых и последовательных производственных и технологических процессов. Они позволяют реализовывать как простые схемы управления цикловым движением электроприводов, так и сложные системы комплексной автоматизации промышленного оборудования. Их применение оказывается экономически целесообразным при реализации схем управления, требующих использования нескольких десятков или сотен обычных электрических аппаратов — реле, логических элементов, счетчиков и т.д.

Рассмотрим работу *цикловой системы программного управления* с применением ПК, считая, что в программируемое запоминающее устройство (ПЗУ) с помощью устройства ввода программ (УВП) введена программа, определяющая порядок функционирования системы (рис. 4.23, *а*). Рабочий цикл схемы включает в себя три этапа.

На первом этапе с помощью сканатора (генератора тактовых импульсов) обеспечивается циклический и последовательный опрос всех входов ПК, на которые подаются сигналы от командных устройств и элементов системы — кнопок и ключей управления, конечных и путевых выключателей, других ЭВМ. Получаемая информация загружается в запоминающее устройство (ПЗУ).

На втором этапе процессор ПК в соответствии с введенной в ПЗУ программой осуществляет логические операции, преобразующие состояние входных сигналов в заданное состояние выходных сигналов. Если состояние входов не изменилось по сравнению с предыдущим циклом сканирования, процессор сохраняет неизменным состояние выходов, в противном случае процессор изменяет их состояние в соответствии с заданной программой.

Опрос участков программы осуществляется циклично, один за другим, в порядке их расположения с возвращением к началу программы после окончания полного цикла опроса. Время опроса одного цикла (период сканирования) в среднем составляет 2...10 мс на 1 тыс. слов памяти.

На третьем этапе осуществляется вывод выходных сигналов на исполнительные устройства электроавтоматики станка — электроприводы исполнительных органов, электромагниты и электромагнитные муфты, реле, контакторы и т.д.

Программа может записываться в ПК с помощью различных языков, например в виде уравнений булевой алгебры, мнемокода и стандартных описаний релейных схем, а также языков высокого уровня — PL/M и Фортран IV. Рассмотрим в качестве примера использование языка релейно-контактных символов (РКС), кото-

рый прост, нагляден и не требует специальных знаний персонала при программировании.

PDF Compressor Free Version

б

Язык РКС

Символ	Значение
	Замыкающий контакт
	Размыкающий контакт
	Начало ветвления
	Конец ветвления
	Функция (выход)

в

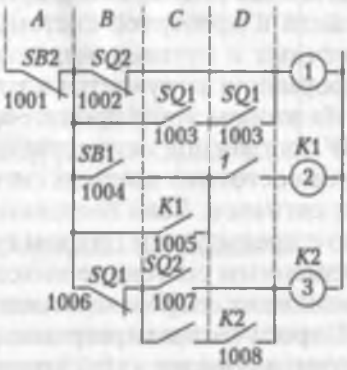


Рис. 4.23. Схема (*а*), символы языка РКС (*б*) и преобразованная схема электропривода с программируемым контроллером (*в*)

Язык РКС имеет пять основных логических компонентов (символов) (рис. 4.23, *б*): аргумент (замыкающий контакт), инверсный (обратный) аргумент (размыкающий контакт), начало и конец ветвления параллельной цепи и функцию (выход) (например, катушка электрического аппарата или электромеханического устройства). К дополнительным компонентам языка относятся счет импульсов (счетчик), выдержка времени (таймер) и запоминание (память).

Основу для программирования на языке РКС составляют принципиальные релейно-контакторные схемы управления, которые

перед программированием должны быть преобразованы по следующим правилам.

Каждая цепь преобразованной схемы должна иметь одинаковое число (например, четыре) последовательно или параллельно включенных контактов, каждый из которых располагается в одной из четырех зон — *A, B, C, D*. Пятая позиция цепи отводится функции (выходу). Если контактов в цепи меньше чем четыре, их дублируют, если их больше, в схему ПК вводится промежуточное (фиктивное) реле (память), не нарушающее логики работы исходной цепи. Контакты (входы) и функции (выходы, катушки) нумеруются.

Для примера на рис. 4.23, *в* приведена преобразованная таким образом схема циклового управления рис. 4.22. В эту схему в соответствии с указанными правилами введено промежуточное реле *1*, а контакт конечного выключателя *SQ1* сдублирован.

Ввод программы после составления такой схемы осуществляется с клавишной панели ПК (блок УВП на рис. 4.23, *а*), клавиши которой соответствуют тому или иному логическому символу языка. Кроме того, на панели располагаются декадные переключатели набора номеров цепей и контактов, а также клавиши выбора типа функции (логической, счетной, временной или запоминания).

Вводимая программа записывается в ПЗУ, после чего ПК может выполнять функции, предусмотренные принципиальной схемой. Выполнение программы будет производиться последовательно по цепям цикловым образом, при этом каждая цепь обрабатывается слева направо.

Электропривод с числовым программным управлением (ЧПУ). Такой электропривод представляет собой универсальную СПУ. Применительно к обработке различных изделий на станках, где она находит основное применение, эта система обеспечивает существенное повышение производительности труда и качества обработки деталей.

При использовании электропривода с ЧПУ все технологические данные по обработке изделий — скорости и перемещения изделий или обрабатывающего инструмента, их направления, последовательность операций при обработке и т.д. задаются в виде чисел. Совокупность всех чисел образует программу обработки данного изделия, которая предварительно соответствующим образом рассчитывается, кодируется, записывается на тот или иной программоноситель (перфоленту, перфокарту или магнитную ленту). Перед обработкой изделия программа вводится в программное устройство электропривода, который в дальнейшем обеспечивает обработку изделия без непосредственного участия оператора. Для обработки другого изде-

лия требуется лишь сменить программу, что значительно сокращает время обработки за счет исключения вспомогательных операций (подвод и отвод инструмента, измерение детали, установка величин подачи и скорости резания и т.д.).

PDF Compressor Free Version

Таким образом, СПУ с ЧПУ представляет собой разновидность цифрового электропривода с программным управлением.

Системы ЧПУ делятся на аналоговые (непрерывные) и дискретные (импульсные). В аналоговых системах ЧПУ совокупность чисел, образующих программу обработки изделия, преобразуется в какую-либо непрерывно изменяющуюся аналоговую физическую величину (напряжение постоянного тока, фазу или амплитуду синусоидального напряжения и т.д.), которая и является входным, управляющим воздействием на электропривод. В дискретных системах ЧПУ программа в конечном итоге представляется последовательностью управляющих импульсов, каждому из которых соответствует определенное перемещение инструмента или изделия. Число импульсов определяет значение перемещения, а их частота — скорость перемещения.

Системы ЧПУ работают в одном из двух режимов: позиционирования или контурной обработки. *Позиционные (координатные) системы ЧПУ* обеспечивают точную установку инструмента относительно изделия или его прямолинейное перемещение. Такие режимы бывают необходимы при фрезеровании, сверлении или расточке нескольких отверстий, а также при точении и строгании изделий. Инструмент или изделие при этом перемещается по кратчайшим, прямолинейным путям между точками установки (позициями) инструмента.

Контурные (функциональные) системы ЧПУ обеспечивают перемещение инструмента или изделия по произвольным траекториям, что требуется при контурной обработке изделий различной конфигурации.

Системы ЧПУ могут быть замкнутыми и разомкнутыми. В замкнутых системах с помощью датчиков измеряется действительное положение инструмента или изделия, и эта информация в виде сигнала обратной связи подается в сравнивающее устройство, в котором она сопоставляется с сигналами программного устройства.

При отличии действительного положения от заданного в систему управления электропривода поступают дополнительные управляющие сигналы, обеспечивающие необходимую коррекцию положения инструмента или изделия. Тем самым замкнутые системы ЧПУ обеспечивают большую точность обработки изделий.

В разомкнутых системах ЧПУ движение инструмента или изделия не контролируется и непосредственно не сопоставляется с заданным. Поэтому случайное изменение параметров системы или

каких-либо внешних возмущений, например момента сопротивления на валу привода, вызывает снижение точности отработки программы. Вместе с тем разомкнутые системы оказываются проще замкнутых в наладке и эксплуатации.

Процессу обработки изделия на станке с системой ЧПУ предшествует подготовка программоносителя, которая состоит из нескольких этапов.

Исходными данными для составления программы обработки изделия являются технологические данные: размеры заготовки и чертеж изделия, материал заготовки, характеристика инструмента, степень точности изготовления изделия, характер и вид обработки.

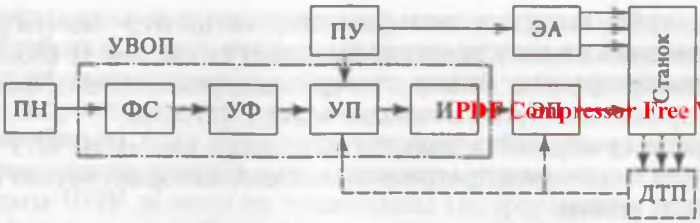
На первом этапе составления программы изготовляется специальный чертеж, в котором изделие изображается в системе прямоугольных координат (при объемной обработке вводится и третья координата). Далее в принятой системе координат программируется перемещение инструмента (изделия), при этом для позиционных систем ЧПУ программируется перемещение между двумя последовательно обрабатываемыми точками, а для контурной системы ЧПУ — перемещение центра инструмента (изделия) по требуемой траектории.

На следующем этапе подготовки программы составляется технологическая карта обработки изделия, в которой определяется последовательность всех перемещений инструмента (изделия) с указанием скорости, подачи и глубины резания и величины перемещения по координатным осям.

Для удобства ввода данных и сокращения длины программоносителя все данные технологической карты кодируются. В системах ЧПУ наиболее распространенными являются двоичный и двоично-десятичный коды, использующие двоичную и десятичную системы исчисления. Двоично-десятичные коды сочетают в себе емкость десятичных кодов и удобство представления информации на программоносителе, характерное для двоичных кодов.

Программа на программоносителе записывается в виде отдельных «фраз» (блоков). Каждый блок содержит всю информацию по обработке изделия на данном этапе технологического цикла — направление и скорость перемещения по координатным осям, режимы обработки, охлаждения и т.д. Эта информация выражается с помощью отдельных «слов», каждое из которых определяет или значение перемещения по осям координат, или его скорость и направление, или какие-либо вспомогательные команды.

Подготовленный программоноситель *ПН*, содержащий программу обработки изделия в закодированном виде, помещается в устройство ввода ЭП (рис. 4.24).



PDF Compressor Free Version

Рис. 4.24. Схема электропривода с ЧПУ

Если программа записана на перфоленте, то в устройстве ввода и обработки программы *УВОП* с помощью фотосчитывателя *ФС* и усилителя-формирователя *УФ* осуществляется покадровое считывание и преобразование закодированной информации программоносителя *ПН* в электрические сигналы. Пока информация одного считываемого кадра записывается в буферную (промежуточную) память, в рабочей памяти и последующих блоках системы ЧПУ осуществляется обработка информации предыдущих кадров. По мере освобождения рабочей памяти в нее переводится информация из буферной памяти, что обеспечивает непрерывность процесса управления станком. Буферная и рабочая память входят в устройство памяти *УП*.

Из рабочей памяти электрические сигналы поступают на вход интерполятора (дешифратора) *И*, который преобразует эти закодированные сигналы в последовательность электрических импульсов (так называемый унитарный код) и подает их на вход электропривода ЭП. Электропривод, осуществляя отработку этой последовательности импульсов, обеспечивает перемещение исполнительного органа станка, при этом количество импульсов определяет величину перемещения, а частота их следования — скорость перемещения. Устройство памяти *УП* связано с пультом управления *ПУ*.

Система ЧПУ обеспечивает также соответствующее управление различными электромеханическими и электромагнитными устройствами — электромагнитными муфтами, электромагнитами различных механических приспособлений станка, катушками реле и контакторов и т.д., которые на схеме рис. 4.24 условно показаны блоком электроавтоматики *ЭА*.

Схема ЧПУ на рис. 4.24 может быть дополнена датчиками параметров технологического процесса обработки детали (блок *ДТП*) и координат электропривода. В этом случае система ЧПУ становится замкнутой и обеспечивает более высокое качество обработки деталей. Кроме того, схема электропривода с ЧПУ содержит ряд не показанных на рис. 4.24 блоков и устройств, обеспечива-

ющих контроль ввода и выключение программы, защиту, блокировку и сигнализацию при работе электрооборудования станка.

Часто оказывается удобным записывать программу (после считывания и декодирования) на магнитную ленту, что позволяет получать большую плотность записи программы и производить операции считывания и декодирования на отдельно расположенных от станка устройствах. Запись на магнитную ленту производится в несколько дорожек, часть из которых содержит информацию о перемещениях по координатам, другая — о направлении движения, режимах резания, применяемых инструментах и т.д.

Информация на магнитной ленте записывается в виде так называемого унитарного кода, т.е. непрерывной последовательности импульсов управления, обеспечивающих перемещение исполнительных органов станка в соответствии с количеством поступающих импульсов.

Для примера рассмотрим структурную схему системы ЧПУ с шаговым двигателем (рис. 4.25), с помощью которого перемещается стол фрезерного станка по одной координате.

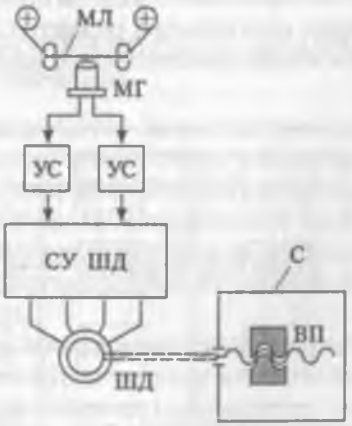


Рис. 4.25. Схема электропривода с ЧПУ с использованием шагового двигателя

Программа перемещения стола, записанная на магнитную ленту *МЛ* в виде последовательности единичных импульсов (что соответствует унитарному коду), считывается с помощью магнитной головки *МГ*. В зависимости от требуемого направления движения импульсы направляются по одному из каналов и после усиления в блоках *УС* поступают на вход схемы управления шаговым двигателем *СУ ШД*.

Двигатель отрабатывает командные импульсы и через механическую винтовую передачу *ВП* перемещает стол *С*. Общее число импульсов определяет величину, а их частота — скорость перемещения стола. Для перемещения стола по другой координате используется аналогичный электропривод.

PDF Compressor Free Version

По своим техническим возможностям и особенностям структуры системы ЧПУ делятся на четыре группы, имеющие в соответствии с международной классификацией обозначения *HNC*, *SNC*, *CNC* и *DNC*.

Система *HNC* (*Hand numerical control*) обеспечивает оперативное управление с ручным заданием программы с пульта управления. Система *SNC* (*Stored numerical control*) содержит устройство памяти для хранения программ и обеспечивает обработку партии одинаковых заготовок с однократным считыванием программы перед обработкой. Система *CNC* (*Computer numerical control*) базируется на применении микроЭВМ, позволяющей программировать свою работу и вырабатывать требуемый алгоритм управления. Система *DNC* (*Direct numerical control*) позволяет осуществлять прямое цифровое управление группой станков с ЧПУ систем *SNC* и *CNC*. Система *DNC* также предусматривает использование в своей структуре ЭВМ.

В настоящее время наибольшее развитие получили системы ЧПУ с применением микропроцессоров и микроЭВМ (рис. 4.26).

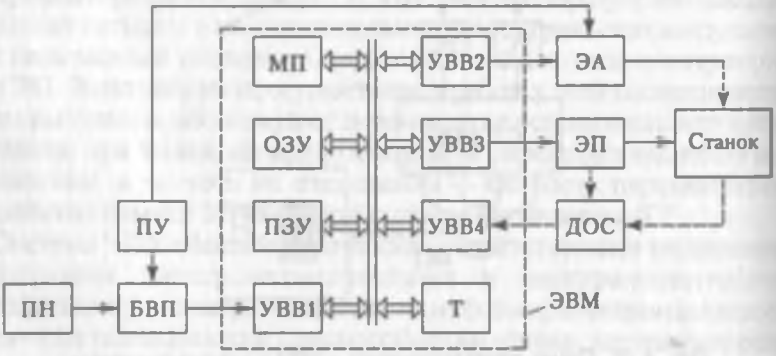


Рис. 4.26. Схема электропривода с программным устройством на основе ЭВМ

Управляющая программа вводится в ЭВМ с программоносителя *ПН* (или пульта управления *ПУ*) через блок ввода программы *БВП* и устройства ввода-вывода *УВВ1*. Далее она поступает в устройство памяти микроЭВМ. В *ПЗУ* хранятся постоянные час-

ти программы, данные для декодирования, интерполирования и необходимых вычислений.

В *ОЗУ* поступает кроме данных управляющей программы текущая информация от датчиков обратной связи *ДОС* о ходе технологического процесса, состоянии защит и блокировок, на основании чего вырабатывается управляющее воздействие на электропривод и устройства электроавтоматики станка *ЭА*. Связь микроЭВМ с электрооборудованием станка осуществляется через устройства ввода-вывода *УВВ2–УВВ4*. Кроме указанных блоков ЭВМ включает в себя микропроцессор *МП* и таймер *Т*.

Применение микроЭВМ в системах ЧПУ резко расширяет их функциональные возможности, позволяя воздействовать программным путем на функционирование станка, осуществлять диалоговый режим общения оператора со станком, ввести диагностику работы станка и системы ЧПУ, реализовывать универсальный — как позиционный, так и контурный — режим обработки деталей.

Кроме того, микроЭВМ позволяет осуществлять управление несколькими электроприводами, обеспечивающими движение инструмента (детали) по различным координатам.

4.7. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Работа некоторых рабочих машин и производственных механизмов характеризуется изменением в широких пределах и случайным образом условий технологических процессов и различных действующих на них возмущающих воздействий. Для обеспечения наилучшего хода таких технологических процессов электропривод должен обладать свойствами изменять соответствующим образом характер своей работы.

Электропривод, в котором способ функционирования его системы управления автоматически и целенаправленным образом изменяется для осуществления наилучшего протекания технологического процесса рабочей машины, называется электроприводом с адаптивным или самоприспосабливающимся управлением. Другими словами, электропривод с адаптивным управлением обеспечивает наилучший ход технологического процесса по заданному показателю качества при изменяющихся возмущениях и условиях работы. Автоматическое изменение способа функционирования системы управления электропривода называют адаптацией или самоприспособлением.

Электропривод с адаптивным управлением, в котором целенаправленно изменяются параметры системы управления, называет-

ся *самонастраивающимся*. Если изменяются параметры и структура системы управления, то электропривод называется *самоорганизующимся*, если изменяются параметры, структура и закон управления с использованием опыта функционирования электропривода, то он называется *самообучающимся*.

PDF Compressor Free Version

Для осуществления адаптивного управления в структуру ЭП вводится устройство адаптивного управления (УАУ), в задачу которого входит формирование сигналов управления, обеспечивающих заданный показатель качества технологических процессов, например наивысшей производительности рабочей машины, минимальной стоимости обрабатываемой детали и т.д.

В общем случае УАУ должно обеспечивать или поддержание этого показателя качества на заданном уровне *(системы стабилизации)*, или получение экстремального его значения *(экстремальные системы)*.

Системы стабилизации чаще всего выполняются с использованием модели технологического процесса. Целью их работы является обеспечение близости характеристик реального технологического процесса и целесообразного (оптимального) процесса, который воспроизводится с помощью модели этого технологического процесса.

В *экстремальных адаптивных системах* настройка параметров системы управления осуществляется так, чтобы заданный показатель качества технологического процесса достигал экстремального значения.

По способу получения информации о текущем значении показателя качества экстремальные системы делятся на *поисковые* и *беспоисковые*. В поисковых системах нахождение показателя качества достигается за счет введения в систему дополнительных поисковых сигналов. В *беспоисковых (аналитических) системах* этот показатель рассчитывается аналитически с помощью специального вычислительного устройства.

Поисковые системы по способу поиска, в свою очередь, делятся на *системы с автоколебательным и принудительным поиском экстремума*. Если поисковые сигналы генерируются самой системой, то она относится к экстремальным системам с автоколебательным поиском экстремума. При использовании специального дополнительного источника поисковых сигналов экстремальная система относится к системам с принудительным поиском экстремума.

По количеству переменных, от которых зависит показатель качества, экстремальные системы делятся на одномерные и многомерные. Классификация экстремальных систем выполняется также по виду методов поиска алгоритма нахождения экстремума, среди которых применение нашли методы Гаусса — Зайделя, градиента, наискорейшего спуска и ряд других.

Примером поисковой адаптивной системы управления электропривода может служить система поиска минимального значения тока статора асинхронного двигателя в системе ТРН-АД, при котором потери в двигателе оказываются минимальными. Регулируемой координатой асинхронного двигателя как объекта управления в этом случае является ток статора, управляющей — напряжение питания двигателя, а возмущающим воздействием — момент нагрузки на валу двигателя.

4.8. КОМПЛЕКТНЫЕ И ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ

Прогрессивным направлением при создании средств управления и автоматизации технологических процессов является разработка и выпуск комплектных электроприводов (КЭП) постоянного и переменного тока. Они представляют собой регулируемый электропривод, в поставляемый заказчику комплект которого входят все его функциональные элементы, согласованные по всем своим характеристикам и параметрам уже на стадии проектирования, конструирования и изготовления.

Комплектные электроприводы находят все более широкое применение во многих отраслях промышленности — станкостроительной, бумагоделательной, металлургической, машиностроительной и др. Распространение КЭП объясняется более низкой трудоемкостью при его разработке и изготовлении, сокращением времени на электромонтажные и наладочные работы, удобством в эксплуатации.

Комплектные электроприводы различаются по следующим техническим данным [15]: напряжению питающей сети; числу двигателей (одно-, двух- или многодвигательные); виду и номинальным параметрам силового преобразователя; наличию или отсутствию реверса двигателя; виду основной регулируемой координаты (электроприводы с регулируемыми скоростью, положением, натяжением, мощностью); диапазону и направлению регулирования скорости (однозонные и двухзонные); составу аппаратуры силовой цепи (с линейным контактором или без него); наличию или отсутствию торможения; способу связи с питающей сетью (связь через трансформатор, реактор или без них).

Комплектный электропривод постоянного тока. Он характеризуется наиболее широкой номенклатурой, и в его состав входят: двигатель с тахогенератором и (или) датчиком положения; тиристорные преобразователи для питания обмоток возбуждения и якоря двигателя постоянного тока; силовой трансформатор или реактор; сглаживающий реактор; коммутационная и защитная аппаратура (авто-

матические выключатели, линейные контакторы, рубильники); устройство динамического торможения (при необходимости); схема управления электропривода; блоки питания обмотки возбуждения тахогенератора и электромагнитного тормоза, шкаф ввода высокого напряжения (при необходимости) и комплект аппаратов, приборов и устройств для управления и контроля состояния электропривода.

PDF Compressor Free Version

Датчики технологических параметров рабочих машин и механизмов, а также управляющие и сигнальные устройства, монтируемые на пультах управления, ввиду их специфичности в комплект поставки обычно не входят.

Электротехнической промышленностью выпускается несколько серий КЭП постоянного тока.

Комплектные электроприводы серии КТЭУ обладают широким спектром функциональных возможностей. Они выпускаются в одно- и многодвигательном вариантах реверсивного и нереверсивного исполнения как с динамическим торможением, так и без него. Электроприводы мощностью до 2000 кВт обеспечивают регулирование скорости, положения, ЭДС, мощности и натяжения, а мощностью до 12 000 кВт — только регулирование скорости и мощности. На основе этих КЭП могут быть реализованы электроприводы и со специальными характеристиками.

Комплектные электроприводы серий ЭКТ и КТЭ мощностью соответственно до 2000 и 1000 кВт имеют примерно те же функциональные возможности, что и серия КТЭУ, и отличаются набором и исполнением отдельных блоков.

Большая группа КЭП разработана и широко применяется для привода механизмов станков, роботов, манипуляторов и ряда других подобных рабочих машин и механизмов. К их числу относятся КЭП серий ЭТУ 3601, ЭТ3, ЭТ6, ЭТРП, ЭПУ1, ЭПУ2, ПРП, ЭШИР-1. В этих КЭП применяются высокомоментные двигатели типов ПБСТ, ПГТ, 2П, ПБВ, ДК1, обеспечивающие высокие динамические показатели работы привода. Эти двигатели имеют встроенные тахогенераторы, с помощью которых реализуется обратная связь по скорости. В состав этих КЭП кроме двигателя с тахогенератором входят силовой преобразователь, устройство управления, автоматический выключатель, трансформатор питания, сглаживающий реактор, аппараты защиты и сигнализации. Некоторые из этих КЭП (ЭТУ3601, ЭТ3) имеют блоки связи с системами ЧПУ станков.

Большинство указанных КЭП имеют силовые тиристорные преобразователи, построенные по одно- или трехфазным, мостовым и нулевым, нереверсивным и реверсивным схемам. В КЭП типов ПРП и ЭШИР-1 используется транзисторный преобразователь с широтно-импульсной модуляцией напряжения (ШИМ).

Схемы управления большинства станочных КЭП построены по принципам подчиненного регулирования координат с П- и ПИ-регуляторами тока и скорости, что обеспечивает большие диапазоны регулирования скорости, лежащие в пределах одной тысячи и более. В КЭП типов ЭТ3, ЭТРП, ЭПУ1 для главных движений станка предусматривается управление током возбуждения двигателя с помощью тиристорных преобразователей (возбудителей), чем достигается увеличение диапазона регулирования скорости.

Мощность станочных КЭП — от единицы до десятков киловатт.

Комплектный электропривод переменного тока. Номенклатура таких электроприводов постоянно расширяется и включает в себя электроприводы с асинхронными и синхронными двигателями.

К числу первых серий КЭП с асинхронными двигателями относятся электроприводы типов ЭКТ и ЭКТ2 на мощности от 19 до 66 кВ·А и «Размер 2М», применяющийся в станках с ЧПУ и предусматривающий частотно-токовое управление асинхронного двигателя. К более современным КЭП относятся частотно-управляемые электроприводы типа КЧЭ, КПЧК КПЧН мощностью от 11 до 630 кВт; ЭТА на номинальные токи двигателя от 6 до 50 А; ЭПА 1; ЭТА 1 и ряд других.

В последние годы электротехническая промышленность выпускает комплектные электроприводы с использованием синхронных двигателей, среди которых ЭПБ 2 по схеме вентильного двигателя, ЭПБ 3 и ЭПБ 3-Б с использованием синхронных двигателей с постоянными магнитами.

Серия «Вектор» (АВ-140) предназначена для комплектации станков электроприводами с асинхронными и синхронными (векторными) двигателями с использованием преобразователей частоты.

Интегрированный электропривод. В последние годы для привода некоторых станков и специальных механизмов стали разрабатываться и применяться электроприводы с объединением в единую интегрированную конструкцию нескольких компонент электропривода двигателя, механической передачи, датчиков координат, а в некоторых случаях — и силового преобразователя. Такой электромеханический модуль, называемый иногда мехатронным, позволяет в ряде случаев получать более высокие технико-экономические показатели работы электропривода и технологического оборудования по сравнению с обычным исполнением электропривода.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких случаях требуется создание замкнутых схем электропривода?

2. Какую структуру силовой части имеет большинство замкнутых электроприводов?
3. Какие виды обратных связей применяются в замкнутых схемах электропривода?
4. Какие отличительные признаки имеют схемы управления с общим усилителем?
5. Какие отличительные признаки имеют схемы управления, построенные по принципу подчиненного регулирования координат?
6. Что такое технический и симметричный оптимумы настройки систем с подчиненным регулированием координат?
7. Какие способы управления применяются в асинхронных электроприводах с использованием преобразователей частоты?
8. Какие виды регулируемых электроприводов с синхронными двигателями вы знаете?
9. С какой целью осуществляется автоматическое регулирование тока возбуждения синхронных двигателей?
10. Какой электропривод называется следящим?
11. Что называется электроприводом с программным управлением?
12. В чем состоят особенности электропривода с ЧПУ?
13. Что называется адаптивным электроприводом?
14. Какой электропривод называется комплектным?
15. Какой электропривод называется интегрированным?

PDF Compressor Free Version

Глава 5
ЭЛЕКТРОПРИВОД В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

5.1. СТРУКТУРЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

Современное промышленное производство характеризуется широким применением автоматических систем управления, что позволяет облегчить труд человека, увеличить производительность рабочих машин и технологических комплексов, повысить качество выпускаемой продукции, снизить ее энерго- и материалоемкость и решить ряд других задач.

Степень автоматизации технологических процессов может быть различной. На ранних этапах промышленного производства автоматизировалась работа отдельных рабочих машин и производственных механизмов, а функции принятия и реализации управленческих решений выполнял человек (оператор). По мере развития, усложнения и интенсификации производства, а также появления компьютерной техники стали создаваться системы управления, выполняющие наилучшим образом весь комплекс задач управления технологическими объектами. В настоящее время с ними стали объединяться и системы автоматизированного проектирования (САПР) технологического и вспомогательного оборудования, что позволяет оптимизировать по многим показателям как сами технологические объекты, так и выполняемые ими технологические процессы.

Промышленное производство может иметь несколько уровней автоматизированной системы управления. Первый уровень, который иногда называют локальным, составляют системы управления электроприводов отдельных рабочих машин. На этом уровне для обеспечения заданного качества технологического процесса и его автоматизации, кроме обратных связей самого электропривода, могут использоваться обратные связи и по регулируемому технологическому параметру, например давлению или расходу жидкости или газа, натяжению в обрабатываемом материале, усилию резания в станках и т.д.

В таких схемах автоматического регулирования (рис. 5.1) выходная координата электропривода $X_{вых}$ является управляющим воздействием для рабочей машины *РМ* и обеспечивает заданный ход технологического процесса при различных изменениях возмущающих

воздействий $X_{возм1}$ и $X_{возм2}$. Сигналом задания для электропривода является сигнал отклонения (рассогласования) между сигналами задания технологического параметра $X_{з.т}$ и технологической обратной связи $X_{т.о.с}$. Сигнал задания $X_{з.т}$ поступает от оператора рабочей машины или от системы управления более высокого уровня. Рассмотрим реализацию такой схемы на примере системы автоматического регулирования давления насосной установки.

PDF Compressor Free Version

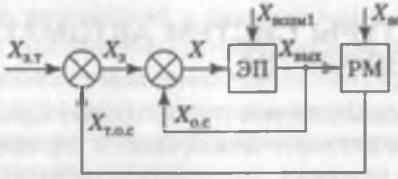


Рис. 5.1. Схема автоматического регулирования технологического параметра

Основной характеристикой насоса является зависимость создаваемого им напора (давления) H от расхода воды Q. На рис. 5.2 показаны эти характеристики для двух скоростей приводного двигателя — номинальной $\omega_{ном}$ (характеристика I) и пониженной ω_1 (характеристика II). Допустим, что в исходном положении насос работал в точке *1* с номинальными расходом $Q_{ном}$ и напором $H_{ном}$. При неизменной скорости вращения рабочего колеса насоса снижение расхода до

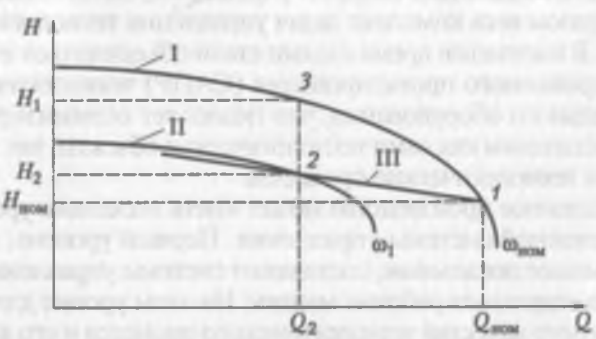


Рис. 5.2. Характеристики насоса

уровня Q_2 приведет к повышению давления на выходе насоса до значения H_1 (т. *3* на характеристике I). Если такое повышение давления нежелательно, например, по условиям технологического процесса или по соображениям экономии электроэнергии и воды, то за счет уменьшения скорости вращения рабочего колеса до уровня ω_1 давление может быть снижено до значения H_2 при том же расходе Q_2

(т. *2* на характеристике II). Тем самым при работе насоса должна быть обеспечена характеристика III, что может быть получено в системе автоматического регулирования давления с использованием регулируемого по скорости электропривода, выполненного, например, по схеме «асинхронный двигатель — преобразователь частоты».

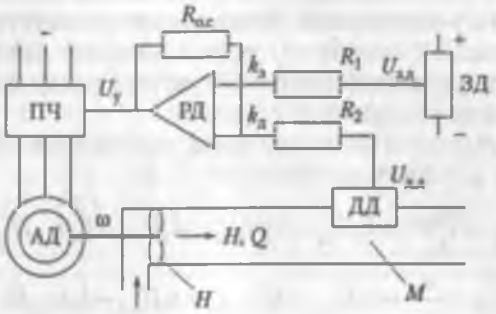


Рис. 5.3. Схема автоматического регулирования давления

Схема такой системы регулирования в гидравлической магистрали показана на рис. 5.3. На ней обозначено: *АД* — асинхронный двигатель; *Н* — насос; *М* — гидравлическая магистраль; *ПЧ* — преобразователь частоты; *РД* — регулятор давления; *ДД*, *ЗД* — соответственно датчик и задатчик давления жидкости; $U_{д.д}$, $U_{з.д}$ — сигналы соответственно датчика и задатчика давления. Датчик давления обеспечивает отрицательную обратную связь по давлению, в соответствии с чем сигнал $U_у$ на выходе *РД* (он же сигнал управления преобразователем частоты) определяется следующим образом:

$$U_у = k_з U_{з.д} - k_д U_{д.д}, \qquad (5.1)$$

где $k_з$, $k_д$ — соответственно коэффициенты усиления *РД* сигналов задания $U_{з.д}$ и давления в магистрали $U_{д.д}$.

Работа системы происходит следующим образом. Допустим, что исходная рабочая точка (см. рис. 5.2) находится в положении *1* и насос работает с номинальными расходом $Q_{ном}$ и давлением $H_{ном}$. При снижении расхода в соответствии с характеристиками насоса рис. 5.2 начнет возрастать давление, а в соответствии с (5.1) при этом будет снижаться сигнал управления $U_у$. Это приведет к уменьшению частоты напряжения питания двигателя, и его скорость начнет снижаться. Насос вследствие этого перейдет работать на более низкую характеристику (рис. 5.2), и давление перестанет возрастать. При увеличении расхода система будет обеспечивать увеличение давления. Таким образом, в замкнутой схеме рис. 5.3 будет обеспечена характеристика III, поддерживающая давление в

заданных пределах. Положение этой характеристики определяется уровнем задающего сигнала $U_{з.д}$.

Наклон характеристики III будет определяться видом *РД* и коэффициентами усиления элементов схемы. В случае использования П-регулятора давления характеристика будет иметь некоторый наклон (регулирование со статической ошибкой), а в случае наличия ПИ-регулятора схема обеспечит астатическое (с нулевой статической ошибкой) регулирование давления. Расчет коэффициента усиления П-регулятора по каналу давления может быть произведен следующим образом.

PDF Compressor Free Version

Запишем выражение для сигнала управления U_y на входе *ПЧ* для точек *1* и *2*, используя формулу (5.1):

$$U_{y1} = \frac{\omega_{ном}}{k_{эп}} = k_э U_{з.д} - k_д U_{д.д1} = k_э U_{з.д} - k_д k_{д.д} H_{ном}; \qquad (5.2)$$

$$U_{y2} = \frac{\omega_1}{k_{эп}} = k_э U_{з.д} - k_д U_{д.д2} = k_э U_{з.д} - k_д k_{д.д} H_2, \qquad (5.3)$$

где $k_{эп} = \Delta\omega/\Delta U_y$ — коэффициент передачи силовой части электропривода (*ПЧ* + *АД*), рад/(с · В); $k_{д.д}$ — коэффициент передачи датчика давления *ДД*, В/м.

Вычитая (5.3) из (5.2), после преобразований получаем следующую формулу для расчета требуемого коэффициента усиления сигнала датчика давления:

$$k_д = \frac{\omega_{ном} - \omega_1}{k_{эп} k_д (H_2 - H_{ном})}. \qquad (5.4)$$

Обычно требуемая статическая характеристика регулирования III задается требуемым (допустимым) перепадом напора $\Delta H = (H_2 - H_{ном})$ при изменении расхода в абсолютном выражении $\Delta Q = Q_{ном} - Q_2$ или в относительном виде $Q_2^* = Q_2/Q_{ном}$. Так как в соответствии с формулами подобия насоса $Q_2^* = Q_2/Q_{ном} = \omega_1/\omega_{ном} = \omega_1^*$, то формулу (5.4) с учетом этих соотношений можно записать в виде:

$$k_д = \frac{\omega_{ном}(1 - Q_2^*)}{k_{эп} k_д \Delta H}. \qquad (5.5)$$

Расчет параметров схемы на рис. 5.3 приведен в примере 5.1.

Многие технологические процессы реализуются с использованием нескольких взаимосвязанных рабочих машин, например прокатка металла в прокатных станах, изготовление деталей в машиностроении, производство бумаги и т.д. Рассмотрим это на примере стана горячей прокатки, схема которого показана на рис. 5.4.

Комплекс технологического оборудования стана включает в себя нагревательные печи металла *1*, рольганг *2*, вертикальный *3*

и горизонтальный *4* окалиноломатели, черновые *5* и чистовые *7* рабочие клети, летучие ножницы *6*, моталки *9*.

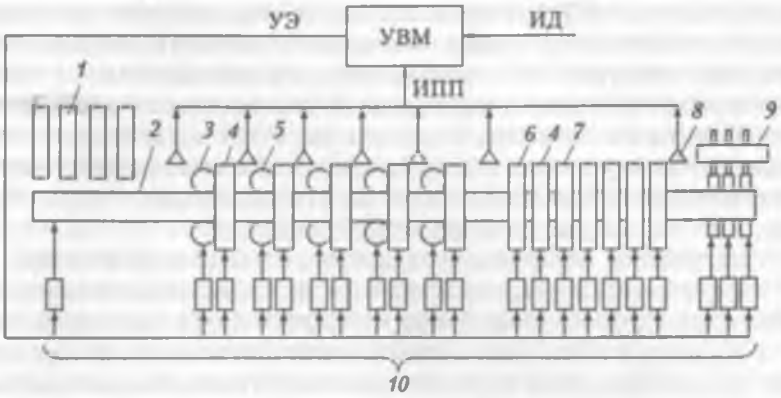


Рис. 5.4. Схема автоматизации стана горячей прокатки

Технологический процесс прокатки металла состоит в следующем. Перед прокаткой металла с помощью специальных нажимных устройств устанавливают необходимые растворы валков всех клетей стана и окалиноломателей. Прокатка металла начинается с разогрева слитков в нагревательных печах *1*. Затем они поступают на транспортирующий рольганг *2* и доставляются к окалиноломателям *3* и *4*, с помощью которых удаляется окалина с их поверхности. Далее слиток поступает в клети черновой группы стана (их может быть 5–6), где производится предварительное обжатие слитка до толщины 20–25 мм.

После черновой группы металл поступает в чистовую группу, состоящую из 7–9 клетей, в которых металл обжимается до заданной толщины. С помощью моталок *9* он сматывается в рулоны и направляется на дальнейшую обработку. Агрегаты прокатного стана — клети, рольганги, моталки, летучие ножницы, нажимные устройства приводятся в движение электроприводами *10*.

Нетрудно заключить, что управление такими или подобными сложными технологическими комплексами должно быть в максимальной степени автоматизировано, что и реализуется на практике с помощью автоматизированных систем управления технологическими процессами — АСУ ТП. В общем случае АСУ ТП называется человекомашинная система, обеспечивающая автоматизированный сбор и обработку информации с целью выработки и реализации управляющих воздействий на технологический объект управления в соответствии с принятым критерием управления.

заданных пределах. Положение этой характеристики определяется уровнем задающего сигнала $U_{з.д}$.

Наклон характеристики III будет определяться видом *РД* и коэффициентами усиления элементов схемы. В случае использования П-регулятора давления характеристика будет иметь некоторый наклон (регулирование со статической ошибкой), а в случае наличия ПИ-регулятора схема обеспечит астатическое (с нулевой статической ошибкой) регулирование давления. Расчет коэффициента усиления П-регулятора по каналу давления может быть произведен следующим образом.

PDF Compressor Free Version

Запишем выражение для сигнала управления U_y на входе *ПЧ* для точек *1* и *2*, используя формулу (5.1):

$$U_{y1} = \frac{\omega_{ном}}{k_{эп}} = k_з U_{з.д} - k_д U_{д.д1} = k_з U_{з.д} - k_д k_{д.д} H_{ном}; \qquad (5.2)$$

$$U_{y2} = \frac{\omega_1}{k_{эп}} = k_з U_{з.д} - k_д U_{д.д2} = k_з U_{з.д} - k_д k_{д.д} H_2, \qquad (5.3)$$

где $k_{эп} = \Delta\omega/\Delta U_y$ — коэффициент передачи силовой части электропривода (*ПЧ* + *АД*), рад/(с · В); $k_{д.д}$ — коэффициент передачи датчика давления *ДД*, В/м.

Вычитая (5.3) из (5.2), после преобразований получаем следующую формулу для расчета требуемого коэффициента усиления сигнала датчика давления:

$$k_д = \frac{\omega_{ном} - \omega_1}{k_{эп} k_д (H_2 - H_{ном})}. \qquad (5.4)$$

Обычно требуемая статическая характеристика регулирования III задается требуемым (допустимым) перепадом напора $\Delta H = (H_2 - H_{ном})$ при изменении расхода в абсолютном выражении $\Delta Q = Q_{ном} - Q_2$ или в относительном виде $Q_2^* = Q_2/Q_{ном}$. Так как в соответствии с формулами подобия насоса $Q_2^* = Q_2/Q_{ном} = \omega_1/\omega_{ном} = \omega_1^*$, то формулу (5.4) с учетом этих соотношений можно записать в виде:

$$k_д = \frac{\omega_{ном}(1 - Q_2^*)}{k_{эп} k_д \Delta H}. \qquad (5.5)$$

Расчет параметров схемы на рис. 5.3 приведен в примере 5.1.

Многие технологические процессы реализуются с использованием нескольких взаимосвязанных рабочих машин, например прокатка металла в прокатных станах, изготовление деталей в машиностроении, производство бумаги и т.д. Рассмотрим это на примере стана горячей прокатки, схема которого показана на рис. 5.4.

Комплекс технологического оборудования стана включает в себя нагревательные печи металла *1*, рольганг *2*, вертикальный *3*

и горизонтальный *4* окалиноломатели, черновые *5* и чистовые *7* рабочие клети, летучие ножницы *6*, моталки *9*.

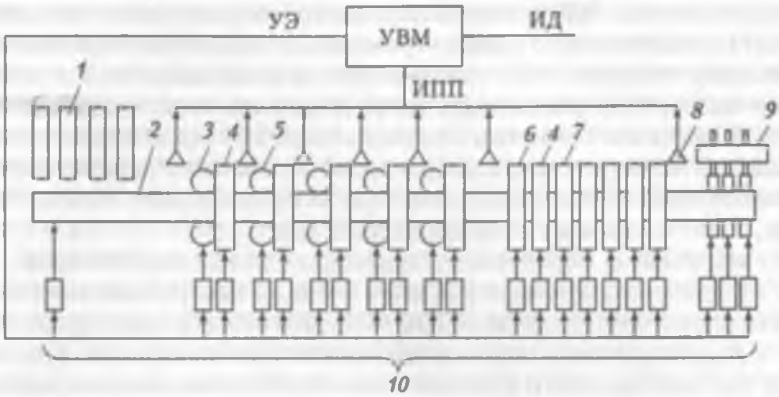


Рис. 5.4. Схема автоматизации стана горячей прокатки

Технологический процесс прокатки металла состоит в следующем. Перед прокаткой металла с помощью специальных нажимных устройств устанавливают необходимые растворы валков всех клетей стана и окалиноломателей. Прокатка металла начинается с разогрева слитков в нагревательных печах *1*. Затем они поступают на транспортирующий рольганг *2* и доставляются к окалиноломателям *3* и *4*, с помощью которых удаляется окалина с их поверхности. Далее слиток поступает в клети черновой группы стана (их может быть 5–6), где производится предварительное обжатие слитка до толщины 20–25 мм.

После черновой группы металл поступает в чистовую группу, состоящую из 7–9 клетей, в которых металл обжимается до заданной толщины. С помощью моталок *9* он сматывается в рулоны и направляется на дальнейшую обработку. Агрегаты прокатного стана — клети, рольганги, моталки, летучие ножницы, нажимные устройства приводятся в движение электроприводами *10*.

Нетрудно заключить, что управление такими или подобными сложными технологическими комплексами должно быть в максимальной степени автоматизировано, что и реализуется на практике с помощью автоматизированных систем управления технологическими процессами — АСУ ТП. В общем случае АСУ ТП называется человекомашинная система, обеспечивающая автоматизированный сбор и обработку информации с целью выработки и реализации управляющих воздействий на технологический объект управления в соответствии с принятым критерием управления.

Применительно к рассматриваемому примеру АСУ ТП работает следующим образом. Для своего функционирования УВМ должна иметь необходимую информационную базу. Она складывается из исходных данных *ИД*, представляющих собой расчетную (оптимальную) математическую модель прокатки, и текущей информации по процессу прокатки *ИПП*, получаемую от установленных на технологическом оборудовании датчиков *8*. Сопоставляя заданные показатели процесса прокатки с реальными, УВМ вырабатывает задающие сигналы (уставки) электроприводов отдельных рабочих машин и механизмов и, при необходимости, их корректирует. Таким образом, УВМ выполняет следующие функции:

PDF Compressor Free Version

- получение, переработку, хранение и поиск информации;
- формирование и выдачу задания (уставок) электроприводам технологического комплекса на основе математической модели прокатки;
- коррекцию математической модели при изменении параметров технологического процесса и соответственно выдаваемых заданий (уставок), что обеспечивает оптимизацию технологического процесса (адаптация или самонастройка системы);
- выдачу полной информации по процессу прокатки.

Для получения объективной информации УВМ может осуществлять статистическую обработку сигналов технологических датчиков.

Промышленное производство часто реализуется не одним, а несколькими взаимосвязанными технологическими процессами. В рассматриваемом примере производства металлического листа исходным изделием является слиток металла, который может быть получен, например, на установке непрерывной разливки стали. После получения листа он может быть направлен на дальнейшую обработку, например покрытие защитным слоем цинка. Совокупность технологических процессов и образует промышленное производство, управление которым целесообразно осуществлять с помощью автоматизированных систем управления производством или предприятием — АСУП.

АСУП должна в общем случае содержать следующие подсистемы: АСУ ТП, автоматизированной технологической подготовки производства, планирования, диспетчеризации, транспортно-накопительную, контроля качества, контроля исполнения, а также сбора, хранения, обработки и выдачи информации.

Следующие, более высокие уровни управления обеспечивают АСУ производственными объединениями, в которые могут входить несколько предприятий, АСУ отрасли и АСУ общегосударственные.

Аппаратная реализация современных систем управления производством всех уровней осуществляется с помощью быстродействующих средств вычислительной техники, к числу которых относятся промышленные программируемые логические контроллеры и компьютеры.

Особенностью конструктивного исполнения промышленных контроллеров является их приспособленность к работе в условиях промышленного производства при значительных изменениях параметров окружающей среды и действии вредных для электронной техники факторов — электромагнитных помех, запыленности, вибрации и т.д. Отличительной чертой контроллеров является возможность их простого программирования, не требующего углубленных знаний по информатике от обслуживающего персонала. Возможность программирования обеспечивается наличием в контроллере памяти, в которую заносятся законы управления объектами и другая необходимая информация.

Контроллер, конструкция которого позволяет встраивать его в технологическое оборудование, которым он управляет, носит название встраиваемого. Автономный контроллер выполняется в виде конструктивно законченного изделия и может размещаться в шкафах управления, на стойках или крепиться к стене. При размещении технологического оборудования на большой территории могут применяться распределенные контроллеры, представляющие собой соединенные линиями связи отдельные модули с одним или несколькими управляющими устройствами.

Компьютеры как основное средство реализации автоматизированных систем управления производством могут иметь разнообразное конструктивное и схемотехническое исполнение. На верхнем уровне управления (АСУП) в качестве УВМ могут использоваться обычные офисные компьютеры, так как управленческий персонал работает в помещениях с комфортными условиями.

В производственных условиях при работе на нижних уровнях управления компьютеры, как и контроллеры, должны иметь специализированное промышленное исполнение. От обычных компьютеров промышленные компьютеры отличаются повышенной устойчивостью к воздействиям окружающей среды — температуре, влажности, вибрациям, действию агрессивных газов и пыли, электромагнитным помехам. Специальное исполнение имеют и средства связи «человек — машина» — дисплеи и клавиатура.

Промышленные компьютеры в виде *индустриальных рабочих станций* характеризуются размещением дисплея, системного блока и клавиатуры в едином конструктиве. *Панельные промышленные компьютеры* характеризуются малыми габаритными размерами и отсутствием клавиатуры, функции которой возлагаются на сенсорный экран.

Пример 5.1. Схема системы автоматического регулирования давления насоса приведена на рис. 5.3. Насос типа КМ 80-50-200 имеет номинальные напор $H_{ном} = 50$ м, расход (производительность) $Q_{ном} = 0{,}014$ м^3/с и скорость вращения $\omega_{ном} = 314$ рад/с.

Насос приводится во вращение двигателем типа 4А132М2 мощностью 11 кВт, который питается от преобразователя частоты. Коэффициент передачи преобразователя частоты составляет $k_{п.ч} = f_н / U_{у.ном} = 50/10 = 5$ Гц/В, где $f_{ном}$, $U_{у.ном}$ — соответственно номинальные частота и входной сигнал управления преобразователя частоты. В схеме используется датчик давления с коэффициентом передачи $k_{д.д} = \Delta U_{д.д} / \Delta H = 0{,}2$ В/м.

PDF Compressor Free Version

Требуется рассчитать параметры *РД*, при которых напор будет изменяться на величину $\Delta H = 5$ м при относительном изменении расхода $Q^* = 0{,}2$.

Рассчитываем коэффициент передачи силовой части электропривода:

$$k_{эп} = \frac{\Delta\omega}{\Delta U_у} = \frac{\Delta\omega_{ном}}{\Delta U_{у.ном}} = \frac{314}{10} = 31{,}4 \text{ рад}/(\text{с}\cdot\text{В}).$$

Для расчета коэффициента усиления сигнала датчика давления используем формулу (5.5):

$$k_д = \frac{\omega_{ном}(1 - Q_2^*)}{k_{эп} k_д \Delta H} = \frac{314(1 - 0{,}2)}{31{,}4 \cdot 0{,}2 \cdot 5} = 8.$$

Примем сопротивление резистора $R_{о.с}$ на схеме рис. 5.3 равным 100 кОм. Тогда сопротивление резистора R_2 составит

$$R_2 = \frac{R_{о.с}}{k_д} = \frac{100}{8} = 12{,}5 \text{ кОм}.$$

Определяем параметры цепи задающего сигнала, для чего из уравнения (5.2) находим произведение

$$k_з U_{з.д} = \frac{\omega_{ном}}{k_{эп}} + k_д k_{д.д} H_{ном} = \frac{314}{31{,}4} + 8 \cdot 0{,}2 \cdot 50 = 90 \text{ В}.$$

Принимая $k_з = k_д = 8$, находим величину задающего сигнала $U_{з.д}$ для получения характеристики *3*:

$$U_{з.д} = \frac{90}{k_з} = \frac{90}{8} = 11{,}25 \text{ В}.$$

5.2. РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД КАК СРЕДСТВО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Эффективное использование энергии является одной из важнейших современных проблем народного хозяйства. Ее решение позволит снизить расход энергетических и материальных ресурсов при

производстве промышленной и сельскохозяйственной продукции, уменьшить большие непроизводительные расходы государства и населения в сфере жилищно-коммунального хозяйства, улучшить экологическую обстановку в стране. Важную роль в решении этой проблемы играет электропривод, который является основным потребителем электрической энергии. В общем случае энергосбережение может осуществляться как в самом электроприводе, так и в обслуживаемых им технологических процессах, где используется вырабатываемая им механическая энергия.

Применение регулируемого электропривода позволяет обеспечить энергосбережение при реализации многих технологических процессов. Например, регулирование за счет электропривода скорости ленты транспортера, подающего детали в закалочную печь, позволяет минимизировать количество тепловой энергии на их закалку в зависимости от сортамента, технологии закалки и других факторов. Весьма эффективно регулируемый по скорости электропривод может обеспечить энергосбережение в таких рабочих машинах, как насосы, вентиляторы и компрессоры. Поскольку эти рабочие машины широко используются в промышленности, на транспорте, в сельском и жилищно-коммунальном хозяйствах, энергосбережение в насосных установках средствами электропривода является целесообразным и оказывается очень эффективным. Рассмотрим эффект энергосбережения на примере электропривода центробежного насоса.

Особенностью работы многих насосных установок является изменение количества (расхода) подаваемой ими потребителю жидкости (воды). Например, потребление воды от насосов в жилых зданиях меняется в течение суток, имея два максимума — утренний и вечерний, как это показано на рис. 5.5. Возможность энергосбережения при использовании регулируемого по скорости электропривода можно показать с помощью так называемых формул приведения, связывающих расход Q, напор H и потребляемую насосом мощность P с его скоростью вращения. Для двух значений скорости вращения рабочего колеса насоса ω_1 и ω_2 справедливы следующие соотношения:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}; \tag{5.6}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2; \tag{5.7}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^3. \tag{5.8}$$

Из формул (5.6)–(5.8) видно, что расход можно уменьшать за счет пропорционального снижения скорости вращения насоса, при этом будут снижаться напор (пропорционально квадрату отношения скоростей) и потребляемая насосом мощность (пропорционально кубу отношения скоростей). Тем самым, обеспечивая необходимый расход жидкости, насос будет работать с меньшими напором и потреблением энергии из сети, что и определит эффект энергосбережения.

PDF Compressor Free Version

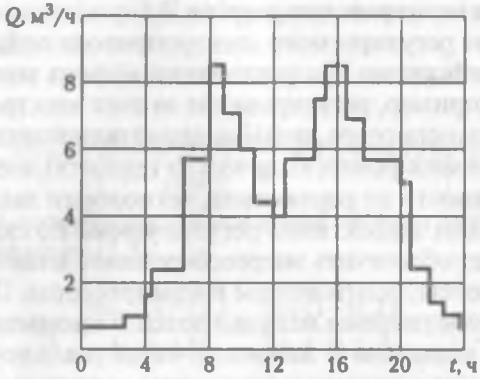


Рис. 5.5. График водопотребления от насосной установки

Расход Q, напор H и потребляемая из сети мощность $P_{потр}$ связаны между собой следующим соотношением:

$$P_{потр} = \frac{\rho g H Q}{\eta_{ном}\eta_{эп}}, \qquad (5.9)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м³; $g = 9{,}81$ м/с² — ускорение свободного падения; $\eta_{ном}$, $\eta_{эп}$ — соответственно КПД насоса и электропривода. Напор H в этой формуле измеряется в метрах, а расход Q — в м³/с.

Потребляемая за время $T_р$ электроприводом электроэнергия $A_{потр}$ находится по формуле:

$$A_{потр} = T_р P_{потр} = \frac{T_р \rho g H Q}{\eta_{ном}\eta_{эп}}. \qquad (5.10)$$

Экономия электроэнергии за время работы $T_р$ насоса с расходом Q за счет снижения напора со значения H_2 при неизменной скорости насоса до уровня H_1 при снижении его скорости составит:

$$A_{эк} = \frac{\rho g (H_2 - H_1) Q T_р}{\eta_{ном}\eta_{эп}}. \qquad (5.11)$$

Примеры реализации регулируемого электропривода насосов в системах водоснабжения показывают, что экономия электроэнергии может доходить до 50% и более в зависимости от вида и режимов работы насосных установок. Кроме этого, работа сетей с меньшими напорами будет характеризоваться и сокращением утечек воды (до 15–20% и более) в сетях и арматуре. Применительно к насосам с электроприводами переменного тока для регулирования скорости двигателей обычно используют статические преобразователи частоты.

Пример 5.2. Насос типа КМ 80-50-200 обеспечивает водоснабжение жилого дома и имеет следующие паспортные данные: $H_н = 50$ м, $Q_{ном} = 0{,}014$ м³/с, КПД $\eta_{ном} = 0{,}63$. В год насос работает с номинальным расходом $Q_{ном}$ в течение 1600 ч, с расходом $0{,}4Q_{ном}$ в течение 4000 ч и с расходом $0{,}2Q_{ном}$ в течение 2400 ч. Характеристика насоса выражается формулой

$$H = 62{,}5 - 63800\,Q_2. \qquad (5.12)$$

Насос приводится во вращение асинхронным двигателем типа 4А132М2 мощностью 11 кВт, имеющим КПД $\eta_{эд} = 88\%$.

Определить экономию электроэнергии при использовании регулируемого электропривода. Принять, что КПД насоса при изменении его расхода и двигателя при регулировании его скорости не изменяются.

Экономию электроэнергии находим, сопоставляя потребление электроэнергии нерегулируемого и регулируемого по скорости электропривода. КПД насоса и ЭП примем неизменными и равными номинальным.

1. Нерегулируемый электропривод

Для каждого уровня расхода Q находим по (5.12) напор H и далее по (5.9) и (5.10) — соответственно потребляемые мощность и энергию. Результаты расчета представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Результаты расчета нерегулируемого электропривода

Q, м³/с	H, м	$T_р$, ч	$P_{потр}$, кВт	$A_{потр}$, кВт
0,014	50	1600	12,63	20208
0,0056	60,5	4000	6,11	24440
0,028	62	2400	3,13	7512

Потребление электроэнергии за все время работы насосной установки составит 52 160 кВт·ч.

2. Регулируемый электропривод

Данные при работе регулируемого электропривода представлены в табл. 5.2. Расчет значений H и $P_{потр}$ при этом осуществлялся по формулам (5.7) и (5.8) по условию пропорциональности расхода Q и скорости вращения насоса (5.6).

Таблица 5.2

Результаты расчета регулируемого электропривода

Q, м³/с	H, м	$T_р$, ч	$P_{\_\_}$, кВт	$A_{\_\_}$, кВт
0,014	50	1600	12,63	20208
0,0056	9,7	4000	0,4	1600
0,028	2,5	2400	0,025	60

PDF Compressor Free Version

Потребление электроэнергии в этом случае составит 21 868 кВт·ч, а искомая экономия $A_{эк}$ = 30 292 кВт·ч. С использованием данных по тарифу на электроэнергию далее может быть рассчитана и экономия в рублевом выражении.

5.3. АСУ СТРОИТЕЛЬСТВОМ

АСУ строительством (АСУС) представляет собой специализированную АСУ, в максимальной степени учитывающую специфику строительной отрасли. Строительство как производственный процесс характеризуется многими специфическими признаками:

- участие в процессе строительства большого числа исполнителей, принадлежащих к различным отраслям промышленности;
- многообразие и высокая сложность продуктов производства — объектов строительства;
- значительное влияние природно-погодных факторов;
- особенности самого производственного процесса, требующего систематического перемещения строительно-монтажных бригад и средств механизации.

АСУС, как и любая сложная система, состоит из совокупности взаимосвязанных и взаимодействующих частей, которые обычно называются подсистемами. Предприятия строительной индустрии (домостроительные комбинаты, заводы железобетонных изделий и т.д.) обладают всеми чертами промышленных предприятий, и на них могут действовать рассмотренные выше локальные АСУ и АСУ технологических процессов и отдельных предприятий. Эти АСУ являются подсистемами АСУС.

Помимо них, АСУ крупных строительных объединений, имеющих в своем составе проектные, строительные и специализированные организации стройиндустрии, включают в себя и ряд других функциональных подсистем, которые обеспечивают:

- управление подготовкой строительного производства;
- текущее и оперативное планирование;
- оперативное управление;
- строительное производство;
- учет и отчетность.

Помимо них в составе АСУС могут формироваться подсистемы управления качеством и научно-техническим прогрессом, перспективного планирования, управления транспортом, средствами механизации и др.

Каждая из перечисленных подсистем решает свой комплекс задач, входящих в ведение АСУС. Так, например, в перечень задач подсистемы управления подготовкой строительного производства входит: разработка проектов зданий и сооружений, проектирование организации и технологии производства строительно-монтажных работ, расчеты потребности в материальных ресурсах, разработка оперативно-производственной документации по поставкам, расчеты развития и размещения собственной производственной базы, проектирование организации и технологии производства продукции на собственных предприятиях, расчеты потребности в средствах механизации и транспорта и разработка оперативных графиков их использования, расчеты численности и профессионального состава строительных кадров, развитие нормативной базы строительства.

Функционирование АСУС обеспечивается комплексом средств получения, регистрации и обработки, передачи, а также обработки и отображения информации.

Получение первичной информации осуществляется с помощью двух групп устройств. К первой из них относятся датчики различных физических величин — температуры, давления, расходов жидкости или газов, скорости вращения двигателей и пр., которые характеризуют различные технологические процессы в строительной индустрии. Ко второй группе относятся устройства регистрации и обработки учетно-производственной информации — данных о ходе выпуска продукции, движении средств материально-технического снабжения, табельного учета и т.д. В их качестве используются счетно-клавишные и фактурные машины, алфавитно-цифровые регистраторы и другие устройства, позволяющие наряду с регистрацией осуществлять также и первичную обработку информации по простейшим алгоритмам.

В качестве средств передачи информации могут использоваться любые известные средства связи — телефонная и телеграфная, радиосвязь, различные приемно-передаточные устройства.

Обработка информации является основной и наиболее важной операцией в общей схеме процесса информатизации работы АСУС, осуществляемой с использованием ЭВМ.

Средства отображения и выдачи информации служат для завершения технологического процесса обработки информации в АСУС и выдачи результатов обработки в форме, удобной для их использования при принятии управленческих решений. В их качестве используются устройства печати, световые табло, дисплеи, мне-

мосхемы, а также различные машинные носители информации, которые позволяют хранить и использовать по мере необходимости полученную информацию.

PDF Compressor Free Version

Схема размещения и взаимодействия элементов комплекса технических средств определяется характером объекта управления и используемыми в процессе управления объемами информации.

Множество решаемых АСУС задач, сложность ее структуры и разнообразие применяемых в ней технических средств требуют при ее создании использования системы автоматизированного проектирования — САПР. Ее применение позволяет существенно сократить сроки и стоимость разработки АСУС и ее подсистем и одновременно повысить эффективность их функционирования. Важным является и то обстоятельство, что в процессе автоматизированного проектирования создается база данных по объекту управления, определяются и выбираются методы и технические средства автоматизации его работы, разрабатывается информационно-вычислительный комплекс АСУС, что непосредственно используется в последующем уже на стадии работы АСУС и ее подсистем. Тем самым САПР и АСУС образуют взаимосвязанную комплексную систему, применение которой позволяет обеспечивать как эффективное проектирование, так и функционирование АСУС.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие уровни может иметь автоматизированная система управления производством?
2. Что позволяет обеспечить автоматизация технологических процессов?
3. Какие компьютерные средства применяются в АСУ ТП и АСУП?
4. Каким образом осуществляется поддержание давления насосной установки в замкнутой системе автоматического регулирования?
5. В чем состоят особенности конструкции промышленных контроллеров и компьютеров?
6. В чем важность задачи по эффективному использованию энергии?
7. За счет чего осуществляется экономия электроэнергии в насосных установках при использовании регулируемого электропривода?
8. В чем состоят особенности АСУ строительством?
9. Какие подсистемы входят в состав АСУ строительного объединения?
10. Какие технические средства используются в АСУС?
11. Что представляет собой система автоматизированного проектирования АСУ?

Глава 6
НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

6.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Интенсификация технологических процессов, повышение производительности и точности работы промышленного оборудования неразрывно связаны с усложнением общей схемы автоматизации производства в целом и электропривода в частности. В этих условиях на первый план выдвигается важная проблема обеспечения надежной работы автоматизированного электрооборудования, выход из строя которого может привести к выпуску бракованной продукции, снижению производительности труда, потерям сырья и энергии, остановке, а иногда и к авариям рабочих машин и механизмов, т.е. к большим экономическим потерям. Задача повышения надежности электроприводов является сложной и комплексной проблемой, которая должна решаться как на стадии проектирования и изготовления его элементов, так и при его монтаже, наладке и эксплуатации.

Надежность — это свойство электропривода «сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортировки» [9]. Надежность представляет собой комплексное свойство, сочетающее в себе понятия работоспособности, безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохранности.

Работоспособность представляет собой состояние электропривода, при котором он способен выполнять свои функции. Событие, нарушающее работоспособность электропривода, называется отказом. Самоустраняющийся отказ называется сбоем.

Безотказность — свойство электропривода непрерывно сохранять свою работоспособность в течение определенного времени.

Долговечность — свойство электропривода сохранять свою работоспособность до предельного состояния, когда его эксплуатация становится невозможной по техническим или экономическим причинам, условиям техники безопасности или из-за необходимости капитального ремонта. Период времени от начала эксплуатации до предельного состояния называют сроком службы или наработкой ЭП.

Ремонтопригодность определяет приспособленность электропривода к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

PDF Compressor Free Version

Сохраняемость — свойство электропривода непрерывно поддерживать свою работоспособность в течение и после хранения и транспортировки.

Основными количественными показателями надежности являются вероятность безотказной работы, интенсивность отказов и средняя наработка до отказа.

Вероятность безотказной работы $p(T_{зд})$ представляет собой вероятность того, что время работы электропривода до отказа будет больше указанного периода времени $T_{зд}$. Этот показатель определяется отношением числа электроприводов, безотказно проработавших до момента времени $T_{зд}$, к общему числу электроприводов, работоспособных в начальный момент.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ — это число отказов электроприводов в единицу времени, отнесенное к среднему числу электроприводов, работоспособных к моменту времени t.

Вероятность безотказной работы $p(T_{зд})$ и интенсивность отказов $\lambda(t)$ связаны между собой следующим соотношением:

$$p(T_{зд}) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t)\,dt\right]. \qquad (6.1)$$

Средняя наработка до отказа $T_{ср}$ представляет собой математическое ожидание наработки электропривода до первого отказа:

$$T_{ср} = \int_0^\infty R(t)\,dt. \qquad (6.2)$$

С позиций анализа надежности электропривода как электромеханической системы различают два вида соединения элементов: логически последовательное, или основное, и логически параллельное.

Логически последовательным (основным) соединением называется такое соединение элементов, при котором отказ любого из них приводит к отказу системы в целом. *Логически параллельное соединение* характеризуется тем, что отказ системы наступает только при отказе всех элементов.

Электропривод представляет собой совокупность (систему) взаимосвязанных электрических и механических устройств — двигателя, преобразователя, редуктора, схемы управления, каждое из которых имеет свой показатель надежности. Надежность электропривода как системы характеризуется *потоком отказов* Λ. Если принять логически последовательным соединение N компонентов

электропривода, то этот показатель надежности будет численно равен сумме интенсивностей отказов отдельных компонент λ_i:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^{i=N} \lambda_i. \qquad (6.3)$$

По формуле (6.3) рассчитывается поток отказов и отдельных устройств электроприводов, состоящих, в свою очередь, из различных узлов и элементов, характеризующихся своей интенсивностью отказов.

6.2. МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

В теории надежности разработано несколько методов расчета надежности, из которых наибольшее распространение получили [21]:

- метод расчета по среднегрупповым значениям интенсивностей отказов;
- метод расчета с использованием данных эксплуатации;
- коэффициентный метод расчета надежности.

При расчете надежности электроприводов и других систем и устройств наиболее часто используется *коэффициентный метод расчета надежности*. Сущность его состоит в том, что при расчете надежности используют не абсолютные значения интенсивности отказов элементов, а коэффициенты надежности K_i, представляющие собой отношения интенсивности отказов элемента λ_i к интенсивности отказов некоторого базового элемента $\lambda_б$

$$\Lambda = \sum_{i=1}^{i=N} \lambda_б. \qquad (6.4)$$

Коэффициенты надежности K_i практически не зависят от условий эксплуатации и для данного элемента являются константой, а условия эксплуатации и режимы работы элемента учитываются с помощью поправочных коэффициентов к величине K_i. Обычно в качестве базового элемента выбирается металлопленочный резистор.

Для расчета показателей надежности электроприводов необходимо знать коэффициенты надежности K_i входящих в него устройств (элементов), число устройств данного типа N_i и интенсивность отказов $\lambda_б$ базового элемента. Поток отказов электропривода при этом определяется с помощью следующего выражения:

$$\Lambda = \lambda_б \sum_{i=1}^{r} N_i K_i. \qquad (6.5)$$

Влияние на надежность элементов основных дестабилизирующих факторов: электрических нагрузок и температуры окружа-

ющей среды — учитывается введением в расчет поправочных коэффициентов. Зависимости этих коэффициентов в функции температуры окружающей среды и коэффициентов нагрузки по току k_I, напряжению k_U и мощности k_P в виде соответствующих графиков приведены в [24].

PDF Compressor Free version

Учет влияния других факторов: запыленности, влажности, вибрации и т.д. — может быть выполнен коррекцией интенсивности отказов базового элемента с помощью поправочных коэффициентов, также приведенных в [24].

Результирующий коэффициент надежности элементов электропривода с учетом электрических нагрузок и температуры окружающей среды (исключая релейно-контакторную аппаратуру) рассчитывается по формуле

$$K_i' = a_1 a_2 a_3 a_4 K_i, \tag{6.6}$$

где a_1 — коэффициент, учитывающий отклонение температуры окружающей среды и электрической нагрузки от номинальной; a_2 — коэффициент, учитывающий отклонение температуры окружающей среды от номинальной; a_3 — коэффициент, учитывающий снижение электрической нагрузки относительно номинальной; a_4 — коэффициент использования элемента, определяемый отношением времени работы элемента к времени работы электропривода; K_i — номинальное значение коэффициента надежности.

Коэффициент надежности релейно-контактных аппаратов определяется по формуле

$$K_i' = a_5 K_{i0} + \left(\sum_1^m a_6 K_{i\text{к.с}} \right) \frac{f_\phi}{f_{\text{ном}}}, \tag{6.7}$$

где a_5 — коэффициент, учитывающий время нахождения катушки аппарата под напряжением в течение одного цикла «включено — выключено» и температуру окружающей среды; K_{i0}, $K_{i\text{к.с}}$ — соответственно коэффициенты надежности воспринимающей (цепь катушки) и исполнительной (контактная система) частей аппаратуры; a_6 — коэффициент, учитывающий уровень электрической нагрузки контакта; m — число контактов; f_ϕ и $f_{\text{ном}}$ фактическая и номинальная частоты срабатывания аппарата в час.

После определения коэффициентов надежности отдельных элементов рассчитываются показатели надежности электропривода в целом. Порядок их расчета состоит в следующем [24]:

• определяются количественные значения параметров, характеризующие нормальную работу электропривода, и допуски на их возможные отклонения. Работа электропривода в пределах этих

допусков соответствует его работоспособному состоянию, а выход за них — отказу;

• составляется поэлементная принципиальная схема электропривода, определяющая соединение элементов при выполнении ими заданных функций. При ее составлении вспомогательные элементы (сигнальные лампы, показывающие приборы, звонки и т.д.), отказы которых не влияют на надежность электропривода, могут быть опущены;

• определяются исходные данные для расчета надежности: тип, количество и номинальные данные используемых элементов; режимы работы элементов; температура окружающей среды в месте работы элементов; номинальные коэффициенты надежности элементов; коэффициенты использования элементов во времени; период времени $T_э$, для которого рассчитывается надежность; условия эксплуатации системы. Выбирается базовый элемент, и определяется $\lambda_б$;

• по формулам (6.6) и (6.7) с использованием справочных данных по поправочным коэффициентам a_1—a_4 рассчитываются коэффициенты надежности элементов электропривода, а затем его узлов и устройств. После этого определяются основные показатели надежности электропривода. При логически последовательном (основном) соединении элементов, узлов и устройств вероятность безотказной работы

$$p(T_э) = \exp\left[-\lambda_б T_э \sum_{i=1}^{n} N_i K_i'\right], \qquad (6.8)$$

где N_i — число однотипных элементов i-й группы в электроприводе; n — общее число элементов в электроприводе, имеющих логически последовательное соединение.

Наработка до отказа электропривода

$$T_о = \frac{1}{\left[-\lambda_б \sum_{i=1}^{n} N_i K_i'\right]}. \qquad (6.9)$$

Если в схеме ЭП имеется логически параллельное соединение элементов (блоков), например резервирование, то сначала рассчитываются показатели надежности отдельно для этих элементов, а затем электропривода в целом; найденные показатели надежности сравниваются с требуемыми по техническому заданию. Если они не соответствуют требованиям технического задания или условиям эксплуатации, то принимаются меры к повышению надежности электропривода.

Пример расчета. Рассчитать основные показатели надежности для безредукторного электропривода вентилятора. Схема электропривода (рис. 3.8), включает асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, магнитный пускатель *KM* со встроенными тепловыми реле *KK*, автоматический выключатель *QF*, предохранители *FA*, кнопки управления *SB1* и *SB2*. Электропривод работает в закрытом помещении с повышенной запыленностью при температуре окружающей среды 50°С в длительном режиме.

PDF Compressor Free Version

Для расчета в соответствии с рекомендациями [24] принимаем интенсивность отказов базового элемента $\lambda_б = 0{,}3 \cdot 10^{-7}$ 1/ч. Учет повышенной запыленности помещения в соответствии с данными [24] учтем коэффициентом $k = 2{,}5$. Таким образом, интенсивность отказов базового элемента составит $\lambda'_б = k\lambda_б = 0{,}3 \cdot 10^{-7} \cdot 2{,}5 = 0{,}75 \cdot 10^{-7}$ 1/ч. При расчете принимаем логически последовательную (основную) схему.

Расчет показателей надежности проводим с учетом поправочных коэффициентов по надежности элементов схемы на рис. 3.8.

Элемент	Поправочные коэфициенты по надежности										
	K_i	$K_{iо}$	$K_{iк}$	$K_н$	a_1	a_2	a_3	a_4	K'_i	N_i	$N_iK'_i$
M	252	—	—	0,85	3,5	1	0,8	4,4	3105	1	3105
$KM_{цк}$	—	20	—	0,6	—	—	0,52	—	10	1	10
$KM_{вс}$	—	—	25	—	—	—	—	4,4	110	1	110
$KK_{цк}$	—	10	—	0,6	—	—	0,52	—	5	2	10
$KK_{вс}$	—	—	17,8	—	—	—	—	4,2	75	2	150
QF	4,6	—	—	0,6	—	—	—	4,4	20	1	20
SB1	5	—	—	0,8	—	—	—	0,3	2	1	2
SB2	5	—	—	0,6	—	—	—	4,2	21	1	21
FA	25	—	—	0,6	1	1	0,52	4,2	55	3	165

Примечание. $KM_{ц.к}$, $KK_{ц.к}$ и $KM_{к.с}$, $KK_{к.с}$ — соответственно цепи катушек в контактных системах контактора *KM* и реле *KK*.

Сумма произведений $N_iK'_i$ для электропривода составляет 3612.

Рассчитываем наработку до отказа и вероятность безотказной работы за время $T_з = 5000$ ч:

$$T_о = \frac{1}{\left[-\lambda_б \sum_{i=1}^{n} N_i K'_i\right]} = \frac{1}{0{,}75 \cdot 10^{-7} \cdot 3612} = 3691 \text{ ч};$$

$$p(T_з) = \exp\left[-\lambda_б T_з \sum_{i=1}^{n} N_i K'_i\right] = \exp\left[-0{,}75 \cdot 10^{-7} \cdot 5000 \cdot 3612\right] = 0{,}26.$$

6.3. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Обеспечение надежности электроприводов на стадии проектирования. Эффективное функционирование рабочих машин и механизмов возможно лишь при надежной работе электроприводов их исполнительных органов. Основы такой надежной работы закладываются уже на стадии проектирования и конструирования электроприводов, когда за счет различных технических решений обеспечивается минимально возможная интенсивность их отказов и тем самым максимальные времена наработки до отказа.

Эффективным средством повышения надежности электроприводов является введение различного вида избыточности, под которой подразумеваются дополнительные средства и возможности, превышающие минимально необходимые для выполнения заданных функций. Избыточность может быть внутриэлементной, структурной и временной.

Внутриэлементная избыточность предусматривает снижение электрических нагрузок на электрические элементы и устройства электропривода. Это достигается заменой одного элемента другим, функционально подобным, но с более высокими определяющими (номинальными) параметрами. Например, применение конденсатора с номинальным напряжением выше расчетного создает запас электрической прочности и тем самым повышает надежность работы конденсатора в схеме.

Структурная избыточность, называемая также резервированием, предполагает включение в схему электропривода дополнительных резервных элементов, блоков и устройств, что позволяет создавать даже из не очень надежных компонент надежные электроприводы. Важно отметить, что включение в схему ЭП дополнительных элементов, блоков и устройств увеличивает его массу, габаритные размеры и стоимость, поэтому применение этого способа должно быть экономически обосновано.

Резервирование может быть самым разнообразным по своей реализации. *Общее резервирование* предусматривает резервирование ЭП в целом, а *раздельное* — отдельных его компонент.

При *постоянном резервировании* дополнительные элементы и устройства подсоединены к основным (рабочим) в течение всего времени работы электропривода и находятся с ними в одинаковых условиях. При *резервировании замещением* дополнительные элементы включаются в работу только после отказа основных.

Временная избыточность предусматривает использование технологических резервов времени для восстановления работоспособнос-

ти электроприводов. Например, такой резерв времени для электропривода станка, работающего в составе автоматической линии, может быть создан за счет накопления некоторого запаса обработанных на нем деталей. Если время восстановления работоспособности ЭП (например, за счет ввода резерва) будет меньше времени, за которое будет израсходован этот запас деталей, то простоя линии не будет.

PDF Compressor Free Version

Повышение эксплуатационной готовности электроприводов. Высокие показатели надежности электроприводов, заложенные на стадии проектирования, еще не гарантируют высокую эксплуатационную готовность к работе приводимых ими в движение машин и механизмов. Например, отказы в электроприводах могут возникать редко, но требуют большого времени для их обнаружения и ликвидации или, как говорят, большого времени восстановления работоспособности ЭП. В этом случае технологическое оборудование будет значительное время простаивать, что вызовет, очевидно, экономические убытки. Таким образом, эксплуатационная готовность ЭП определяется еще и приспособленностью их к обнаружению неисправностей и отказов и устранению этих дефектов путем ремонтов и технического обслуживания, что и было ранее названо ремонтопригодностью.

Количественно эксплуатационная готовность ЭП определяется *коэффициентом готовности*:

$$K_{\text{г}} = \frac{T_{\text{о}}}{T_{\text{о}} + T_{\text{в}}}, \qquad (6.10)$$

где $T_{\text{о}}$ — средняя наработка до отказа, ч; $T_{\text{в}}$ — среднее время восстановления (средняя продолжительность отказа), представляющее собой математическое ожидание времени восстановления работоспособности электропривода, ч.

В некоторых случаях готовность ЭП оценивается коэффициентом технического использования:

$$K_{\text{т.и}} = \frac{T_{\text{о}}}{T_{\text{о}} + T_{\text{в}} + T_{\text{обсл}}}, \qquad (6.11)$$

где $T_{\text{обсл}}$ — суммарное время простоев из-за планового и внепланового технического обслуживания электропривода, ч.

Чем ближе коэффициент $K_{\text{г}}$ к единице, тем выше технический уровень электропривода и тем эффективнее может быть использовано технологическое оборудование.

Как следует из (6.10), для получения большого коэффициента готовности следует в максимальной степени сокращать время восстановления $T_{\text{в}}$. В общем случае это время складывается из интервала между моментами возникновения отказа и начала ремонта (период обнаружения отказа) $T_{\text{обн}}$ и времени ремонта электропривода (период лик-

видации отказа) $T_р$. Таким образом, сокращение времени восстановления работоспособности электропривода $T_в$ определяется сокращением сроков на обнаружение и ликвидацию отказа (неисправности). Рассмотрим технические мероприятия, позволяющие сократить время $T_в$ и тем самым повысить коэффициент готовности электропривода и обслуживаемого им технологического оборудования.

Сокращение времени обнаружения отказа $T_{обн}$ обеспечивается главным образом за счет использования схем контроля за работой отдельных устройств электропривода. При возникновении неисправности или отказа схема контроля обеспечивает звуковую или световую сигнализацию, а в аварийных ситуациях — и срабатывание защиты электропривода. Простейшей функцией схем контроля и сигнализации является, например, световая сигнализация о состоянии электрических аппаратов схем управления электроприводов, наличии или отсутствии напряжения или тока на входах или выходах электротехнических устройств ЭП.

Развитие схем контроля связано с созданием диагностирующих устройств на основе микропроцессорных средств, позволяющих получать, запоминать, обрабатывать и распределять большие объемы информации за короткое время. Например, сопоставляя заданные и истинные (текущие) значения электрических сигналов в устройствах, элементах и узлах электропривода, система диагностики способна оценить их работоспособность и выдать информацию о месте и характере неисправности.

Эффективность действия схем контроля и диагностики в значительной степени определяется схемотехническим и конструктивным исполнением устройств электропривода. Если они построены по блочно-модульному принципу, имеют необходимое количество удобных контрольных точек (выводов) электрических цепей и элементов сигнализации, то время обнаружения неисправного блока или устройства существенно сокращается.

Снижению времени поиска неисправностей или отказов способствуют также наличие мнемосхемы электропривода и его отдельных устройств, достоверной и удобной в использовании технической документации на его компоненты и соответствующих обозначений и надписей на них, целенаправленная работа по обобщению данных о возникающих неисправностях и отказах эксплуатируемых электроприводов, постоянное повышение квалификации обслуживающего персонала.

Входящие в состав электроприводов устройства по своему конструктивному исполнению являются, как правило, восстанавливаемыми или, другими словами, ремонтируемыми. *Время ремонта* $T_р$ устройств и блоков электропривода определяется главным образом уровнем орга-

низации служб ремонта и материально-технического снабжения предприятия. В общем случае ремонт оборудования может осуществляться соответствующим персоналом участка, цеха или централизованно в пределах предприятия (объединения) или же с помощью сторонней организации (в том числе и при гарантийном ремонте).

PDF Compressor Free Version

Организация ремонта неисправного блока может осуществляться по двум вариантам. В первом случае после обнаружения отказа неисправный блок ремонтируется, а электропривод и соответствующее технологическое оборудование в это время не работают (простаивают). При значительном времени ремонта такая его организация приводит к большим экономическим убыткам.

При втором, целесообразном варианте организации ремонтной службы в ее распоряжении должен находиться комплект запасных элементов и блоков электропривода. В этом случае при отказе электропривода время его ремонта определяется только заменой неисправного блока на запасной, что не приводит к длительному простою оборудования. Изъятый из схемы неисправный блок ремонтируется и через некоторое время вновь становится исправным и вводится в число запасных. Очевидно, что и в этом случае блочно-модульный принцип исполнения ЭП позволяет получить существенный экономический эффект.

Нетрудно заметить, что если время работы электропривода между отказами блока какого-либо типа будет больше времени ремонта этого блока, то для исключения простоя ЭП достаточно иметь в запасе только один такой запасной блок.

Повышение надежности электропривода за счет обеспечения его помехозащищенности. Работа электропривода характеризуется действием как полезных электрических сигналов, обеспечивающих надлежащее (расчетное) его функционирование, так и вредных, непредсказуемых заранее (случайных) возмущений, называемых *помехами*. Помехи вызывают сбои в работе элементов и узлов электропривода, а иногда и их повреждения, снижая тем самым надежность его работы и усложняя его наладку и эксплуатацию. Особенно чувствительны к помехам электронные устройства управления электропривода, оперирующие маломощными электрическими сигналами.

Повышение помехозащищенности электропривода должно осуществляться подавлением как собственных, так и внешних помех. Поэтому любой электропривод должен быть спроектирован, изготовлен и смонтирован таким образом, чтобы, с одной стороны, его компоненты не создавали помех друг другу и соседним электроустановкам, а с другой стороны, он должен быть защищен от воздействия внешних помех, создаваемых другими электроустановками. Рассмотрим технические мероприятия, которые позволяют по-

высить помехозащищенность электропривода и тем самым надежность и качество его работы.

Собственные помехи. Основными источниками помех в электроприводах являются электрические двигатели, релейно-контакторная аппаратура, тиристорные преобразователи и электромагнитные устройства. Такие помехи могут создаваться также при коротких замыканиях в электрических цепях, при возникновении перенапряжений, связанных с отключением цепей с индуктивностью, при изменении напряжений на соседних проводах.

Помехи в электрических двигателях создаются при коммутации, нарушении контакта между щетками и коллектором или контактными кольцами, вибрации вала. Для подавления этих видов помех применяются различные фильтры, дополнительные компенсационные обмотки, слоистые, тщательно притираемые щетки, металлизация внутренней поверхности пластмассовых корпусов. Кроме того, должен быть осуществлен надежный электрический контакт между частями двигателя, а также тщательная их сборка.

Помехи возникают при работе электрических аппаратов и различных электромагнитных устройств — тормозов, муфт, фиксирующих приспособлений, электромагнитов. При их отключении на обмотках аппаратов и одновременно на подводящих проводах появляются перенапряжения, которые могут во много раз превышать номинальный (рабочий) уровень и вызвать как пробой изоляции обмоток, так и появление помех в питающей сети и окружающей среде.

Уменьшение перенапряжений и тем самым уровня помех обычно осуществляется с помощью схем, в которых применяются резисторы, диоды, стабилитроны, варисторы, конденсаторы. Наибольшее распространение в силу универсальности, простоты и эффективности нашли так называемые *R-C* цепочки. Будучи включенными параллельно катушке аппарата или электромагнитного устройства, они существенно гасят амплитуду и скорость нарастания перенапряжений, вызванных процессом отключения. Расчет величин *R* и *C* осуществляется исходя из параметров обмотки и допустимого уровня перенапряжения.

Помехи при работе реле, контакторов, магнитных пускателей и другой коммутационной аппаратуры возникают при вибрациях и дребезге их контактов, а также при пробое или возникновении дуги в межконтактном промежутке. Снижение этого вида помех достигается применением искро- и дугогасителей и фильтров; схем, осуществляющих коммутацию при равенстве нулю тока (напряжения) в цепи; экранированных кабелей; кабелей со скрученными жилами.

Помехи при работе тиристорных преобразователей возникают из-за искажения ими синусоидальной формы напряжения и тока, вслед-

ствие чего создаются высокочастотные помехи (гармоники напряжения и тока). Кроме того, тиристорные преобразователи создают помехи за счет постоянно идущих в них коммутационных процессов, связанных с открытием одних тиристоров и закрытием других.

PDF Compressor Free Version

Наиболее эффективным средством подавления помех тиристорных преобразователей является установка различных фильтров. Другой путь подавления создаваемых ими помех связан с выбором таких режимов работы преобразователей и способов управления ими, при которых искажения кривых напряжения и тока будут минимально возможными.

Внешние помехи. Внешние помехи на электропривод могут поступать через цепи питания или за счет действия электростатических и электромагнитных полей, создаваемых соседними электроустановками. К таким установкам кроме электроприводов относятся электрический транспорт, воздушные линии и подстанции электропередач, электросварочное оборудование, различные высокочастотные промышленные и научные установки, автомобили с двигателями внутреннего сгорания, вычислительные комплексы. Способы подавления внешних помех определяются тем, поступают ли они в электропривод по проводам (гальванические помехи) или за счет действия электростатического или электромагнитного полей (емкостные или индуктивные помехи).

Гальванические помехи могут поступать в схему электропривода в том случае, когда он имеет общие для нескольких электроустановок цепи питания или общий провод.

Снижение влияния гальванических помех через питающую сеть достигается следующими основными мероприятиями:

- установкой *R-L-C* фильтров в месте подсоединения электропривода к питающей сети;
- использованием отдельных блоков питания для устройств управления электропривода или питанием их через гальванически развязанные вторичные обмотки распределительного трансформатора;
- применением проводки с максимально возможным расстоянием между проводами системы питания и внутренней разводки. При этом цепи питания целесообразно выполнять из максимально коротких проводов большого сечения.

Кроме цепи питания помехи могут поступать на элементы и устройства электропривода через общий провод, относительно которого определяется потенциал сигнальных (измерительных) проводников и точек схем управления. Эффективным средством борьбы с такого рода помехами является соединение общего провода схемы управления электропривода с заземляющим контуром. В результате помехи, поступа-

ющие на электропривод через сеть питания или возникающие из-за наличия паразитных емкостных связей через кожухи блоков управления и корпус шкафа, не попадают на устройства управления ЭП.

При наличии нескольких шкафов управления осуществляется выравнивание потенциалов их корпусов за счет соединения в схему звезды, общая точка которой соединяется с контуром заземления и токоведущими конструкциями зданий.

Подавление помех за счет действия электростатических и электромагнитных полей может осуществляться несколькими способами. Наиболее эффективный способ предусматривает размещение блоков и устройств управления в металлических (ферромагнитных) корпусах, а всего электрооборудования электропривода — в металлических шкафах. В результате этого вредные внешние поля экранируются этими металлическими корпусами и не вызывают появления помех в электрических цепях электропривода. К этому же способу подавления внешних помех относится экранирование проводов и кабелей, размещение их в металлических трубах или коробах.

Повышение надежности работы электропривода достигается, как уже отмечалось, введением внутриэлементной или структурной избыточности, использованием средств контроля и диагностики, а также определенным усложнением конструктивного исполнения устройств и блоков электропривода. Реализация этих технических мероприятий требует дополнительных затрат на разработку и изготовление электроприводов. Очевидно, что эти дополнительные затраты, которые обычно называют капитальными, могут быть произведены и оправданы лишь в том случае, когда за счет повышения надежности электропривода будет достигнуто снижение текущих затрат при эксплуатации самого электропривода и обслуживаемого им технологического оборудования. Тем самым повышение надежности электроприводов должно сопровождаться определением экономической эффективности этих мероприятий, которая подробно рассмотрена в [21].

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется надежностью электропривода?
2. Что называется вероятностью безотказной работы, интенсивностью отказов и наработкой до отказа?
3. Как эти показатели связаны между собой?
4. В чем заключается коэффициентный метод расчета надежности?
5. Какие существуют методы повышения надежности электроприводов при их проектировании и эксплуатации?
6. Какими средствами можно повысить помехозащищенность электроприводов?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

PDF Compressor Free Version

1. Автоматизация типовых технологических процессов и установок / А.М. Корытин и др. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Анализ и синтез систем управления электроприводов постоянного тока / Под ред. В.А. Елисеева. — М.: Моск. энерг. ин-т, 1984.
3. *Беляев А.В.* Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ. — Л.: Энергоатомиздат, 1988.
4. *Бурков А.Т.* Электронная техника и преобразователи. — М.: Транспорт, 1999.
5. *Бычков М.Г.* Промышленные компьютеры и программируемые логические контроллеры. — М.: Изд-во МЭИ, 2002.
6. *Вейнгер А.М.* Регулируемый синхронный электропривод. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
7. Выбор электрических аппаратов для электропривода, электрического транспорта и электроснабжения промышленных предприятий/ Е.Г. Акимов, Ю.С. Коробков, А.В. Савельев и др. / Под ред. А.А. Чунихина, Ю.С. Коробкова. — М.: Изд-во МЭИ, 1990.
8. *Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е.* Промышленная электроника. — М.: Высш. школа, Энергоатомиздат, 1988.
9. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия и определения. Госстандарт СССР.
10. ГОСТ Р 50369-92. Электроприводы. Термины и определения. Госстандарт России.
11. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / Под ред. М.Г. Чиликина. — М.: Энергия, 1971.
12. *Елисеев В.А.* Системы непрерывного управления электроприводов переменного тока. — М.: Моск. энерг. ин-т, 1985.
13. *Ильинский Н.Ф.* Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом. — М.: Энергоиздат, 1981.
14. *Ключев В.И.* Теория электропривода. — М.: Энергоатомиздат, 2001.
15. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / И.Х. Евзеров, А.С. Горобец, Б.И. Мошкович, и др.: Под ред. В.М. Перельмутера. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
16. *Лезнов Б.С.* Энергосбережение и регулируемый электропривод в насосных установках. — М.: ИК «Ягорба» — «Биоинформсервис», 1998.
17. *Михайлов В.С., Билецкий О.Б.* Основы построения и проектирования автоматизированных систем управления в строительстве. — Киев: Вища школа. 1984.
18. *Москаленко В.В.* Справочник электромонтера. — М.: ПрофОбрИздат, 2002.

19. *Москаленко В.В.* Электрический привод: Учебн. пособие. — М.: Мастерство; Высшая школа, 2000.
20. Применение микропроцессорных систем в энергетике и радиоэлектронике / А.Н. Дорошенко, Ю.Н. Евланов, Л.А. Ильяшенко / Под ред. В.А. Мясникова и А.А. Дерюгина. — М.: Моск. энерг. ин-т. 1986.
21. *Рипс Я.А., Савельев Б.А.* Анализ и расчет надежности систем управления электроприводами. — М.: Энергия, 1974.
22. *Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М.* Основы преобразовательной техники. — М.: Высш. школа, 1980.
23. *Соколов М.М.* Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов. — М.: Энергия, 1976.
24. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
25. Теория автоматического управления / Под ред. А.А. Воронова — Л.: Энергия, 1986.
26. *Терехов В.М.* Элементы автоматизированного электропривода. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
27. *Усынин Ю.С.* Системы управления электроприводов: Учеб. пособие. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001.
28. Электрические и электронные аппараты: Учебник для вузов / Под ред. Ю.К. Розанова. — М.: Энергоатомиздат, 1998.
29. Электротехнический справочник. Использование электрической энергии. Т. 3. Кн. 2. / Под общ. ред. И.Н. Орлова и др. — 7-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
30. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.2. Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. В.Г. Герасимова и др. — 8-е изд. — М.: Изд-во МЭИ, 1998.
31. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства / Под ред. В.А. Веникова. Кн. 2. Энергосбережение в электроприводе / Н.Ф. Ильинский, Ю.В. Рожанковский, А.О. Горнов. — М.: Высшая школа, 1989.
32. Энциклопедический словарь. — М.: Энциклопедия, 1988.

По вопросам приобретения книг обращайтесь:

Отдел продаж «ИНФРА-М» (оптовая продажа):
127282, Москва, ул. Полярная, д. 31в, тел.: (495) 380-4260; факс: (495) 363-9212
E-mail: books@infra-m.ru

•

Магазин «Библиосфера» (розничная продажа):
109147, Москва, ул. Марксистская, д. 9, тел. (495) 670-5218, 670-5219

•

Отдел «Книга—почтой»:
тел. (495) 363-4260 (доб. 232, 246)

•

Центр комплектования библиотек:
119019, Москва, ул. Моховая, д. 16 (Российская государственная библиотека, кор. К)
тел. (495) 202-9315

PDF Compressor Free Version

Владимир Валентинович Москаленко

Системы автоматизированного управления электропривода

Учебник

Оригинал-макет подготовлен в Издательском Доме «ИНФРА-М»

ЛР № 070824 от 21.01.93

Сдано в набор 10.09.2003.
Подписано в печать 20.11.2003.
Формат $60 \times 90^1/_{16}$. Печать офсетная. Бумага офсетная.
Гарнитура «Newton». Усл. печ. л. 13,0. Уч.-изд. л. 13,41.
Тираж 100 000 экз. (5001 — 8000 экз.).
Заказ № 7621.

Издательский Дом «ИНФРА-М»
127282, Москва, ул. Полярная, д. 31в
Тел.: (495) 380-05-40, 380-05-43.
Факс: (495) 363-92-12.
E-mail: books@infra-m.ru
http://www.infra-m.ru

Отдел «Книга — почтой»:
(495) 363-42-60 (доб. 246, 247)

Отпечатано с готовых диапозитивов в ОАО ордена «Знак Почета»
«Смоленская областная типография им. В. И. Смирнова».
214000, г. Смоленск, проспект им. Ю. Гагарина, 2.