

М. П. БЕЛОВ, В. А. НОВИКОВ, Л. Н. РАССУДОВ

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ТИПОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Допущено

*Министерством образования Российской Федерации в качестве учебника
для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности
«Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических
комплексов» направления подготовки дипломированных специалистов
«Электротехника, электромеханика и электротехнологии»*

2-е издание, стереотипное

УДК 62-581.6
ББК 3291.07
Б43

Рецензенты:

зав. кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» МГОУ д-р техн. наук, проф. *Г. Б. Онищенко*;
проф. кафедры «Системы автоматического управления» СПбГТУ,
д-р техн. наук *С. А. Ковчин*

Белов М. П.

Б43 Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник для вузов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. — 2-е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2004. — 576 с.

ISBN 5-7695-1314-4

Изложены блочно-модульные принципы построения унифицированных систем автоматизированных электроприводов с программируемыми микроконтроллерами. Рассмотрены принципы построения систем управления механизмами, агрегатами и комплексами на базе автоматизированных электроприводов и компьютерных средств автоматизации. Приведены примеры построения компьютерных систем управления многодвигательными электроприводами машин и агрегатов типовых групп технологического и транспортного оборудования, а также автоматизированных технологических комплексов базовых отраслей промышленности.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». Может быть полезен широкому кругу инженерно-технических работников, занятых разработкой, проектированием и эксплуатацией систем автоматизации.

УДК 62-581.6
ББК 3291.07

ISBN 5-7695-1314-4

© Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н., 2004
© Издательский центр «Академия», 2004

Оглавление

Предисловие	3
Введение	6
Глава 1. Принципы построения и структура автоматизированных технологических комплексов с системами многодвигательных электроприводов	11
1.1. Типовая структура автоматизированных технологических комплексов	11
1.2. Технические средства комплексов	16
1.2.1. Нерегулируемые и регулируемые электроприводы	16
1.2.2. Программируемые контроллеры и промышленные компьютеры	30
1.2.3. Контрольно-измерительные средства	33
1.2.4. Коммутационная и защитная аппаратура	43
1.3. Энергетические сети	50
1.3.1. Источники и сети электроснабжения систем электроприводов	50
1.3.2. Резервирование электропитания	57
1.3.3. Показатели качества электроэнергии	59
1.3.4. Энергосбережение средствами электропривода	60
1.3.5. Применение правил устройства электроустановок к электроприводам	65
1.4. Информационные сети	74
1.4.1. Структура сетей	74
1.4.2. Сетевые средства	78
1.5. Режимы работы технологического оборудования и электроприводов	80
1.6. Алгоритмы управления электроприводами, механизмами, агрегатами и комплексами	86
1.6.1. Математические модели и структура систем управления	86
1.6.2. Каскадное (подчиненное) и модальное управление	96
1.6.3. Декомпозиция взаимосвязанных систем	98
1.6.4. Управление с использованием нечетной логики	103
Глава 2. Типовые автоматизированные электроприводы	107
2.1. Унифицированные системы электроприводов (комплектные электроприводы)	107

2.2. Блочно-модульные принципы комплектования автоматизированных электроприводов	109
2.2.1. Электроприводы переменного тока	109
2.2.2. Электроприводы постоянного тока	117
2.3. Средства управления и программирования электроприводов	120
2.4. Настройка и диагностирование параметров автоматизированных электроприводов	130
2.5. Сетевые средства систем управления электроприводами	138
Глава 3. Управления движением механизмов с использованием типовых технических средств	143
3.1. Свойства и конструкция основных узлов систем управления движением механизмов	143
3.2. Особенности передаточных механизмов, используемых в системах управления движением исполнительных органов	146
3.3. Динамические модели механизмов	162
3.4. Динамические модели направляющих и опор механизмов	163
3.5. Информационные преобразователи скоростей и перемещений механизмов	164
3.6. Типовые режимы управления механизмами	172
3.6.1. Стабилизация, слежение, позиционирование	172
3.6.2. Программное управление	178
3.6.3. Синхронизация скоростей и положений	180
3.6.4. Управление нагрузкой электроприводов	186
3.6.5. Технологические функции управления механизмами	192
3.7. Механотропные модели в системах управления движением	193
3.8. Расчет и выбор автоматизированных электроприводов и механизмов	198
Глава 4. Электроприводы и системы управления типовым, технологическим и транспортным оборудованием	204
4.1. Типовые группы оборудования технологических комплексов	204
4.2. Системы управления оборудованием	207
4.2.1. Координированное управление механизмами в составе технологического агрегата	207
4.2.2. Средства управления агрегатами	209
4.2.3. Программное обеспечение средств управления	213
4.3. Состав и свойства систем управления оборудованием, предназначенным для физической и химической переработки вещества	216
4.3.1. Характеристика оборудования и электроприводов	216
4.3.2. Управление вентиляторным, насосным и компрессорным оборудованием	227

4.3.3. Управление мельничным и дробильным оборудованием	239
4.3.4. Управление смесителями, центрифугами и сепараторами	243
4.4. Состав и свойства систем управления металло-, дерево- и камнеобрабатывающими станками	246
4.4.1. Характеристика станков и электроприводов	246
4.4.2. Системы числового программного управления металлообрабатывающими станками	257
4.4.3. Управляющие технологические программы	260
4.4.4. Системы стабилизации скорости, усилия, мощности и температуры резания, а также упругих деформаций, возникающих в зоне резания	264
4.4.5. Влияние погрешностей следящих электроприводов на качество металлообработки	271
4.5. Состав и свойства систем управления прокатным, кузнечным прессовым и штамповочным оборудованием	277
4.5.1. Характеристика оборудования и электроприводов	277
4.5.2. Система управления клетью прокатного стана	282
4.5.3. Управление кузнечно-прессовыми машинами	294
4.6. Состав и свойства систем управления резательным оборудованием	296
4.6.1. Характеристика оборудования и электроприводов	296
4.6.2. Система управления ножницами и катящимся резом	302
4.6.3. Система управления летучими ножницами	304
4.6.4. Система управления барабанными ножницами для поперечного резания картона	307
4.7. Состав и свойства систем управления горнодобывающим и нефтегазовым оборудованием	313
4.7.1. Характеристика машин для подземных и наземных разработок и их электроприводов	313
4.7.2. Системы управления экскаваторами типа «прямая лопата» и драглайн	319
4.7.3. Системы управления буровыми станками	327
4.8. Состав и свойства систем управления оборудованием, предназначенным для транспортирования и обработки гибких материалов	339
4.8.1. Характеристика оборудования и электроприводов	339
4.8.2. Системы управления скоростью и соотношением скоростей механизмов, взаимосвязанных ленточным материалом	342
4.8.3. Управление наматыванием и сматыванием материала при косвенном и непосредственном контроле натяжения [5]	346
4.8.4. Системы управления соотношениями скоростей и натяжений материала	354
4.8.5. Система управления продольно-резательным станком	354

4.9. Состав и свойства систем управления промышленными манипуляторами	362
4.9.1. Принципы построения систем управления электроприводами манипуляторов	362
4.9.2. Уравнения кинематики и динамики манипуляторов	364
4.9.3. Взаимосвязанные системы управления движением звеньев манипулятора	369
4.9.4. Управление цикловыми движениями манипулятора	375
4.10. Состав и свойства систем управления транспортным и подъемно-транспортным оборудованием	378
4.10.1. Характеристика транспортного оборудования и электроприводов	378
4.10.2. Системы управления конвейером и транспортером	392
4.10.3. Системы управления маршрутным электротранспортом (трамваем, троллейбусом вагоном метрополитена)	400
4.10.4. Характеристика подъемно-транспортного оборудования и электроприводов	409
4.10.5. Система управления мостовым краном	418
4.10.6. Система управления козловым краном	421
4.10.7. Система управления лифтом	428
4.11. Состав и свойства систем управления оборудованием мониторинга	449
4.11.1. Характеристика электроприводов телевизионных систем наблюдения за технологическим процессом, телескопов и радиотелескопов	449
4.11.2. Система управления радиотелескопом [6]	451
Глава 5. Автоматизированные технологические комплексы	454
5.1. Классификация и структура технологических комплексов базовых отраслей промышленности	454
5.2. Системы управления комплексами	455
5.2.1. Координированное управление агрегатами в составе технологического комплекса	455
5.2.2. Средства управления комплексами	456
5.3. Автоматизированные технологические комплексы агропромышленного производства	461
5.3.1. Характеристика технологических комплексов	461
5.3.2. Автоматизированный конвейер обработки овощей	462
5.3.3. Автоматизированный участок приготовления комбикормов	466
5.4. Автоматизированные технологические комплексы добывающих производств	470
5.4.1. Характеристика технологических комплексов	470
5.4.2. Автоматизированный комплекс открытой разработки на базе роторного экскаватора	472
5.4.3. Автоматизированный комплекс углеприема обогатительной фабрики	475
5.4.4. Автоматизированный комплекс камнедробления	479

5.5. Автоматизированные технологические комплексы металлургического производства	482
5.5.1. Характеристика технологических комплексов	482
5.5.2. Система автоматизации транспортно-технологического комплекса подготовки и подачи слитков к обжимному прокатному стану	493
5.5.3. Система автоматизации обжимного прокатного стана	499
5.5.4. Система автоматизации участка ножниц поперечного резания листового прокатного стана	501
5.5.5. Система управления непрерывным станом холодной прокатки	505
5.6. Автоматизированные технологические комплексы машиностроения	514
5.6.1. Характеристика технологических комплексов	514
5.6.2. Автоматизированный робототехнический комплекс (станок, робот, транспорт)	519
5.6.3. Автоматизированный участок металлообработки (группа станков, транспорт, склад-штабелер)	522
5.6.4. Автоматизированный комплекс с многопозиционным прессом	526
5.7. Автоматизированные технологические комплексы бумагоделательного и полиграфического производства	528
5.7.1. Характеристика технологических комплексов	528
5.7.2. Технологические комплексы полиграфического производства	530
5.7.3. Система автоматизации картоноделательной машины ...	532
5.7.4. Система автоматизации ротационной машины	550
5.8. Автоматизированные технологические комплексы городского хозяйства	555
5.8.1. Характеристика технологических комплексов	555
5.8.2. Система автоматизации насосной станции	556
5.8.3. Система автоматизации вентиляции и кондиционирования воздуха	561
5.8.4. Система автоматизации жизнеобеспечения жилого здания	564
Список литературы	567

Посвящается 80-летию первой в стране кафедры «Электрификация промышленных предприятий» Ленинградского электротехнического института (ныне кафедра «Робототехника и автоматизация производственных систем» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»), начавшей подготовку инженеров-электроприводчиков*

Предисловие

Учебник написан в соответствии с программой дисциплины «Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов», входящей в типовой учебный план подготовки инженеров по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». В нем отражен большой и длительный опыт преподавания этой дисциплины и других схожих с ней дисциплин в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете (ЛЭТИ). В настоящем учебнике сохраняется преемственность с другими учебниками аналогичного направления. Учтены большие изменения, происходящие в теории и практике применения автоматизированного электропривода.

Электропривод переменного тока стал доминирующим в новых разработках технологического оборудования, а частотно-регулируемый электропривод с асинхронным короткозамкнутым двигателем широко применяется и выпускается многими электротехническими фирмами мира. Совместно с компьютерными средствами управления привод переменного тока имеет большие функциональные возможности и адаптирован ко всем объектам применения, где ранее использовался привод постоянного тока.

Исходя из этого материал всего учебника можно было изложить с ориентацией на приводы переменного тока. Однако, принимая во внимание то, что в технологическом оборудовании, находящемся в эксплуатации, чаще всего применяется регулируемый электропривод постоянного тока, авторы старались сохранить некое равновесие в изложении материала по приводам обоих родов тока, подчеркивая их равные функциональные возможности.

* Кафедра была основана в 1922 г.

Управляющими устройствами приводов являются программируемые микроконтроллеры и промышленные компьютеры, а алгоритмы управления реализуются в виде программ.

Инженеры при математическом описании объектов и алгоритмов управления используют топологическое представление математических описаний в виде структурных и функциональных схем с выделением основных модулей управления (регуляторов, функциональных преобразователей, ограничителей, делителей, умножителей и др.).

Подобные схемы являются виртуальными по отношению к их программной реализации, но при высокой сложности современных систем управления электроприводами и особенно взаимосвязанных систем управления многодвигательными электроприводами они позволяют легко выполнять синтез алгоритмов управления без использования математических формальных процедур. Такие схемы широко представлены в учебнике.

Оснащение одного производственного механизма или технологического агрегата современным компьютеризированным электроприводом не дает заметного эффекта в технологическом процессе.

Эффективным является автоматизация технологического комплекса, объединяющего в технологическом процессе много агрегатов и механизмов.

Это учитывается всеми ведущими электротехническими корпорациями, которые выпускают компьютеризированные электроприводы с развитыми сетевыми и другими средствами, превращающими электропривод в эффективный инструмент автоматизации технологических процессов, где широко используются машины и механизмы. В состав интегрированных систем многодвигательных электроприводов включают средства среднего (технологического) уровня автоматизации, которые ранее относились к автоматизированным системам управления технологическими процессами (АСУ ТП). Это отразилось в реорганизации отделов многих НИИ и КБ — объединении отделов электроприводов с АСУ ТП. Один из ведущих департаментов корпорации «Siemens» называется «Автоматизация и приводы» (аналогия с названием специальности, на которую ориентирован учебник).

Ориентация на автоматизированные технологические комплексы является характерной чертой настоящего учебника и отражает современный подход к автоматизации машин и механизмов, взаимосвязанных технологическим процессом.

Излагая материал учебника, авторы стремились по возможности избежать описаний конкретных типов систем автоматизированных электроприводов, технологических агрегатов и комплексов.

Авторы выражают благодарность за предоставление материалов к написанию фрагментов учебника своим коллегам: О. И. Зементову (пп. 4.5.2, 4.6.1—4.6.3, 4.8.4, 5.5.3, 5.5.4), А. Е. Козяруку (пп. 3.8, 4.7, 5.4.1, 5.4.2), В. О. Осипову (пп. 4.4.2, 4.4.3), А. А. Прокопову (пп. 1.6.4, 4.3.2), С. В. Савве (п. 5.7), С. В. Гриню (п. 4.6.4).

Авторы выражают особую благодарность С. А. Ковчину, Г. Б. Онищенко, сотрудникам и заведующему кафедрой «Автоматизированный электропривод» МЭИ (Технический университет) С. К. Козыреву, а также сотрудникам кафедры «Робототехника и автоматизация производственных систем» СПбГЭТУ «ЛЭТИ» за помощь в создании учебника.

Введение

Анализ мирового опыта создания нового и модернизации действующего технологического оборудования показывает высокую динамику развития регулируемых электроприводов, компьютерных средств автоматизации, использования информационных средств. Она обусловлена стремлением к максимальному повышению производительности технологического оборудования и качества производимой продукции. Все ведущие электротехнические корпорации выпускают регулируемые электроприводы комплексно с компьютерными средствами автоматизации в виде гибко программируемых систем, предназначенных для широкого использования. Окупаемость средств, вложенных в такие системы, является наиболее быстрой. Кроме применения регулируемые электроприводы совместно с технологическими устройствами используются в качестве средств регулирования технологических переменных — уровня, давления, влажности, температуры, дозирования, производительности и др.

Можно выделить следующие общие тенденции развития электроприводов, имеющие устойчивый характер:

постоянно расширяющееся применение регулируемых электроприводов в промышленном оборудовании, транспорте, авиационной и космической технике, медицине, бытовой технике для достижения новых качественных результатов в технологии;

замена нерегулируемых электроприводов регулируемыми в энергоемком оборудовании (насосы, компрессоры, вентиляторы и др.) с целью энергосбережения;

распространение блочно-модульных принципов построения электроприводов, информационных средств, средств управления и систем управления в целом;

динамичная компьютеризация электроприводов, механизмов, агрегатов и комплексов и новая идеология проектирования систем;

дальнейшее развитие методов каскадного (подчиненного) управления, получивших широкое распространение в электроприводах и органично применимых к управлению технологическими переменными и интегральными показателями качества обработки, переработки и производства вещества;

активное развитие и внедрение систем диагностирования, обслуживания, визуализации технологических процессов и процессов управления.

Под *электроприводом* понимается «*электромеханическая система*, состоящая в общем случае из взаимодействующих преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса» [7].

Регулируемые электроприводы, как правило, являются и *автоматизированными*; многие операции в них выполняются средствами управления без участия оператора. Принимая во внимание, что основными средствами управления в электроприводах являются программируемые микроконтроллеры и (или) промышленные компьютеры, уместно определять современный автоматизированный электропривод как *компьютеризированный*. Это определение подходит для интегрированных систем многодвигательных электроприводов, объединяемых с компьютерными средствами автоматизации и разветвленными информационными сетями в составе технологических агрегатов и комплексов.

При исследовании вариантов электроприводов используют различные способы их классификации. В качестве классификационных признаков, например, используют: виды движения электродвигателей (вращательный, поступательный, линейный, многокоординатный); способ соединения двигателя с исполнительным органом (редукторный, безредукторный, конструктивно-интегрированный); регулируемость (нерегулируемый, многоскоростной, регулируемый); число электродвигателей (одно-, многодвигательный); число исполнительных органов (индивидуальный, групповой); степень автоматизации (ручной, полуавтоматический, следящий, позиционный, программный, стабилизирующий) [2]. Наиболее общая классификация электроприводов с соответствующими терминами и определениями для каждой классификационной градации дана в работе [7]. Классификационными признаками являются: функциональное назначение, принцип преобразования электрической энергии в механическую, структура электропривода, техническая реализация.

С учетом отмеченных ранее тенденций развития автоматизированных электроприводов ведущие электрические корпорации мира осуществляют разработку и продажу электроприводов главной для себя и перспективной для рынка серии с широкими функциональными и структурными возможностями, различными вариантами их технической реализации по условиям применения для

самых разнообразных машин и механизмов. В главных сериях электроприводов разных корпораций можно отметить много аналогичных признаков. Классификационными являются потребительские признаки, характеризующие функциональные, конструктивные и энергосберегающие возможности электроприводов, их электромагнитную совместимость с технологической средой.

Автоматизация современных технологических объектов сопровождается применением большого числа электромеханических систем, с помощью которых решаются задачи повышения качества продукции и эффективности технологического оборудования. Во многих случаях автоматические системы управления электроприводами следует рассматривать как взаимосвязанные системы, так как в состав технологического оборудования могут входить десятки электроприводов, объединенных по цепям управления, питания и нагрузки. Стремление к электросбережению в результате замены нерегулируемых электроприводов регулируемыми приводит к необходимости рассматривать взаимосвязи электромеханических систем по цепям нагрузки в объектах, для которых ранее такие задачи не ставились. Следует отметить и взаимосвязь выходных переменных электромеханических систем при формировании технологических показателей обрабатываемых изделий, характеризующих их качество. Эта взаимосвязь осуществляется через систему функциональных устройств технологического объекта.

Развязка, или декомпозиция систем наиболее эффективно выполняется не только средствами и алгоритмами управления, но и использованием параметров и свойств электрических, механических и функциональных компонентов автоматизированных технологических комплексов, т.е. тех компонентов, которые традиционно относятся к объектам управления и при проектировании систем считаются неизменными. Это важно учитывать при проектировании новых объектов и модернизации действующих.

Современные компьютеризированные электроприводы оснащаются большой библиотекой программных средств, с помощью которых можно решать многие функциональные задачи управления технологическим оборудованием разного производственного назначения. Эти средства распространяются на нижний (управление локальным оборудованием) и средний (координированное управление оборудованием) уровни управления и ориентированы на связь с верхним (административным) уровнем.

Под *типовым технологическим* оборудованием (машинами и комплексами) понимают такое оборудование, которое имеет существенные и особые функциональные признаки в технологическом процессе. Типизация технологических комплексов возможна только применительно к процессу производства конкретного изделия и носит всегда отраслевой характер. Типизация же машин и механиз-

мов производится в соответствии с функциональными особенностями выполнения ими части технологического процесса и не имеет отраслевой направленности. Имеется много машин и механизмов, выполняющих одинаковые или аналогичные операции в технологических процессах разных отраслей промышленности. Такие машины и механизмы можно объединить в типовые функциональные группы, например резательного, подъемно-транспортного и другого оборудования.

Классификация машин и механизмов по выполняемым ими функциям в технологическом процессе приведена ниже (см. п. 4.1).

Определим основные общетехнические понятия, используемые в учебнике.

Рабочая машина — устройство, выполняющее механические движения с целью преобразования материала (вещества). Рабочие машины разделяются на *технологические*, преобразующие форму, свойства, положение материала (обрабатываемого вещества), и *транспортные*, преобразующие положение материала (перемещаемого вещества).

Понятие рабочей машины является одним из частных случаев понятия машины. К другим относятся следующие понятия:

энергетическая машина — устройство, преобразующее любой вид энергии в механическую и наоборот (электродвигатели, электрогенераторы и др.);

информационная машина — устройство, преобразующее информацию (шифровальные машины, ЭВМ и др.); утрачивает значение в настоящее время.

Рабочая машина включает в себя несколько (систему) механизмов.

Механизм — система тел, предназначенная для преобразования движения одного или нескольких тел в требуемые движения других твердых тел. Обычно в механизме имеется входное звено, приходящее в движение от воздействия двигателя (в частности электродвигателя) и выходное звено, соединенное с исполнительным органом рабочей машины. Если в преобразовании движения участвуют жидкие или газообразные тела, то механизм называется гидравлическим или пневматическим.

Исполнительный орган рабочей машины — часть рабочей машины, непосредственно осуществляющая преобразование формы, свойства, положения материала в технологическом процессе.

Технологический агрегат — устройство, объединяющее технологическую машину, которая выполняет механические движения с целью преобразования формы, свойства и положения материала, с устройствами, обеспечивающими тепловые, химические и другие (не механические) воздействия на материал в процессе производства продукции. Такое объединение или присоединение называется *агрегатированием*. В частном случае под агрегатом по-

нимают объединение двигателя с насосом (насосный агрегат) или двигателя с компрессором (компрессорный агрегат) и др.

Технологический комплекс — совокупность рабочих машин и технологических агрегатов, составляющих одно целое при выполнении технологического процесса. Примерами технологических комплексов являются прокатный стан, бумагоделательная машина, кордная линия, представляющие собой систему машин и технологических агрегатов для осуществления соответственно прокатки металла, изготовления бумаги в рулонах, корда для покрышек.

Технологический процесс — совокупность последовательных действий и методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабриката, осуществляемых в процессе производства продукции.

Производство — процесс создания материальных благ.

Исторически сложилось так, что отдельные механизмы, выполняющие в производстве операции перемещения, подъема (транспортёры, подъемники, манипуляторы, кантователи и др.) стали называть *производственными механизмами*. К ним относят и простые рабочие машины, содержащие два — четыре механизма (краны, лифты, экскаваторы и др.)

Совершенствование простых рабочих машин в ходе технического прогресса превращало их в простые технологические комплексы, но термин машина сохранился. Например, бумаго- или картоно-делательными машинами называют простые машины и крупные комплексы, содержащие большое число технологических агрегатов.

В учебнике понятие производственного механизма относится только к одному механизму, выполняющему производственную функцию, а крупные машины рассматриваются как технологические комплексы. Механизмы, машины, агрегаты и комплексы называются часто общим термином *промышленные установки* или *промышленное оборудование* (технологическое и транспортное оборудование). Используется также понятие электроустановки.

Электроустановками называют совокупность машин, аппаратов, линий и вспомогательного оборудования (вместе с сооружениями и помещениями, в которых они установлены), предназначенных для производства, преобразования, трансформации, передачи, распределения электрической энергии.

Многие машины, агрегаты и механизмы имеют специфичное название с учетом отраслевого применения. Например, намоточные устройства в металлургии называются моталками, а в целлюлозно-бумажной промышленности — накатами. Технологические функции этих устройств одинаковы.

При сохранении сложившейся терминологии основные акценты в книге делаются на функциональные особенности оборудования в технологическом процессе и функции управления приводами, механизмами, агрегатами и комплексами.

Глава 1

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И СТРУКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С СИСТЕМАМИ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

1.1. Типовая структура автоматизированных технологических комплексов

Любой современный технологический комплекс следует рассматривать как автоматизированный технологический комплекс (АТК). В соответствии с технологическим процессом работа АТК определяется задающей программой. Осуществляются: контроль и регулирование электромагнитных, механических, технологических переменных, показателей качества готовой продукции (переработанного вещества); автоматическая оптимизация обобщенных показателей качества работы АТК; контроль состояния электротехнического, механического и технологического оборудования.

В общем виде задача АТК заключается в преобразовании исходного вещества в готовую продукцию (переработанное вещество) (рис. 1.1) на основе получения от технологической среды информации I в виде задающей программы и энергии P .

Издержки функционирования АТК в виде таких вредных влияний на среду, как искажение параметров сети электроснабже-



Рис. 1.1

ния, искажение информации, электромагнитные поля должны быть сведены к допустимому по стандартам минимуму, а технологические отходы переработаны в полезную продукцию. Готовая продукция должна соответствовать требованиям стандарта к качеству, производиться за минимально короткое время при минимальном потреблении энергии. Высвобождаемая энергия машин должна возвращаться в среду, куда должны поступать информация о работе АТК и данные о качестве готовой продукции.

Функциональная схема современного АТК приведена на рис. 1.2. Механизмы (исполнительные органы рабочей машины) оснащаются индивидуальными электроприводами с электродвигателями М, управляемыми преобразователями УП, программируемыми микроконтроллерами приводов КП. Совместную работу приводов и механизмов, входящих в состав технологического агрегата, координирует технологический программируемый микроконтроллер КТ. Координацию совместной работы агрегатов технологического комплекса выполняет один из микроконтроллеров КТ или специализированный персональный компьютер ПК, входящий в состав станции оператора СО. Через магистральный преобразователь МП осуществляется связь АТК с распределенной системой управления технологическим процессом. Микроконтроллеры (далее контроллеры) взаимодействуют через коммуникационную связь, структура которой в соответствии с существующими стандартами по индустриальным сетям средств вычислительной техники может быть различной. Контроль агрегатов и управление ими могут осуществляться с периферийных пультов операторов ПО.

Контроллер привода осуществляет:

управление силовой частью УП;

регулирование момента электродвигателя, скорости и положения механизма;

программно-логическое управление пуском, остановом и режимом рабочего функционирования привода;

автоматическую настройку регуляторов в режиме наладки;

контроль состояния и диагностирования неисправностей в компонентах электропривода;

защиту и сигнализацию электропривода.

Технологический контроллер обеспечивает:

выработку заданий на КП в соответствии с координированной работой приводов агрегата;

программно-логическое управление пуском, остановом и режимом рабочего функционирования агрегата;

регулирование технологических переменных;

контроль состояния и диагностирования неисправностей в компонентах агрегата.

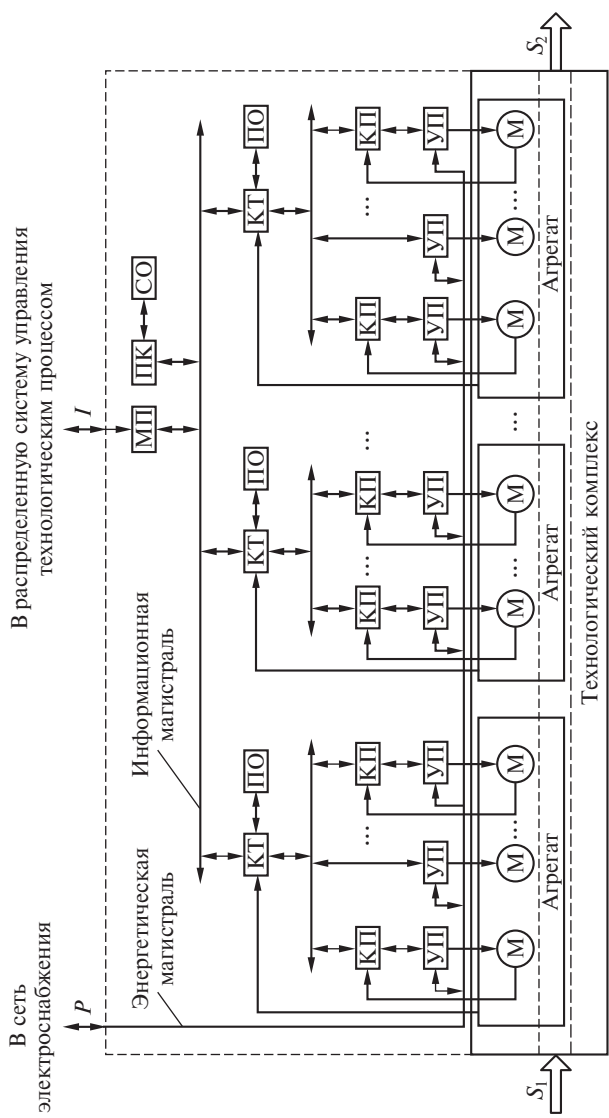


Рис. 1.2

Компьютерные системы управления электроприводами, механизмами, технологическими агрегатами и комплексами выполняются по единой идеологии с гибким варьированием аппаратных и программных средств. В общем случае в состав систем входят: программируемые контроллеры, модули интеллектуальной периферии, системы визуализации и обслуживания, средства коммутаций, программаторы (ПГ), персональные компьютеры.

Контроллеры могут иметь разную конструкцию, но всегда предусматривается возможность варьирования их конфигурации благодаря применению устройств расширения и периферийных модулей. Основой контроллера является центральный блок, содержащий центральный процессор и блок питания. В зависимости от задач автоматизации на системной шине контроллера могут монтироваться различные периферийные модули: цифровых и аналоговых вводов/выводов, предварительной обработки сигналов, коммуникационных процессоров. Предусматривается возможность варьирования разных типов центральных процессоров, блоков питания, периферийных модулей. Для объектов, требующих повышенной надежности работы, используются контроллеры, состоящие из двух или трех центральных блоков с процессорами резервного действия. Программа пользователя для таких контроллеров такая же, как и для обычных.

Модули интеллектуальной периферии решают специальные задачи пользователя по измерению, оценке, регулированию, стабилизации, позиционированию и др. Они «интеллектуальны», так как обладают собственными процессорами и решают самостоятельно в реальном времени специализированные задачи управления. Их периферийность определяется тем, что с управляемым процессом они непосредственно связаны через собственные входы/выходы, благодаря чему центральный процессор не перегружается и за необходимое время выполняет собственные задачи.

Системы визуализации и обслуживания включают в себя средства от простых дисплеев до информационных систем. Получили распространение следующие системы:

панели оператора, предназначенные для отображения управляемого процесса, ввода и вывода данных и наладки; содержат дисплеи и клавиатуру, конструктивно размещенные в одном корпусе;

программируемые терминалы, представляющие собой электролюминесцентные графические терминалы с активным экраном, на котором можно гибко менять клавиатуру;

локальные системы визуализации и обслуживания с различными функциональными возможностями (от кратковременного или долговременного архивирования измеряемых величин до полнотрафаретных систем с объектно-ориентированными оболочка-

ми проектирования и обслуживания) и интегрированные в другие системы; представляют собой автоматизированные рабочие места (АРМ) на базе ПК;

центральные системы визуализации и обслуживания с высокими функциональными возможностями, расширяющимися от АРМ до скоординированных многопользовательских и многотерминальных систем.

Программаторы и ПК используются в системах визуализации и обслуживания, а также для подготовки, отладки и записи программ в контроллеры. В соответствии с задачами программно-логического и непрерывного управления, диагностирования, контроля состояния функциональных узлов оборудования, отображения информации об управляемом процессе имеется стандартное программное обеспечение в виде функциональных блоков, обеспечивающих решение частных задач и органично встраиваемых в программы пользователя.

Имеются программы-драйверы, решающие задачу сопряжения контроллеров со стандартной периферией, другими контроллерами и компьютерными средствами автоматизации в коммуникационной сети.

В функциональные блоки входят программные пакеты, реализующие типовые функции, например:

арифметические, тригонометрические, логарифмические, показательные, обработки логических цепей, преобразования массивов данных и др.;

регулирования электромагнитных, механических и технологических переменных; реализации стабилизирующего, следящего, каскадного, модального и адаптивного управления; коррекции и компенсации нелинейностей; сглаживания; реализации непрерывных, шаговых и импульсных регуляторов;

наблюдения, отображения и обслуживания для локальных и центральных систем; выдачи важных сообщений о процессе и об ошибках; группирования сообщений и отображения обобщенных сообщений; включения прерывистой и непрерывной световой и звуковой сигнализации;

предварительной обработки сигналов в виде подготовки данных, обработки сообщений и прерываний, счета, дозирования, измерения скорости, пути, температуры и др.;

служебные для обмена данными между центральным процессором контроллера и модулями коммутационного процессора; предварительной обработки сигналов и памяти;

имитации объекта управления и обработки алгоритмов управления.

Для написания программного обеспечения контроллеров имеются экономичные технологии с использованием ПК (стандартных, совместимых с РС/АТ) или программаторов.

1.2. Технические средства комплексов

1.2.1. Нерегулируемые и регулируемые электроприводы

Нерегулируемые электроприводы. В качестве нерегулируемых по скорости электроприводов используются, как правило, электроприводы переменного тока, в частности электроприводы с асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями. Двигатели этого типа малой и средней мощности запускаются прямым включением в сеть без ограничения пусковых токов. Основные узлы управления в таких электроприводах выполняют функции коммутации и защиты. Применяются релейно-контакторные схемы управления [29].

Асинхронные двигатели (АД) напряжением до 1кВ защищают: от многофазных, а в случае заземленной нейтрали и заземления корпусов также от однофазных коротких замыканий (КЗ); от перегрузок, если они возможны по условиям эксплуатации или характеристике приводного механизма; от понижения напряжения, если самозапуск двигателей недопустим или нежелателен.

Защиту выполняют плавкими предохранителями, расцепителями автоматических выключателей или тепловыми реле магнитных пускателей. Защиту двигателя от КЗ в сетях с глухозаземленной нейтралью выполняют трехфазной (от междуфазных КЗ и однофазных на землю).

Автоматические выключатели осуществляют все виды защиты: от КЗ — электромагнитными и полупроводниковыми расцепителями; от перегрузки — электротепловыми расцепителями; от снижения напряжения — расцепителями минимального напряжения.

Защита двигателей от КЗ может осуществляться с помощью максимальных токовых реле типа РЭВ в виде токовой отсечки. На рис. 1.3, а приведена схема токовой отсечки без выдержки времени в трехфазном исполнении. Реле тока $KА1... KА3$ включены в каждую фазу статора. При срабатывании хотя бы одного реле размыкается соответствующий контакт $KА1... KА3$ в цепи катушки контактора $KМ$ и электродвигатель отключается от сети. При выборе тока срабатывания коэффициент отсечки $k_{отс} = 1,3... 1,5$, а коэффициент чувствительности $k_{ч} > 2,0$ при КЗ на выводах электродвигателя.

От перегрузки двигатель охраняет токовая защита, реагирующая на возрастание тока, а также температурная защита. Токовая защита выполняется электромеханическими, полупроводниковыми или электротепловыми реле. Защита двигателя от перегрузки должна срабатывать при кратковременных перегрузках, поэтому она имеет выдержку времени и может действовать на отключение, сигнал или разгрузку механизма двигателя.

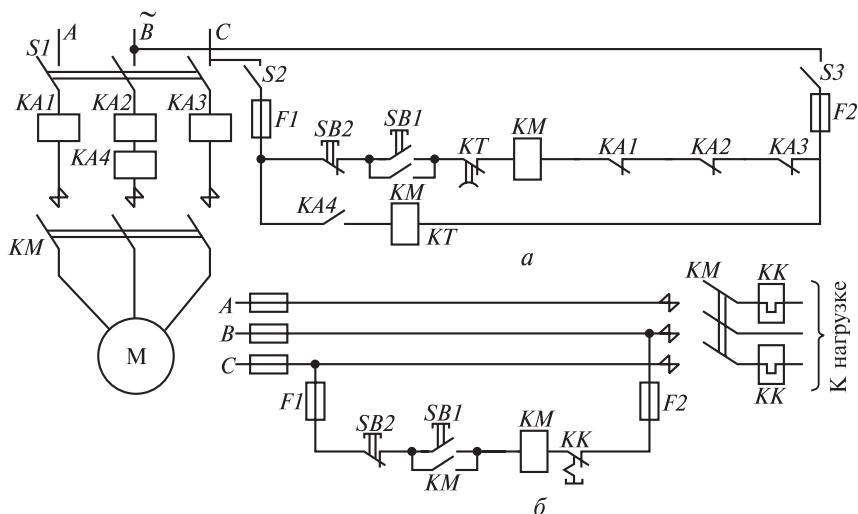


Рис. 1.3

Защиту от перегрузки устанавливают, когда имеет место технологическая перегрузка или необходимо ограничить длительность пуска или самозапуска двигателей при пониженном напряжении. Защита от перегрузки, выполняемая с помощью электромагнитных реле, включает в себя реле тока и реле времени ($KA4$ и KT на рис. 1.3, *a*). Если защита должна отключать двигатель при обрыве фазы, то ее выполняют двухфазной. Двухфазной должна быть защита при наличии плавких предохранителей, используемых для защиты двигателей от КЗ. Ток срабатывания электромагнитных реле тока выбирают по условиям

$$I_{ср} \geq (k_{отстр} k_{сх} I_{д.ном}) / (k_{в} K_I); \quad (1.1)$$

$$I_{ср} \leq (0,75 k_{сх} I_{д.ном}) / K_I, \quad (1.2)$$

где $I_{д.ном}$ — номинальный ток двигателя; $k_{отстр}$ — коэффициент отстройки, зависящий от типа реле; $k_{сх}$ — коэффициент схемы; $k_{в}$ — коэффициент возврата; K_I — коэффициент трансформации трансформатора тока. Принимаются следующие значения:

$$k_{отстр} = 1,1, \dots, 1,2; k_{сх} = 1 \text{ или } k_{сх} = \sqrt{3}; k_{в} = 0,8 \text{ [25].}$$

По условию (1.1) реле не должно срабатывать в нормальном режиме работы двигателя; по условию (1.2) реле должно срабатывать при пусках двигателя, если пуск затянулся ($t_{п.з} \geq 3$ с).

При длительной перегрузке и затянувшемся пуске двигателя реле времени KT успевает сработать и, размыкая контакт KT в цепи катушки контактора KM (см. рис. 1.3, *a*), отключить двигатель.

Токи срабатывания полупроводниковых расцепителей автоматических выключателей при срабатывании защиты от перегрузки

выбирают по приведенным выше условиям. Защита считается эффективной, если

$$I_{\text{ср}} \leq (1,2 \dots 1,4) I_{\text{д.ном}} \quad (1.3)$$

Защита от перегрузки, выполняемая с помощью тепловых расцепителей или электротепловых реле автоматических выключателей, получается наиболее эффективной, если $I_{\text{расц.ном}} = I_{\text{д.ном}}$.

На рис. 1.3, б показаны электротепловые реле для защиты от перегрузки. Эта защита предотвращает работу двигателя на двух фазах, поэтому магнитный пускатель состоит из двух тепловых реле *КК*. Номинальный ток электротеплового реле определяют по условию

$$I_{\text{р.ном}} \geq I_{\text{нг.ном}} \approx I_{\text{д.ном}}, \quad (1.4)$$

где $I_{\text{нг.ном}}$ — номинальный ток сменного нагревателя электротеплового реле.

Аппаратом защиты от снижения напряжения является магнитный пускатель или контактор, так как при напряжении менее $(0,6 \dots 0,7) U_{\text{ном}}$ он автоматически отключается, и включить его можно, используя схемы управления при восстановлении напряжения в сети.

Если необходимо осуществить реверс двигателя и торможение, то применяется реверсивный магнитный пускатель, который включает в себя два линейных контактора *КМ1* и *КМ2* и два тепловых реле защиты *КК* (рис. 1.4). Такая схема обеспечивает прямой пуск и реверс асинхронного двигателя, а также торможение противозаключением при ручном управлении.

В схеме предусмотрена также защита от перегрузок АД (реле *КК*) и коротких замыканий в цепях статора (автоматический выключатель *QF*) и управления (предохранители *FA*). Обеспечивается нулевая защита от исчезновения (снижения) напряжения сети (контакторы *КМ1* и *КМ2*).

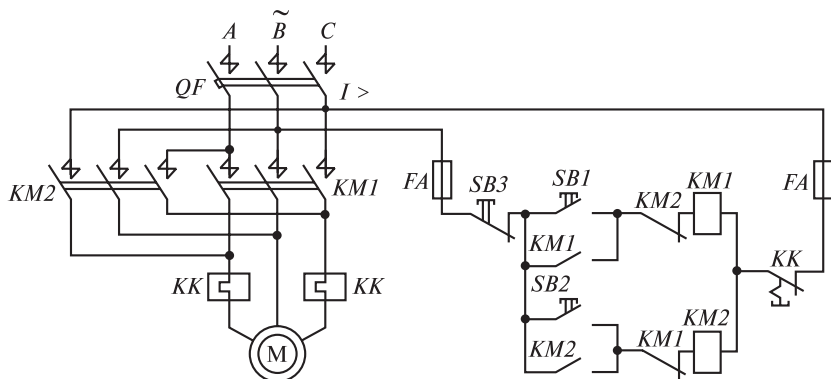


Рис. 1.4

Пуск двигателя в условных направлениях «Вперед» или «Назад» осуществляется нажатием соответственно кнопки *SB1* или *SB2*, что приводит к срабатыванию контактора *KM1* или *KM2* и подключению АД к сети (при включенном автоматическом выключателе *QF*).

Для обеспечения реверса или торможения двигателя сначала нажимают кнопку *SB3*, что приводит к отключению включенного контактора (например, *KM1*), затем нажимают кнопку *SB2*, что приводит к включению контактора *KM2* и подаче на АД напряжения питания с другим чередованием фаз. После этого магнитное поле двигателя изменяет свое направление вращения и начинается процесс реверса, состоящий из двух этапов — торможения противовключением и «разбега» в противоположную сторону.

Если нужно только затормозить двигатель, то при достижении им нулевой скорости следует вновь нажать кнопку *SB3*, что приведет к отключению его от сети и возвращению схемы в исходное положение. Если же кнопку *SB3* не нажимать, последует «разбег» АД в другую сторону, т.е. его реверс.

Во избежание короткого замыкания в цепи статора, которое может возникнуть в результате одновременного ошибочного нажатия кнопок *SB1* и *SB2* в реверсивных магнитных пускателях предусматривается специальная механическая блокировка, которая представляет собой рычажную систему, предотвращающую одновременное включение двух контакторов. В дополнение к механической в такой схеме используется типовая электрическая блокировка, применяемая в реверсивных схемах управления, которая заключается в перекрестном включении размыкающих контактов контактора *KM1* в цепь катушки контактора *KM2* и наоборот.

Релейно-контакторные схемы управления синхронным двигателем (СД), кроме обычных операций включения и отключения двигателя и ограничения пусковых токов, должны обеспечивать его синхронизацию с сетью.

Электротехническая промышленность выпускает типовые панели и шкафы управления СД разных типов. Рассмотрим схему панели управления низковольтным СД серии ПУ 7502 (рис. 1.5), которая обеспечивает его прямой (без токоограничения) пуск с глухоподключенным возбудителем *G*, имеющим независимую *НОВ* и последовательную *ПОВ* обмотки возбуждения, и форсирование возбуждения при снижении питающего напряжения. В схеме предусмотрены также тепловая защита (реле *KK* и трансформаторы тока *TA1* и *TA2*), токовая (автоматы *QF1* и *QF2*) и защита от снижения напряжения сетей переменного (реле *KV2*, *KV3*) и постоянного (реле *KVI*) токов.

Пуск СД возможен только при нормальных питающих напряжениях постоянного и переменного токов. Если рукоятка командоконтроллера *SA* находится в среднем положении и включены авто-