

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»*

3-е издание, исправленное



Москва

Издательский центр «Академия»

2007

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 студ. высш. учеб. заведений / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. — 3-е изд., испр. — М. : Издательский центр «Академия», 2007. — 576 с.

ISBN 978-5-7695-4497-2

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

*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 избегать 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 комплектно 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 электротехнические 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 промышленным 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.

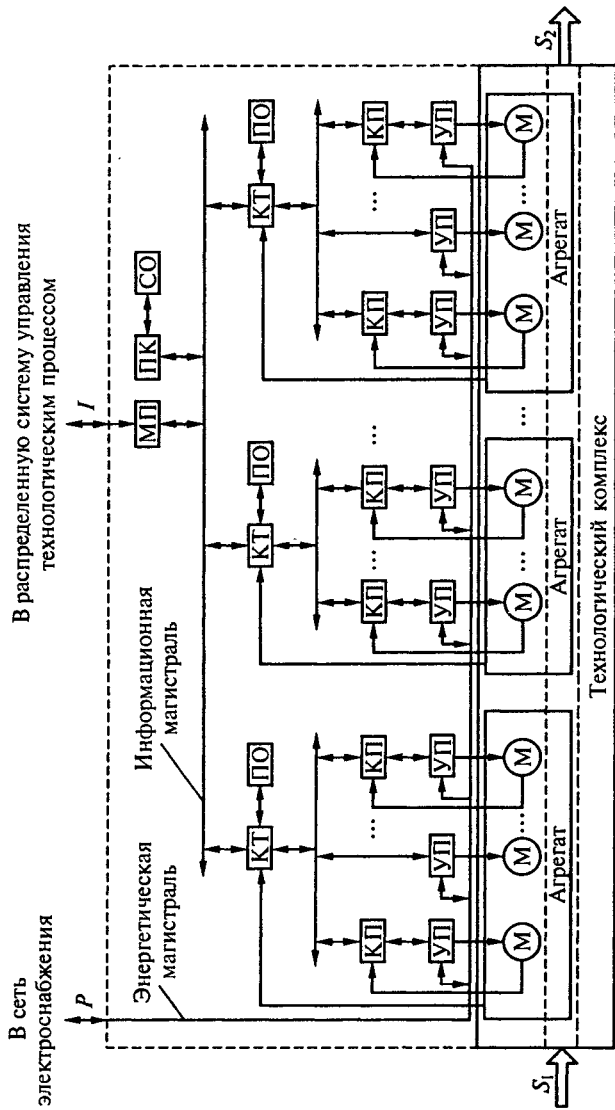


Рис. 1.2

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 вводы/выводы, 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 полнографических 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 отработки 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  $КА1...КА3$  включены в каждую фазу статора. При срабатывании хотя бы одного реле размыкается соответствующий контакт  $КА1...КА3$  в цепи катушки контактора  $КМ$  и электродвигатель отключается от сети. При выборе тока срабатывания коэффициент отсечки  $k_{отс} = 1,3...1,5$ , а коэффициент чувствительности  $k_{\chi} > 2,0$  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.



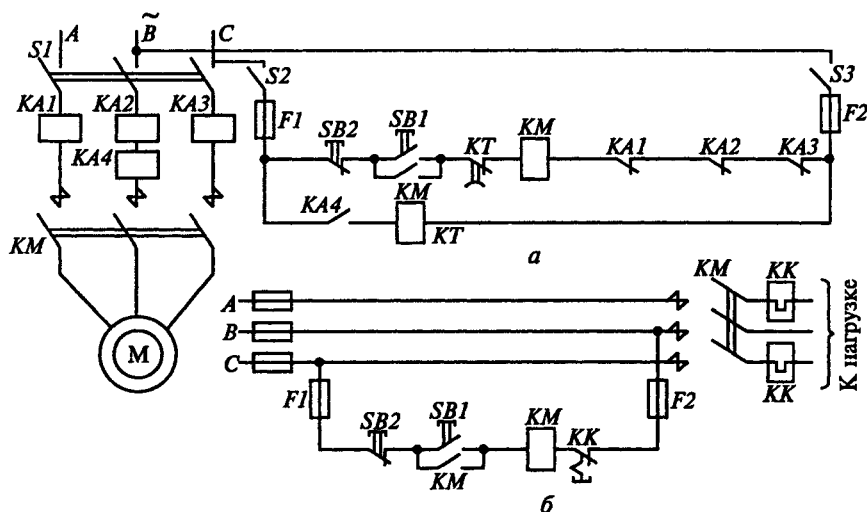


Рис. 1.3

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

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

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

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 противовключением 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*).

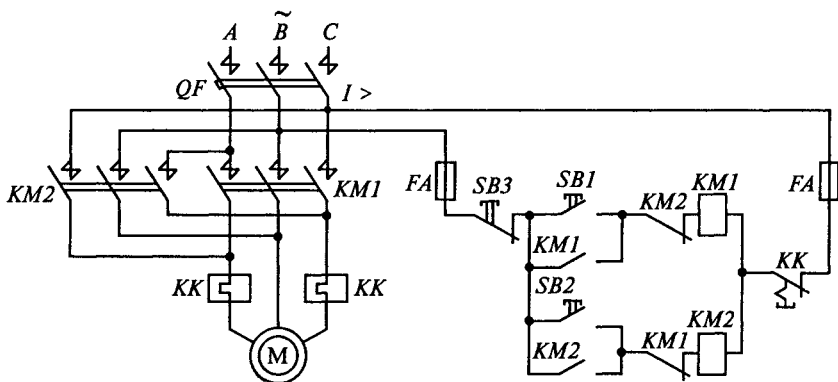


Рис. 1.4

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-

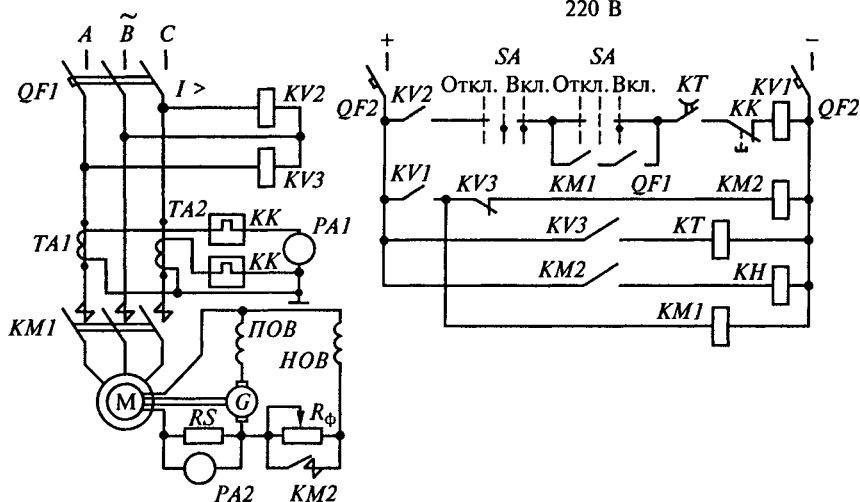


Рис. 1.5

маты  $QF1$  и  $QF2$ , срабатывают реле напряжения  $KV2$ ,  $KV3$  и реле времени  $KT$ , подготавливая схему к пуску. При переводе рукоятки  $SA$  в положение Вкл. срабатывает реле  $KV1$  и катушка линейного контактора  $KM1$  подключается к источнику питания, одновременно к обмотке статора СД подводится напряжение переменного тока, двигатель начинает «разбег». При скорости, близкой к синхронной, происходит возбуждение  $G$  и соответственно двигателя, т. е. начинается процесс синхронизации его с сетью.

О включении контактора форсировки  $KM2$  сигнализирует указательное реле  $KH$ . Для контроля тока статора в схеме предусмотрен амперметр  $PA1$ , а для контроля тока возбуждения — амперметр  $PA2$ , цепь питания которого проходит через шунт  $RS$ .

**Нерегулируемые электроприводы с управляемым пуском.** Эти электроприводы применяются при использовании асинхронных двигателей с фазным ротором средней и большой мощности, а также двигателей постоянного тока. Различные варианты релейно-контакторных схем управления такими электроприводами рассмотрены в [29].

Рассмотрим схему пуска асинхронного двигателя в одну ступень в зависимости от времени и схему торможения противовключением в зависимости от ЭДС (рис. 1.6). После подачи напряжения происходит включение реле времени  $KT$ , которое своим контактом размыкает цепь питания контактора  $KM3$ , предотвращая его включение и преждевременное шунтирование (закорачивание) пусковых резисторов в цепи ротора.

При нажатии кнопки  $SB1$  включается контактор  $KM1$ , статор подсоединяется к сети, электромагнитный тормоз  $YB$  расторма-

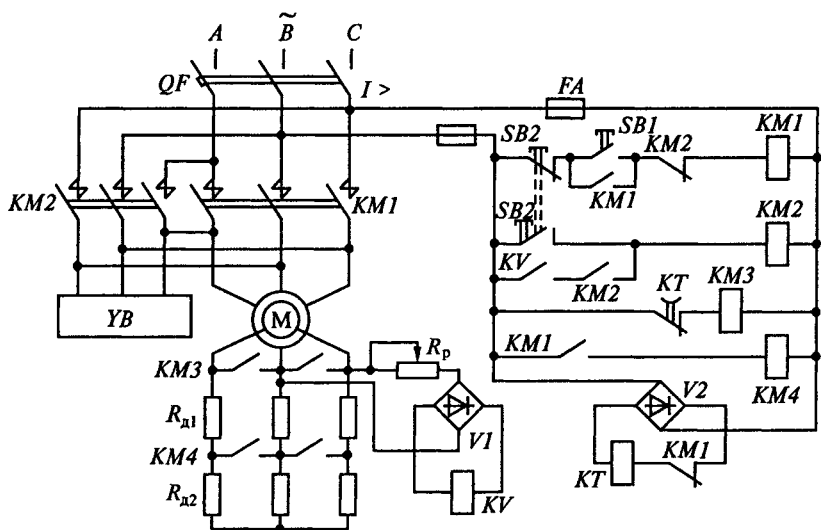


Рис. 1.6

живается и начинается «разбег» двигателя. Включение контактора *KM1* одновременно приводит к срабатыванию контактора *KM4*, который своими контактами шунтирует резистор противовключения  $R_{д2}$ , а также размыканию цепи катушки реле времени *KT*, которое, потеряв питание, начинает отсчет выдержки времени, после чего замыкает свой контакт в цепи катушки контактора *KM3*. Контакт, срабатывая, шунтирует пусковой резистор  $R_{д1}$  в цепи ротора, и АД начинает работать в соответствии с естественной характеристикой.

Управление торможением в схеме обеспечивает реле торможения *KV*, контролирующее значение ЭДС (скорости) ротора. Резистором  $R_p$  реле регулируется таким образом, чтобы при пуске ( $0 < s < 1$ ) наводимая в роторе ЭДС была недостаточной для включения, а в режиме противовключения ( $1 < s < 2$ ) — достаточной (здесь  $s$  — скольжение).

Для торможения двигателя необходимо нажать двоянную кнопку *SB2*, размыкающий контакт которой, разомкнув цепь питания катушки контактора *KM1*, отключает АД от сети, при этом замыкается цепь питания контактора *KM3* и замыкается цепь питания реле *KT*, т. е. контакторы *KM3* и *KM4* отключаются, а в цепь ротора АД включаются резисторы  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ .

Нажатие кнопки *SB2* одновременно приводит к замыканию цепи питания катушки контактора *KM2*, который, включившись, вновь подключает двигатель к сети, но уже с другим чередованием фаз сетевого напряжения на статоре, т. е. АД переходит в режим торможения противовключением. При этом реле *KV* срабатывает и

после отпускания кнопки  $SB2$  обеспечивает питание контактора  $KM2$  через свой и его замыкающие контакты.

В конце торможения, когда скорость близка к нулю и ЭДС ротора уменьшилась, реле  $KV$  отключается и своим контактом замыкает цепь питания катушки контактора  $KM2$ , который, обесточившись, отключает двигатель от сети, схема возвращается в исходное положение. При этом тормоз  $YB$ , также обесточившись, фиксирует (тормозит) вал АД.

Управление пуском, реверсом и торможением двигателей постоянного тока (ДПТ) в большинстве случаев осуществляется в зависимости от времени, скорости (ЭДС), тока или пути.

Рассмотрим схему управления пуском ДПТ в зависимости от времени, реверсом и торможением противовключением в зависимости от ЭДС (рис. 1.7).

В схеме предусмотрены линейные контакторы  $KM1$  и  $KM2$ , обеспечивающие вращение двигателя соответственно в одну и другую стороны. Главные контакты этих аппаратов образуют реверсивный мостик, с помощью которого можно изменять полярность напряжения на якоре  $M$ . В якорной цепи, кроме пускового резистора  $R_{д1}$ , включен резистор противовключения  $R_{д2}$ , который управляется контактором противовключения  $KM3$ .

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

противовключения обеспечить ввод в цепь якоря дополнительно к пусковому резистору  $R_{д1}$  резистора противовключения  $R_{д2}$ , что достигается выбором точки присоединения к нему катушек реле  $KV1$  и  $KV2$ .

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

Срабатывание  $KM1$  приводит также к срабатыванию реле  $KV1$ , которое, замкнув свой замыкающий контакт в цепи контакто-

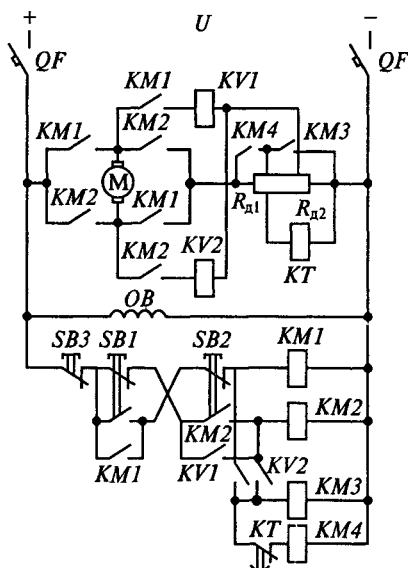


Рис. 1.7

ра противовключения  $KM3$ , включает его, в результате чего происходит шунтирование резистора противовключения  $R_{д2}$  и одновременно катушки реле времени  $KT$ . Реле времени  $KT$  начинает отсчет выдержки времени.

По истечении требуемой выдержки времени реле  $KT$  замыкает свой контакт в цепи катушки контактора  $KM4$ . Он включается, шунтирует пусковой резистор  $R_{д1}$ , и двигатель начинает работать в соответствии с естественной характеристикой.

Для осуществления торможения необходимо нажать кнопку  $SB2$ . В результате отключаются контактор  $KM1$ , реле  $KV1$ , контакторы  $KM3$  и  $KM4$  и включается контактор  $KM2$ . Изменяется полярность напряжения на двигателе, он переходит в режим торможения противовключением с двумя резисторами в цепи якоря  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ . Несмотря на замыкание контакта  $KM2$  в цепи реле  $KV2$ , оно (благодаря описанному выше подключению) не включается, чем предотвращается включение аппаратов  $KM3$  и  $KM4$  и шунтирование резисторов  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ .

Перевод ДПТ в режим противовключения соответствует его работе в переходном режиме (переход с естественной характеристики на искусственную характеристику).

По мере снижения скорости двигателя растет напряжение на катушке реле  $KV2$  и при скорости, близкой к нулю, оно достигает значения напряжения срабатывания. Если к этому моменту времени кнопка  $SB2$  будет отпущена, то отключается контактор  $KM2$ , схема возвращается в исходное положение, процесс торможения заканчивается. Если же при малой скорости кнопка  $SB2$  остается нажатой, то включается реле  $KV2$ , повторяется процесс пуска двигателя, но в противоположном направлении. Таким образом, реверсирование ДПТ включает в себя два этапа — торможение противовключением и пуск в противоположном направлении. Схемы управления пуском (см. рис. 1.6 и 1.7) обеспечивают ступенчатый пуск. Если возникает необходимость плавного пуска, то можно использовать тиристорные пускатели асинхронных короткозамкнутых двигателей (рис. 1.8). Такие пускатели являются по существу тиристорными преобразователями напряжения [22].

Схема, показанная на рис. 1.8, соответствует нереверсивному электроприводу. Аналогично выполняется реверсивный электропривод, в котором дополнительные силовые цепи обеспечивают бесконтактный управляемый реверс двигателя и его пуск в обоих направлениях вращения.

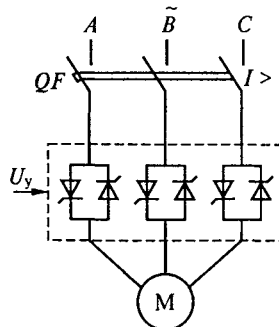


Рис. 1.8

**Регулируемые электроприводы.** Системы управляемого пуска электропривода (см. рис. 1.6—1.8) могут выполнять функции ступенчатого (см. рис. 1.6 и 1.7) или плавного в ограниченном диапазоне регулирования скорости. Однако эти приводы обладают низкими энергетическими показателями из-за больших потерь электроэнергии [22]. Их использование возможно для кратковременного снижения скорости до определенных значений и исключено при плавном регулировании скорости в большом диапазоне.

В качестве систем ступенчатого регулирования скорости электроприводов используют также приводы с двухскоростными асинхронными двигателями, в которых секции обмоток статора соединяются треугольником или двойной звездой [29]. Однако в большинстве случаев в настоящее время используются регулируемые электроприводы с управляемым преобразователем и системами управления, оптимально приспособленными по энергетическим и технологическим показателям.

Управляемые преобразователи электроэнергии выполняются главным образом как полупроводниковые преобразователи в виде неуправляемых и управляемых выпрямителей, автономных инверторов напряжения (АИН) и тока (АИТ), инверторов, ведомых сетью, преобразователей частоты с непосредственной связью. Для устранения искажения формы напряжения сети в преобразователях применяют фильтрокомпенсирующие устройства. Виды преобразователей и их комбинации определяются типом электродвигателя и задачами управления, мощностью, диапазоном регулирования, необходимостью рекуперации энергии в сеть, влиянием преобразователей на питающую сеть (рис. 1.9).

Схемотехнические решения преобразователей в электроприводах постоянного и переменного токов остаются традиционными. С учетом возрастания требований к энергетическим характеристикам электроприводов и их влиянию на сеть развитие получают преобразователи, обеспечивающие экономичные способы управления электроприводами. Изменения схем преобразователей главным образом связаны с появлением новых приборов — мощных полевых транзисторов (MOSFET), биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), запираемых тиристоров (OTO).

Существуют следующие тенденции развития преобразователей: расширение границ применения полностью управляемых приборов (транзисторов мощностью до 3...5 МВт, тиристоров мощностью до 5...20 МВт); распространение методов широтно-импульсной модуляции (ШИМ); блочные принципы построения преобразователей на основе унифицированных силовых гибридных модулей, выполняемых на базе транзисторов и тиристоров; возможность выполнения преобразователей постоянного и переменного тока и их комбинаций на единой конструктивной основе, в том числе на базе интеллектуальных силовых модулей.



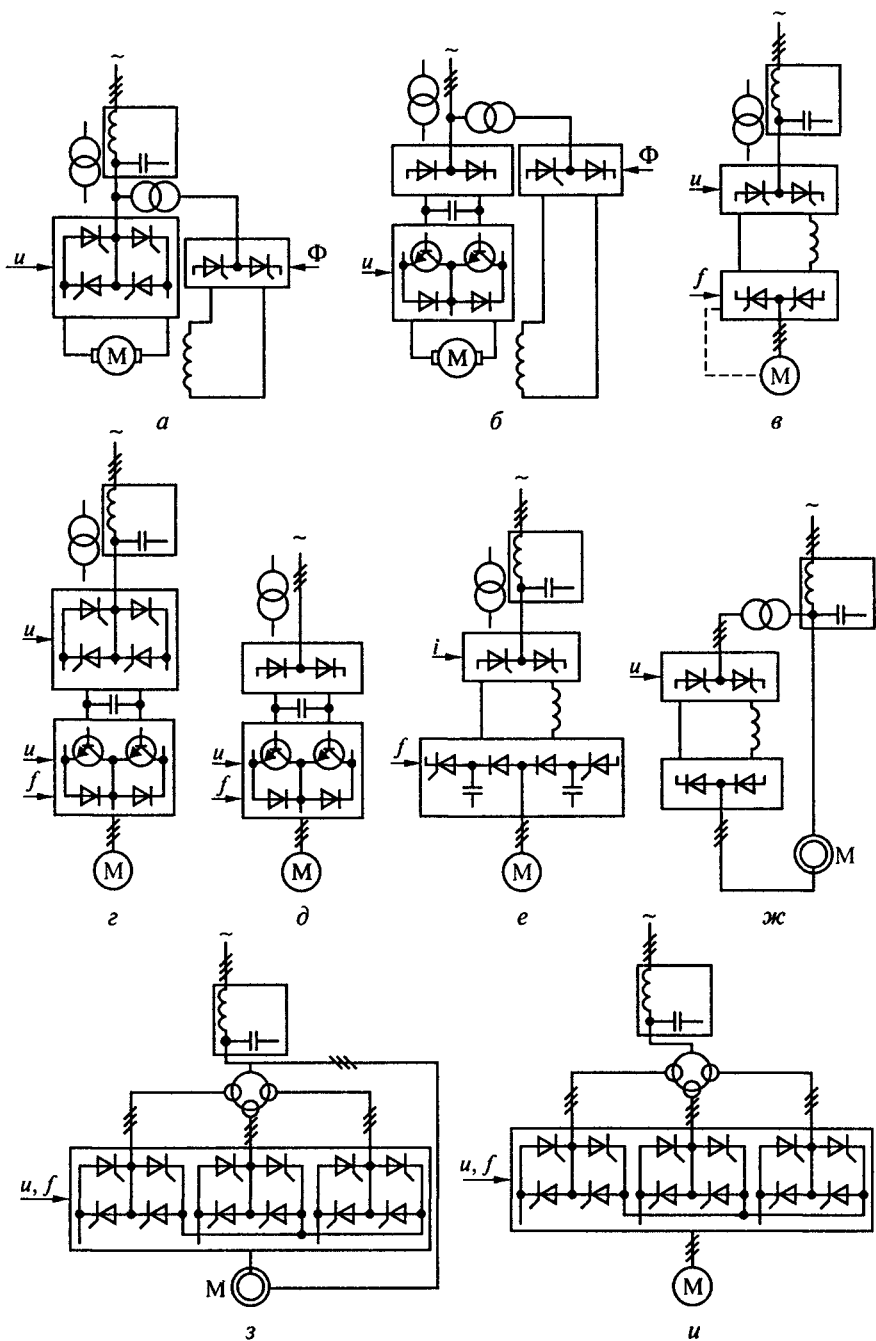


Рис. 1.9

В электроприводах постоянного тока, кроме управляемых выпрямителей (см. рис. 1.9, *а*), для получения высокого быстродействия применяют системы с неуправляемыми выпрямителями и широтно-импульсными преобразователями (см. рис. 1.9, *б*). В этом случае можно не использовать фильтрокомпенсирующее устройство.

Преобразователи, используемые для управления вентильными двигателями (ВД) (см. рис. 1.9, *в*), состоят из управляемого выпрямителя, аналогичного выпрямителю привода постоянного тока, и автономного инвертора, управляемого сигналами, поступающими от датчика положения ротора.

В системах частотного управления АД преимущественно используются инверторы напряжения (см. рис. 1.9, *г*, *д*). Если необходимость рекуперации энергии в сеть переменного тока отсутствует, то используют неуправляемый выпрямитель, что позволяет применять простую и экономичную схему преобразователя (см. рис. 1.9, *д*). Возможность применения полностью управляемых приборов и ШИМ делает эту схему одной из широко используемых в большом диапазоне мощностей. При необходимости рекуперации энергии в сеть переменного напряжения в выпрямителях наряду с тиристорными инверторами используют транзисторные инверторы, схемы которых полностью аналогичны схеме автономного инвертора асинхронного двигателя. Такие схемы получили название активных выпрямителей или активных источников питания автономных инверторов.

Преобразователи частоты с инверторами тока (см. рис. 1.9, *е*) состоят из двух звеньев. Первое звено составляют управляемый выпрямитель на тиристорах и промежуточный контур постоянного тока — реактор, второе звено составляет автономный инвертор тока, выполненный на обычных однооперационных или запираемых (ГТО) тиристорах. Автономный инвертор тока содержит конденсаторы, которые являются источником реактивной энергии для нагрузки.

Главное отличие схемы инверторов тока от инверторов напряжения заключается в отсутствии шунтирующих обратных диодов. Поэтому можно изменить полярность напряжения на входе инвертора и при неизменном направлении тока перевести двигатель в генераторный режим. Таким образом, при потреблении энергии из сети выпрямитель работает в режиме выпрямления, инвертор — в режиме инвертирования, электрическая машина — в двигательном режиме (в первом или третьем квадрантах электромеханических координат).

Если двигатель переходит в генераторную область (второй или четвертый квадрант электромеханических координат), то инвертор должен работать управляемым выпрямителем, полярность напряжения на промежуточном контуре изменяется, ток в этом кон-

туре не меняет своего направления, а управляемый выпрямитель переводится в инверторный режим.

К основным достоинствам преобразователей с инвертором тока относятся возможность рекуперации энергии в сеть и безаварийность режима короткого замыкания по выходу. Основные недостатки преобразователей с инвертором тока: ограничение верхней границы диапазона регулирования выходной частоты (обычно  $f_{2\max} = 100 \dots 125$  Гц); коммутационные перенапряжения на тиристорах АИТ; дополнительные потери в двигателе при несинусоидальной форме тока.

Преобразователи, содержащие неуправляемый выпрямитель и ведомый сетью инвертор и составляющие основу асинхронно-вентильного каскада (см. рис. 1.9, ж), применяют в приводах большой мощности при ограниченном диапазоне регулирования скорости.

Определенную перспективу развития имеют мощные преобразователи частоты с непосредственной связью в машинах двойного питания (см. рис. 1.9, з) и при управлении низкоскоростными асинхронными или синхронными двигателями (см. рис. 1.9, и). Для управления синхронными двигателями и машинами двойного питания могут также использоваться схемы преобразователей, приведенные на рис. 1.9, г, д. Рассмотренные схемы преобразователей охватывают диапазон мощностей от сотен ватт до десятков мегаватт. Наиболее интенсивное развитие в исследовании и применении имеют системы, показанные на рис. 1.9, в, д.

В системах многодвигательных электроприводов можно использовать общие выпрямители для группы широтно-импульсных преобразователей или автономных инверторов. Достоинство таких схем состоит в возможности энергосбережения в результате передачи энергии торможения с двигателя на двигатель.

В аспекте использования электромеханических преобразователей (ЭМП) в составе регулируемых электроприводов рассмотрим их работу в том же диапазоне мощностей, что и у преобразователей электроэнергии. Развитие ЭМП происходит в следующих направлениях: конструирование машин с учетом их совместной работы с управляемыми полупроводниковыми преобразователями; применение новых магнитных материалов; совершенствование или исключение контактных узлов; использование интенсивных методов охлаждения машин; развитие работ по высокотемпературной сверхпроводимости.

Электродвигатели постоянного тока совершенствуются благодаря использованию в щеточно-коллекторном узле металловолоконистых и металлокерамических материалов, что дает возможность существенно повысить угловую скорость двигателей. Но неизбежность применения щеточно-коллекторного узла в традиционных двигателях постоянного тока приводит к сокращению доли их выпуска по сравнению с двигателями переменного тока.

Безусловно перспективны вентильные двигатели (ВД), которые, являясь по существу синхронными двигателями, рассматриваются специалистами по ЭМП как двигатели постоянного тока, поскольку их питание осуществляется от сети постоянного тока через автономный инвертор, управляемый сигналами от датчиков положения ротора. Вентильные двигатели с высококоэрцитивными магнитами на роторе имеют минимальную удельную массу по сравнению с любыми другими машинами. При их использовании удачно решаются вопросы конструирования мехатронных модулей.

В ВД средней и большой мощности обычно используются СД с обмоткой возбуждения, расположенной на роторе.

В последнее время ВД мощностью от 30 до 200 кВт стали исполняться бесконтактными с обмоткой возбуждения, специальным образом располагаемой на статоре вместе с трехфазной обмоткой. Ротор в этом случае представляет собой безобмоточное зубчатое колесо (зубчатку), через которое замыкается магнитный поток, создаваемый обмотками возбуждения и переменного тока. Вращается он синхронно с вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазной обмоткой. Обмотка возбуждения в этом случае усиливает магнитный поток, чем увеличивает вращающий момент двигателя.

Асинхронные короткозамкнутые электродвигатели конструктивно наиболее просты и надежны, получают широкое распространение в регулируемых электроприводах с автономными инверторами с ШИМ. Совершенствование двигателей происходит благодаря использованию новых материалов и способов интенсивного охлаждения. Перспективы применения асинхронных электродвигателей с фазным ротором связаны прежде всего с их использованием в машинах двойного питания.

Синхронные электродвигатели традиционно применяются в диапазонах мощностей от сотен киловатт и выше. Их совершенствуют, исключая контакты, в результате перехода на вращающиеся выпрямители и применения постоянных магнитов.

Определенное развитие получают индукторные электродвигатели и электродвигатели с когтеобразными полюсами. Такие электродвигатели имеют наиболее простой ротор, состоящий из магнитомягкого сердечника, допускают высокие частоты вращения ротора, обладают высокой надежностью.

Все более широкое применение находит вентильно-индукторный электропривод (ВИП), основными достоинствами которого являются простота, технологичность, невысокая стоимость применяемого индукторного электродвигателя, сочетающиеся с широкими регулировочными возможностями. Мощность таких электроприводов от единиц до нескольких сотен киловатт и более.

Структура силовой части привода в случае питания его от трехфазной сети переменного тока аналогична структуре силовой части асинхронного привода (см. рис. 1.9, д). Автономный инвертор напряжения в рассматриваемом случае выполняет функции коммутатора. При этом дополнительно используется датчик положения ротора для коммутации ключей, что выполняется аналогично вентильному приводу.

В современных схемах ВИП широко используются микропроцессорные средства управления, позволяющие в ряде случаев отказаться от применения датчика положения, а необходимую для работы информацию о положении ротора получать косвенно.

В диапазоне малых мощностей традиционно развиваются шаговые электродвигатели, которые в силу своих конструктивных особенностей обеспечивают создание компактных многокоординатных механотронных модулей с дискретными перемещениями.

Состояние электродвигателей, как и иных технических средств АТК, постоянно контролируется. В связи с этим, кроме датчиков скорости, положения ротора, датчиков Холла, в двигатели встраивают датчики температуры и вибраций. Это дает возможность повысить эксплуатационную надежность электродвигателей. Другим способом повышения надежности электродвигателей в производственных условиях является переход на конструктивно закрытые их варианты с использованием методов интенсивного поверхностного охлаждения. Это позволяет исключить дисбаланс вращающихся частей двигателей из-за электростатического оседания на них производственной пыли при самовентилиации и устранить преждевременное разрушение опор из-за вибраций.

При проектировании нового технологического оборудования стремятся к использованию «коротких» механических передач и безредукторных электроприводов. По массогабаритным показателям и КПД безредукторные электроприводы вполне сравнимы с редукторными электроприводами, если учитывается не только двигатель, но и редуктор [43]. Применение «коротких» передач и безредукторных электроприводов дает существенный эффект в достижении более высоких качественных показателей систем управления движением исполнительных органов машин и технологическими переменными и в достижении более высокой надежности механизмов. Это объясняется тем, что механическая передача, охваченная обратными связями, существенно ограничивает полосу пропускания частот системы управления из-за наличия упругих механических колебаний. Простейшие механические передачи промышленного применения имеют несколько частот упругих колебаний из-за податливости зубьев, валов и опор. Если учесть также усложнение передач из-за необходимости применять устройства выборки люфтов, то можно полагать, что тенденция движения к безредукторным приводам будет сохраняться, особенно

для технологического оборудования высокой производительности и высокого качества. Этим же обусловлено развитие работ по созданию типовых приводных модулей технологического оборудования и механотронных систем.

Применение пневмоприводов ограничено той областью, где по условиям технологической среды не применимы электроприводы. С учетом явной тенденции перехода в гидроприводах на насосы переменной производительности, в которых регулируются скорость и давление, гидроприводы следует рассматривать как электроприводы с гидромеханической передачей усилия или момента. Традиционная область применения гидроприводов — объекты с малыми перемещениями и большими усилиями.

### **1.2.2. Программируемые контроллеры и промышленные компьютеры**

Проникновение ПК во все сферы современной жизни повлекло за собой постепенное стирание различий между бытовым и промышленным программным обеспечением. Персональные компьютеры решают не только все задачи управления верхнего уровня иерархии, но и заняли прочное место в реализации некоторых подсистем управления производством (например, подсистемы визуализации и обслуживания). В настоящее время ПК активно используют в управлении технологическими процессами, что объясняется возросшей необходимостью снижения затратности производства. Реализация систем автоматизированного управления на базе ПК позволяет сэкономить немалые денежные средства. Однако выбор между гибко программируемым контроллером и ПК зависит не только от технических характеристик оборудования или граничных условий решаемой задачи. Основную роль в таком выборе играют личные предпочтения и опыт пользователей. Поэтому особое внимание производители средств автоматизации уделяют широте функций предлагаемых ими систем, что способствует свободе выбора потребителем оборудования. Невозможно дать общие рекомендации о том, в каких случаях нужно применять гибко программируемые контроллеры, а в каких — отдать предпочтение ПК. Несмотря на существование таких критериев, как стоимость системы, возможность ее работы в реальном режиме времени, надежность, вычислительная мощность или сложность сервисного обслуживания, их применение зависит от конкретной постановки задачи, особенностей приложения и требований пользователей.

Наиболее важную роль играют работоспособность системы в реальном режиме времени и ее надежность — качества, которыми до сих пор системы на базе ПК не обладали, но без которых система управления технологическим процессом невозможна.

Персональный компьютер не рассчитан на то, чтобы реагировать на какие-либо события в управляемом процессе в течение предопределенных промежутков времени, что является его основным недостатком. При работе ПК возможна ситуация, когда операционная система или части пользовательских приложений блокируют центральный процессор на достаточно продолжительные промежутки времени. Например, обработка прерывания может исключить на некоторое время обработку последующих прерываний. Такое поведение системы не приемлемо для технологических процессов, требующих строго определенного времени реакции.

Гибко программируемые контроллеры работают таким образом, что следующие друг за другом алгоритмические шаги и процедуры исполняются за строго определенное время. Такая концепция позволяет легко оценить или измерить максимальное время реакции системы управления. Превышение времени цикла исполнения программы управления (максимальное время реакции системы) является одним из самых важных событий, на которые контроллер должен непременно реагировать.

Конечно, ПК также можно сделать способным работать в реальном режиме времени. Выбор подходящей операционной системы и грамотное написание программного обеспечения позволят и при использовании персональных компьютеров достичь гарантированного времени исполнения программного цикла и обработки прерываний. Однако эти преимущества имеют и некоторые недостатки: чем больше функций работы в реальном режиме времени встроено в персональный компьютер, тем сильнее это конкретное решение отличается от общепринятых стандартов и таких связанных с ними качеств, как открытость и совместимость с другими системами.

Возможность работы системы в реальном режиме времени является не единственным фактором при выборе между гибко программируемыми контроллерами и ПК. Возможность подключения системы к информационной сети, функции обработки данных и визуализации, качество графического интерфейса играют также важную роль.

В тех случаях, когда дополнительные функции начинают существенно превалировать над функциями управления и требуется использование всего спектра возможностей ПК, предпочтительно применять программные решения на базе персональных компьютеров

Если решаемая задача управления требует полноценной работы в режиме реального времени (это значит, что система при всѐх обстоятельствах в 100 % случаев реагирует на все события в управляемом процессе в строго определенные промежутки времени), без использования гибко программируемых контроллеров трудно обойтись. Замена решений на базе малых программи-

руемых контроллеров на системы, выполненные на базе ПК, невыгодна с точки зрения цены. Однако в тех случаях, когда нарушение строгих временных рамок допустимо, применение открытых систем на базе персональных компьютеров не представляет сложности.

Для обеспечения абсолютной предсказуемости времени реакции операционная система должна быть соответствующим образом расширена. Подобные расширения всегда специфичны для определенных производителей, поскольку на международном рынке не существует общепризнанных стандартов операционных систем (или расширений операционных систем) реального времени. Эта необходимость создания нестандартных расширений влечет за собой потерю самого главного преимущества решений на базе ПК — их открытости, а решение становится зависимым от конкретного производителя, осложняется последующий переход на новую версию операционной системы.

Фирма «Siemens» в рамках семейства средств автоматизации SIMATIC Totally Integrated Automation предлагает новые системы SIMATIC WinAC (Automation Center), которые позволяют решить все перечисленные проблемы. Новые устройства недороги, совместимы с современными стандартами, просты в применении и обслуживании и пригодны для всего спектра приложений, написанных для операционной системы Windows. Однако и для этих систем действует правило: их применение целесообразно лишь в том случае, если кроме традиционных задач управления пользователю необходимы также типичные функции персональных компьютеров — обработка данных и визуализация управляемого процесса. Для задач управления гибко программируемые контроллеры, как и прежде, остаются наиболее рентабельными.

WinAC — это не просто программная эмуляция контроллера на ПК. Новый продукт фирмы «Siemens» представляет собой интегрированное и комплексное решение задач автоматизированного управления технологическими процессами на базе персональных компьютеров.

Преимуществами таких систем являются:

экономия средств в случаях, когда ПК является частью технологического оборудования;

открытость — программное и аппаратное обеспечение не зависят от конкретного производителя, обладают высокой производительностью и низкой ценой;

неограниченный объем оперативного запоминающего устройства (ОЗУ);

возможность решения задач визуализации без необходимости затрат на дополнительное проектирование;

возможность использования функций, написанных на языке С.

К недостаткам следует отнести следующие:



реализация режима реального времени возможна только в результате расширения систем;

отсутствие возможности масштабирования аппаратного обеспечения (в семействах программируемых контроллеров имеется значительно большее разнообразие устройств различных классов мощности);

аппаратное обеспечение стандартных ПК (не ПК промышленного исполнения) значительно хуже программируемых контроллеров с точки зрения надежности. Это относится и к системному программному обеспечению, так как оно значительно проще в программируемых контроллерах, чем в ПК;

невозможность распознавания ситуации перебоя электропитания.

Однако промышленные компьютеры наряду с программируемыми контроллерами активно используются в управлении технологическими агрегатами и комплексами. И эта тенденция в дальнейшем будет усиливаться.

### **1.2.3. Контрольно-измерительные средства**

Устройства преобразования, хранения, распределения и выдачи информации входят, как правило, в состав модулей программируемых контроллеров. В технологических агрегатах и комплексах используются разнообразные устройства, предназначенные для получения информации. Имеются следующие тенденции развития таких устройств:

расширяющееся применение датчиков для контроля электромагнитных, механических и технологических переменных, качества изделий;

стремление к использованию методов прямого измерения контролируемых переменных и установке датчиков в непосредственной близости от исполнительных органов рабочей машины;

применение датчиков для контроля состояния электротехнического, механического и технологического оборудования; использование информации для диагностирования и оповещения операторов через компьютерные системы управления о состоянии оборудования.

В современном оборудовании контролю подвергаются: температура в коммутационных аппаратах, узлах электродвигателей, управляемых преобразователей, опорах механизмов; степень вибраций во всех функционально значимых механических узлах системы; зазоры в механических передачах; усилия и упругие моменты в механизмах; износ технологического оборудования и др.

В качестве основных контрольно-измерительных средств применяются датчики, непосредственно воспринимающие изменения контролируемого параметра и преобразующие эти изменения в механические или электрические сигналы.

В основном датчики представляют собой единое изделие (собственно датчик и преобразователь), имеющее на выходе электрические унифицированные сигналы (УС): релейные, непрерывные токовые (0... 5 мА, 0... 20 мА) и непрерывные напряжения постоянного тока (0... 10 мВ, 0... 50 мВ, 0... 1 В, 0... 10 В, 0... 12 В, 0... 24 В), непрерывные частотные (1500... 2500 Гц, 4000... 8000 Гц), непрерывные напряжения переменного тока частотой 50 Гц (0... 1 В, 0... 2 В) и др. Перечисленные электрические сигналы определены стандартами.

Датчики оцениваются по точности, линейности и разрешающей способности, частотной характеристике, характеристике шума, входному и выходному импедансу (полному сопротивлению) и др. По структуре построения в зависимости от способа соединения элементов датчики могут быть с последовательным преобразованием, дифференциальные и компенсационные [10].

**Датчики электромагнитных переменных.** Датчики тока и напряжения. В системах автоматического управления электроприводом сигналы, пропорциональные току, снимаются с шунтов, трансформаторов тока. Преобразованные сигналы датчиков используются также для измерения ЭДС, мощности, потока и т.д. Основными задачами при создании датчиков тока и напряжения являются задачи гальванического разделения силовых цепей и цепей управления, обеспечения высокого быстродействия и точности.

В аналоговых датчиках напряжения для разделения цепей применяют модуляцию входного напряжения и трансформирование с последующей демодуляцией и усилением.

В качестве датчиков тока все шире используются преобразователи, основанные на эффекте Холла, которые строятся в виде магнитопроводов с зазором. Магнитопровод из магнетомягкого материала намагничивается при помощи обмотки, по которой течет измеряемый ток. В зазоре устанавливается датчик Холла, питаемый от стабилизированного источника тока. Датчики тока с использованием эффекта Холла обеспечивают гальваническую развязку между цепями измерения и выходной при напряжениях до нескольких киловольт, точность до 1 % и полосу пропускания до 1 кГц [48].

**Датчики потока и магнитной индукции.** Для контроля указанных параметров применяют датчики Холла. Достоинствами этих датчиков являются: возможность измерения постоянных и переменных магнитных полей, хорошее пространственное разрешение из-за малых размеров преобразователей. Недостатком является сравнительно большая зависимость постоянной Холла и, следовательно, ЭДС от температуры.

**Датчики механических переменных.** Датчики параметров движения. Эти датчики предназначены для получения инфор-

мации о линейных и угловых перемещениях, скоростях и ускорениях, силах и моментах.

Основными требованиями, предъявляемыми к датчикам перемещений, являются: высокая точность измерения (или контроля) перемещений, быстродействие, надежность, помехоустойчивость информативного параметра, малые нелинейные искажения.

Существующие датчики перемещений могут классифицироваться по различным признакам, основными из которых являются характер измеряемых перемещений, физический принцип действия чувствительного элемента, структура построения, вид выходного сигнала [10].

По физическому принципу действия чувствительного элемента все существующие датчики можно разделить на:

фотоэлектрические (оптоэлектронные), использующие эффект периодического изменения освещенности (датчики снабжаются каналом нулевого импульса — началом отсчета, что дает возможность при наличии счетчика использовать датчик не только для регулирования скорости, но и как датчик положения);

электростатические — емкостные (основанные на эффекте периодического изменения емкости) и пьезоэлектрические (основанные на эффекте возникновения электрического заряда на поверхности некоторых материалов в момент деформации);

электромагнитные (использующие, например, эффект периодического изменения индуктивности или взаимоиндуктивности);

электроакустические (основанные, например, на эффекте изменения энергии поверхностной акустической волны);

реостатные (использующие эффект линейного изменения сопротивления);

лазерные (интерферометрические).

Сравнительный анализ перечисленных датчиков показывает, что, например, *электростатические*, в частности емкостные, датчики обладают высокой чувствительностью и добротностью, малой нелинейностью характеристики, малыми тепловыми потерями. Однако широкое распространение емкостных датчиков ограничено большим выходным сопротивлением, необходимостью жесткой герметизации, трудностью исключения влияния паразитных емкостей.

*Электромагнитные индуктивные* датчики уступают емкостным по чувствительности и линейности характеристики, но превосходят их по выходной мощности, помехоустойчивости, надежности в условиях производства (где возможны колебания температуры и влажности окружающей среды).

Достоинствами *электромеханических электроконтактных* датчиков являются простота конструкции, большие мощность и амплитуда выходных сигналов. К недостаткам следует отнести худ-

шие по сравнению с другими датчиками метрологические характеристики — как статические, так и динамические.

*Фотоэлектрические* датчики обладают наибольшей точностью среди существующих преобразователей, наивысшей разрешающей способностью, отличаются высокой чувствительностью и быстрой реакцией, простотой и надежностью конструкции, малыми размерами и массой, отсутствием механической связи с контролируемым объектом, малой инерционностью, возможностью дистанционного измерения и контроля без измерительного усилия. К недостаткам фотоэлектрических датчиков следует отнести чувствительность к посторонним источникам излучения, недостаточную стабильность и надежность.

*Тахогенераторы* постоянного тока серии ПТ и переменного тока серии ТТ применяются в регулируемых электроприводах средней и большой мощности при невысокой точности регулирования скорости. Они обладают низкими оборотными и полюсными пульсациями и высокой линейностью и стабильностью характеристик. Магнитная система тахогенераторов ПТ свободно расположена на валу посредством шариковых подшипников и фиксируется креплением к подшипниковому щиту приводного электродвигателя. Тахогенераторы с частотой вращения  $600 \text{ мин}^{-1}$  и выше выполняются с добавочными полюсами. Тахогенераторы серий ПТ и ТТ имеют значительные размеры и массу, используются в основном как датчики скорости в мощных приводах прокатных станков, агрегатов бумажной, химической промышленности и как датчики скорости мощных турбоагрегатов.

Для приводов средней мощности, не требующих высокой точности регулирования скорости, используются тахогенераторы постоянного тока серий ЭТ, ТМГ, ТД.

Тахогенераторы серий ПТ и ТТ предназначены для работы в запыленных помещениях в условиях умеренного и тропического климата. Тахогенераторы ПТ производят в закрытом исполнении с естественным охлаждением. По способу монтажа тахогенераторы имеют фланцевое исполнение со станиной без лап.

Для станочного привода используются тахогенераторы серии МЭТ, обладающие малой асимметрией и нелинейностью характеристик.

В комплектных электроприводах используются встроенные тахогенераторы, размещенные на одном валу с двигателем, при этом кроме указанных серий тахогенераторов используются машины типа СЛ.

В современном электроприводе не применяют соединение тахогенератора с валом посредством гибкой передачи и редукторов, так как гибкие передачи обладают свойствами колебательного звена и ухудшают динамику привода, а работа редуктора затруднена из-за наличия люфтов в передачах.

Однако высокие точностные и эксплуатационные требования, предъявляемые к промышленным системам автоматики, привели к тому, что в качественных системах в основном используют фотоэлектрические и электромагнитные датчики перемещения и скорости с цифровой обработкой сигналов.

**Датчики усилия.** В этих датчиках применяют магнитострикционные и пьезоэлектрические преобразователи.

Работа *магнитострикционного* (магнитоупругого) преобразователя основана на магнитоупругом эффекте. Если на намагниченный образец ферромагнитного тела воздействует внешняя механическая сила, то тело деформируется, домены изменяют свою ориентацию и индукция в материале изменяется. Таким образом, возникает магнитострикционная составляющая деформации, которая накладывается на чисто механическую деформацию, подчиняющуюся закону Гука. Поэтому упругие свойства ферромагнитного материала меняются с изменением усилия. При этом происходит изменение магнитных свойств, которое отражается на кривой намагниченности (обратный магнитострикционный эффект). Поскольку абсолютная магнитная проницаемость вещества  $\mu = B/H$ , то при заданной напряженности поля  $H$  изменение индукции  $B$  эквивалентно изменению магнитной проницаемости. Рассмотренное явление используется для преобразования механической силы в электрическую величину.

Лучшими метрологическими характеристиками обладает магнитоанизотропный трансформаторный датчик. Пока измеряемая сила не действует, магнитопровод такого преобразователя магнитоизотропен: его магнитная проницаемость одинакова во всех направлениях. Действие силы приводит к уменьшению магнитной проницаемости в направлении сжимающей силы и к увеличению — в поперечном направлении (при применении пермаллоя в качестве материала сердечника). Под действием механических напряжений материал становится магнитоанизотропным.

Датчик изготавливают из листового ферромагнитного пакета пластин, имеющих четыре отверстия, сквозь которые пропускают обмотку питания и измерительную обмотку, образующие первичную и вторичную обмотки трансформатора. Они расположены под углом  $45^\circ$  к направлению действия силы и под углом  $90^\circ$  друг к другу. Магнитное поле, создаваемое обмоткой питания при отсутствии измеряемой силы, направлено параллельно виткам измерительной обмотки и не заходит в нее. В измерительной вторичной обмотке ЭДС не индуцируется. Под действием силы магнитная проницаемость изменяется, что вызывает деформацию магнитного поля. Магнитный поток пронизывает измерительную обмотку и индуцирует в ней ЭДС, пропорциональную действующей силе. Чувствительность преобразователя зависит от материала сердечника.

Для магнитострикционных датчиков силы характерны: малое воздействие на измеряемую величину (вследствие повышенной жесткости), высокая стойкость и надежность (вследствие механической прочности), посредственная линейность, значительная чувствительность к температуре и паразитным магнитным полям, недостаточная стабильность во времени, ограниченность полосы пропускания. Точность магнитострикционных датчиков составляет несколько процентов верхнего предела измерения.

Работа *пьезоэлектрических* преобразователей основана на явлении пьезоэлектричества, состоящего в возникновении (или в изменении) электрической поляризации в некоторых анизотропных диэлектриках — природных (кварц, турмалин и т. п.) или искусственных (сульфат лития, синтетический кварц, обработанная керамика и т. п.), когда они деформируются под действием определенно направленной силы. Если расположить пару обкладок на противоположных сторонах пьезоэлектрической пластинки и приложить к пластине силу, то под действием силы на обкладках появятся заряды противоположных знаков и, следовательно, возникнет разность потенциалов, пропорциональная приложенной силе. Такое конденсаторное устройство дает возможность измерять силы и любые физические величины, приводящие к возникновению сил: давление, ускорение, вибрацию. Это конденсаторное устройство представляет собой пьезоэлектрический датчик.

Подвергнутый действию ориентированного электрического поля, пьезоэлектрический материал деформируется; в частности, можно вызвать его возбуждение на своем механическом резонансе. Это свойство пьезоэлектриков используется для управления частотой генерации. Отсюда следует возможность изготовления пьезоэлектрических датчиков, резонанс которых возникает на определенной частоте, чувствительной к изменению различных физических величин (температуры, давления и т. п.).

Часто в датчиках вместо пьезоэлектрических кристаллов используется пьезокерамика, более дешевая и удобная в изготовлении. Наиболее широко применяется семейство керамик, получаемых на основе оксидов свинца, циркония и титана.

**Датчики деформаций.** В качестве этих датчиков применяют *тензорезисторные* преобразователи (металлические, проволочные, полупроводниковые и др.). Тензорезисторный преобразователь (тензорезистор) представляет собой проводник, изменяющий свое сопротивление при деформации растяжения или сжатия. Длина проводника  $l$  и площадь поперечного сечения  $S$  изменяются при его деформациях. Эти деформации кристаллической решетки приводят к изменению удельного сопротивления проводника  $\rho$  и, следовательно, к изменению полного сопротивления.

Тензорезисторные датчики приклеивают к объекту, и они деформируются вместе с ним. При этом из-за малых размеров (в

зависимости от типа от 1 мм до 1 см) такие датчики обеспечивают весьма точные измерения деформаций.

Применение датчиков деформаций не ограничивается определением напряжений. Любые физические величины, особенно механические, действие которых на объект вызывает его деформацию, могут быть преобразованы с помощью измерителей удлинений. Это относится к давлению, ускорению, моменту сил. Датчик деформаций и объект составляют, таким образом, совокупный измеритель воздействующей физической величины.

Обычно датчик состоит из сетки, образованной нитевидными проводниками длиной  $nl$ , где  $l$  — длина одного нитевидного элемента;  $n$  — их количество.

Наилучшим отечественным материалом для изготовления проводниковых тензорезисторов, используемых при температурах ниже  $180^\circ\text{C}$ , является константан, представляющий собой сплав никеля (45%) и меди (55%).

**Акселерометры.** Эти приборы, представляющие собой измерители ускорения, широко применяются в промышленности при оценке чувствительности изделий к ударам и вибрациям. В последнее время буферные и емкостные преобразователи, использовавшиеся в этих измерителях, заменяют пьезоэлектрическими датчиками. Эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя представляет собой источник напряжения с последовательно включенным конденсатором, на котором образуется заряд. Выходное переменное напряжение такого датчика, вырабатываемое под воздействием вибрационного ускорения, обычно имеет очень малую амплитуду. Поэтому для увеличения выходного сигнала склеивают несколько пьезокристаллов. Поскольку значение переменного заряда на конденсаторе очень мало, то такой датчик обычно подключают ко входу усилителя заряда с малым входным током, одновременно преобразующего выходное напряжение датчика в сигнал скорости. Если этот сигнал дополнительно проинтегрировать, а затем протектировать с высокой точностью, то получаемое напряжение будет пропорционально амплитуде смещения (это напряжение можно проградуировать, например, в миллиметрах перемещения на вольт).

**Датчики технологических переменных.** Датчики температуры. Выбор типа датчика температуры в основном определяется диапазоном изменения измеряемой температуры и условиями эксплуатации. Для измерения температуры используют термопары, термосопротивления, полупроводниковые датчики и пирометры.

В качестве датчиков температуры часто применяют *термопары*, поскольку они имеют широкий рабочий диапазон температур и высокую надежность. При измерении температуры с использованием термопары последовательно с измерительным спаем включают компенсационные спаи, позволяющие получить ток опреде-

ленного направления и максимальную ЭДС измерительного спая. В зависимости от рабочего диапазона температур и среды, в которой находится датчик, применяют различные пары металлов. Для работы в широком диапазоне температур передаточные характеристики датчиков, как правило, недостаточно линейны, поэтому для их линеаризации требуется применять специальные схемы.

Лучшие по сравнению с термопарами разрешение и повторяемость характеристик достигаются в *термометрах сопротивления* — приборах, использующих эффект изменения электрического сопротивления проводников при изменении температуры. В промышленности часто применяют платиновые термометры, обладающие высокой точностью и механической и электрической стабильностью.

Термисторы — другой тип термометров сопротивления — получают спеканием смесей металлических сплавов, при этом образуется керамика с большим отрицательным температурным коэффициентом. Температурный диапазон металло-пленочных сопротивлений по сравнению с термисторами шире, а линейность выше, однако термисторы имеют примерно в 10 раз бóльшую чувствительность. При проведении измерений температуры такими датчиками обычно требуется преобразовать изменение сопротивления в изменение напряжения и по возможности линеаризовать зависимость выходного напряжения от температуры.

В тех случаях, когда возможно только визуальное наблюдение исследуемого процесса, для измерения температуры применяют *оптические пирометры*. Диапазон измеряемых температур в этом случае ограничивается диапазоном спектральной чувствительности используемого датчика.

Одним из современных методов измерения температуры является метод, основанный на использовании транзистора со смещением базового перехода в прямом направлении. В диапазоне рабочих температур  $\pm 100^\circ\text{C}$  погрешность измерения этим методом составляет  $0,1^\circ\text{C}$ . В рабочем диапазоне температур этих датчиков проводится наибольшее число измерений температуры. Отрицательный температурный коэффициент падения напряжения на переходе «база — эмиттер» биполярного транзистора равен  $2,2\text{ мВ}/^\circ\text{C}$ , и при питании от стабилизированного источника тока датчик может быть сделан очень стабильным.

Датчики давления и расходомеры. Раньше для измерения давления и расхода жидкости или газа использовались потенциометрические приборы. Низкая стоимость и высокий уровень выходного напряжения обеспечили широкое применение этих приборов в простых системах. Однако им свойственны высокая чувствительность к ударам и вибрациям, а также значительные погрешности, обусловленные механической конструкцией, приводящие к нелинейности передаточных характеристик (обычно примерно 3%), что ограничивает применение приборов такого типа.



Для устранения недостатков, свойственных потенциометрическим датчикам давления, были разработаны *бесконтактные тензометры* — приборы, обеспечивающие существенное увеличение погрешности и стабильности и имеющие типовую погрешность 0,5 % полной измерительной шкалы. Их уровень выходного напряжения находится в милливольтовом диапазоне, поэтому после прибора обычно ставят предусилитель. В отличие от других бесконтактных приборов полупроводниковые тензометры располагают непосредственно на диафрагме, воспринимающей давление, что устраняет механические соединительные детали. Частотный диапазон, чувствительность к вибрациям и точность этих приборов такие же, как у бесконтактных тензометров. Однако поскольку уровень выходного напряжения в полупроводниковых тензометрах низок, то в этом случае также необходимы предусилители, а низкая чувствительность делает их удобными только для измерений высоких давлений. Дальнейшее улучшение характеристик достигается использованием кристаллических диафрагм с напыленными пьезорезисторами.

Усовершенствование тензометров связано с компенсацией различных ошибок, что достигается введением пьезорезистора в состав гибридной интегральной схемы. Гибридный прибор содержит встроенный вакуумный эталон, внутренний нагреватель, который, вызывая локальное нагревание (стабилизируя температуру локальной области), уменьшает температурные эффекты, и пьезорезисторы, включенные в схему чувствительного моста Уитстона, служащую одновременно для предварительного усиления и формирования сигнала.

Расход жидкости обычно измеряют датчиками перепада (разности) давления или механическими контактными датчиками (например, турбинами). Скорость потока  $v$  характеризует скорость движения жидкости и обычно имеет размерность м/с. Объемный поток  $Q$  — объем жидкости, протекающий в единицу времени (например, м<sup>3</sup>/с). Для газов поток массы  $M$  определяют в кг/с.

*Дифференциальные манометры* (дифманометры) различных систем используют для измерения технологических параметров расхода жидкости, газа или пара, разности давлений (перепада), избыточного давления (напора), разрежения (тяги), уровня жидкости в открытых резервуарах и в резервуарах под давлением. Измерение расхода жидкости или газа дифманометрами-расходомерами осуществляется по методу переменного перепада давлений. В этом случае дифманометр-расходомер работает совместно с сужающим устройством, которое устанавливается непосредственно в трубопроводе и служит для создания переменного перепада давления. В качестве сужающего устройства могут применяться диафрагмы, сопла или расходомерные трубы. При измерении расхода жидкости или газа с помощью дифманометров

измеряется разность давлений (перепад) до и после сужающего устройства.

Измерение расхода методом переменного перепада можно выполнять при соблюдении следующих условий:

вещество, протекающее через сужающее устройство, должно находиться в одной фазе — жидкой или газообразной;

протекающее вещество должно полностью заполнять сечение трубопровода и сужающего устройства;

изменение расхода вещества должно происходить плавно, без пульсаций;

трубопровод до и после сужающего устройства должен быть на достаточном протяжении прямолинейным и цилиндрическим.

Основным элементом измерителей скорости потока является точечный датчик, например трубка Пито для газовых потоков. Однако точность таких измерителей невысокая. Бóльшую точность имеют многоточечные датчики или датчики с усреднением по линии (такие, как кольцевые датчики). При измерении перепада давления потоков газов низкого давления возможны другие источники ошибок, что может потребовать применения чувствительных датчиков давления на основе трансформаторов линейных перемещений.

К *расходомерам с механическим контактом* относятся: турбинные и гироскопические преобразователи, которые измеряют скорость потока по угловому моменту; охлаждаемые термоэлектрические преобразователи скорости; датчики, измеряющие скорость по электрическому сопротивлению, а также датчики, измеряющие скорость потока с использованием  $\beta$ -излучения. Для широко распространенных турбинных расходомеров связь между скоростью потока  $v$  и угловой скоростью вращения турбины  $\omega$  выражается следующим уравнением:

$$v = (\omega r) / \operatorname{tg} \alpha, \quad (1.5)$$

где  $r$  — средний радиус лопастей ротора;  $\alpha$  — угол между лопастями ротора.

**Датчики уровня.** Для измерения уровня жидкости и его изменения широко применяются поплавковые датчики, дифференциальные датчики давления, ультразвуковые и радиоактивные.

Поплавковые датчики отличаются простотой и разнообразием методов преобразования изменений измеряемого уровня в показания отсчетного устройства. Однако при измерении уровня вязких жидкостей они работают неудовлетворительно.

В том случае, когда известна плотность жидкости  $W$ , высоту столба жидкости можно измерять дифференциальным датчиком давления (дифманометром), который при этом должен фиксировать разность гидростатического давления  $\Delta P$  между уровнем поверхности и плоскостью дна. Высота столба жидкости в этом слу-

чае определяется отношением  $\Delta P/W$ . По принципу действия измерительной системы дифманометры делятся на поплавковые, кольцевые, колокольные, мембранные и сильфонные.

Ультразвуковые датчики могут входить в состав локационных установок, которые особенно удобны при измерении уровня жидкостей в высоких цистернах, а также в состав устройств, измеряющих дискретные значения уровней. В последнем случае излучатели, расположенные на разных уровнях, посылают ультразвуковые сигналы в горизонтальном направлении в сторону соответствующих приемных датчиков, установленных на противоположной стороне цистерны. Уровень тяжелых смесей, таких, как цемент и бумажная масса, лучше всего измерять радиоактивными датчиками, устанавливаемыми аналогично ультразвуковым устройствам дискретного измерения уровня.

К датчикам технологических переменных относятся также датчики толщины полосового материала (металла, бумаги, пластика и др.), влажности материала, массы и других переменных.

#### 1.2.4. Коммутационная и защитная аппаратура

Коммутационные электрические аппараты предназначены для коммутации электрической цепи и проведения тока. Аппараты должны допускать работу при напряжении на выводах главной и вспомогательной цепей в пределах от  $U_{\text{ном.р}}$  до  $1,1U_{\text{ном.р}}$ , на выводах цепи управления — в пределах  $(0,85 \dots 1,1)U_{\text{ном.р}}$ . Под номинальным рабочим напряжением  $U_{\text{ном.р}}$  понимают номинальное напряжение сети, в которой аппарат может работать в данных условиях.

Номинальная частота сетей переменного тока, к которым присоединяются аппараты, 50 или 60 Гц.

Аппараты должны допускать работу в одном, нескольких или во всех следующих режимах работы: продолжительном, прерывисто-продолжительном, повторно-кратковременном, кратковременном.

Для кратковременного режима работы аппаратов устанавливаются следующие предпочтительные значения длительности рабочего периода: 5; 10; 15; 30 с и 10; 30; 60 и 90 мин.

Для повторно-кратковременного режима работы аппаратов устанавливаются предпочтительные значения относительной продолжительности включения (ПВ): 15; 25; 40 и 60 % (100 % — непрерывное включение).

**Электромагнитные контакторы.** Контактторы используются в системах управления электроприводами для включения и отключения приемников электроэнергии.

Контакторы различаются между собой:

по роду тока главной цепи — постоянного тока, переменного тока, постоянного и переменного токов;

роду тока цепи управления — с управлением постоянным током, с управлением переменным током;

числу главных полюсов — от одного до пяти;

номинальному току главных цепей — на токи 4; 6,5; 10; 16; 25; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630; 1000; 2500 А;

номинальному напряжению главной цепи — на постоянное напряжение 220; 440; 600 В, на переменное напряжение 380; 500 и 660 В;

номинальному напряжению включающих катушек — на постоянное напряжение 24, 48, 60, 110, 220 В, на переменное напряжение 24, 36, 110, 127, 220, 230, 240, 380, 400, 415, 500, 660 В частотой 50 Гц и 110, 220, 380, 440 В частотой 60 Гц;

наличию и исполнению вспомогательных контактов;

роду присоединения проводников;

категории применения;

воздействию климатических факторов;

степени защиты, за исключением специальных контакторов IP00;

классу, соответствующему частоте включений:

Класс .....	0,3	1	3	10	30
Допустимая частота включений в 1 ч .....	30	120	300	1200	3600

Используются отечественные контакторы серий МК, КПВ600, КПВ620, КТПВ600, КТ6000, КТ7000, КТП600, КТ64, КТП64, КТ65, КТП65 и др. [48]. Например, контакторы серии МК предназначены для работы в силовых электрических цепях и цепях управления общепромышленных установок при постоянном напряжении до 440 В и переменном до 660 В частотой 50 и 60 Гц. Контактторы имеют четыре модификации: МК1 ( $I_{ном} = 40$  А), МК2 ( $I_{ном} = 63$  А), МК3 ( $I_{ном} = 100$  А) и МК4 ( $I_{ном} = 160$  А). Собственное время срабатывания контакторов при включении 0,08 с, при отключении — 0,05 с. Втягивающие катушки выполняются только на постоянный ток напряжением 24, 48, 110 и 220 В. Контактторы могут работать в продолжительном, прерывисто-продолжительном, кратковременном и повторно-кратковременном режимах. Допустимая частота срабатывания контакторов до 1200 циклов в 1 ч при ПВ = 40 %. Контактторы выполняются для переднего присоединения силовой цепи и цепи управления, их устанавливают на изоляционных или заземленных металлических панелях и на рейках.

Контакторы серий КПВ600, КПВ620 и КТПВ600 предназначены для коммутации силовых цепей при тяжелых режимах работы. Контактторы серии КПВ600 выполняют на номинальные токи 100, 160, 250 и 630 А, КПВ620 — на токи 160 и 250 А, КТПВ — на токи 63, 100, 160 и 250 А.

Контакторы серий КТ6000, КТ7000, КТП600, КТ64, КТП64, КТ65, КТП65 предназначены для коммутации силовых цепей пе-

ременного тока напряжением до 660 В, частотой 50 и 60 Гц. В зависимости от номинального тока выпускаются контакторы семи модификаций на токи от 63 до 1000 А. В контакторах указанных серий осуществляется бездуговая коммутация шунтированием главных контактов тиристорами на период коммутации, благодаря чему электрическая дуга не возникает. Отсутствие дуги при отключении контактором силовых цепей значительно повышает надежность работы контакторов, электрическую износостойкость, взрывобезопасность, резко уменьшает потери энергии в контакторе. Электрическая износостойкость контакторов с бездуговой коммутацией при категории основного применения АС-3, АС-4 до 5 млн циклов, а обычных — 0,1...0,5 млн циклов, причем номинальный рабочий ток контакторов с бездуговой коммутацией составляет 60 % номинального тока контактора, а не 40 %, как у обычных контакторов.

**Электромагнитные пускатели.** Эти аппараты предназначены для дистанционного пуска непосредственным подключением к сети и остановки трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором. При наличии тепловых реле пускатели осуществляют также защиту электродвигателей от перегрузок.

Пускатели различаются между собой по назначению (неревверсивные, реверсивные), степени защиты (IP00, IP30 и IP54), наличию тепловых реле (без тепловых реле, с тепловыми реле), виду блокировки в реверсивных пускателях (с электрической блокировкой, электрической и механической блокировками), наличию встроенных в оболочку пускателя кнопок управления (без кнопок управления, с кнопками управления), размеру пускателя, напряжению главной цепи (380 и 660 В; пускатели на напряжение 380 В, кроме пускателей нулевого типоразмера, должны допускать работу в установках с номинальным напряжением 500 В).

В промышленности используют отечественные пускатели, например, серий ПМЛ, ПАЕ, ПА, ПМЕ, ПМС и др. [18, 48].

Магнитные пускатели можно включать вручную с помощью кнопочного поста и автоматически с помощью датчиков автоматики непосредственно или через промежуточные реле, с помощью блок-контактов других пускателей. Отключают пускатели вручную либо при аварийных режимах с помощью реле тепловых или реле максимального тока, при отключении сблокированных с ними других пускателей, действия устройств автоматики.

Пускатели типа ПМЕ и ПА могут быть реверсивными и неревверсивными. Реверсивные пускатели имеют такие же данные, как реверсивные, но состоят из двух пускателей, сблокированных механически и электрически против одновременного включения, а в обозначении типа реверсивных пускателей последняя цифра больше на два, например ПМЕ-111 — неревверсивный, ПМЕ-113 — реверсивный.

Пускатели ПМЕ и ПА заменяют пускателями ПМЛ и ПАЕ, которые имеют исполнения по степени защиты IP00 и IP54. При степени защиты IP54 пускатели могут иметь кнопки управления и сигнальную лампу. Частота включений в 1 ч для механической износостойкости при номинальном токе для пускателей модификаций 1...5 — 3600, а для пускателей модификаций 6 и 7 — 2400.

Пускатели серии ПМС предназначены для дистанционного пуска, остановки реверсирования, а также для защиты от перегрузок недопустимой продолжительности и от токов, возникающих при обрыве одной из фаз, трехфазных электродвигателей серии 4 А с короткозамкнутым ротором. Пускатели ПМС имеют шесть модификаций: 10 А, 25 А, 40 А, 63 А, 100 А и 160 А. Пускатели имеют исполнения по степени защиты IP00 и IP54. При степени защиты IP54 пускатели могут иметь встроенные элементы — разделительный трансформатор, кнопки управления, амперметр, сигнальную лампу.

**Реле управления.** Реле используются в схемах управления электроприводами для выполнения функций управления и защиты и различаются между собой:

по роду входного воздействия — измерительные (реле тока, реле напряжения, тепловые), логические (реле времени и др.);

роду тока включающей катушки или другого воспринимающего органа (постоянного тока, переменного тока);

номинальному току цепи управления — 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 63; 100; 160; 250; 320; 400; 630; 1250 А;

напряжению цепи управления — постоянного напряжения 12; 24; 48; 60; 110; 220 В, переменного напряжения 12; 24; 36; 110; 220; 380; 660 В;

виду возврата — одностабильные, двустабильные;

коэффициенту возврата реле тока и напряжения — с нормированным коэффициентом возврата, с ненормируемым коэффициентом возврата;

числу контактов — реле с 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 12 контактами;

роду контактов — с замыкающими, размыкающими, переключающими контактами;

категории применения.

Промежуточные реле предназначены для передачи команд из одной электрической цепи в другую и используются для размножения сигналов и увеличения их мощности.

Реле времени предназначены для передачи команд из одной электрической цепи в другую с определенными предварительно установленными выдержками времени.

Электротепловые реле предназначены для защиты электродвигателей от перегрузок недопустимой продолжительности и токов, возникающих при обрыве одной из фаз. Тепловые реле могут по-

ставляться в блоке с пускателями или отдельно. Поскольку реле не защищают от коротких замыканий и сами нуждаются в такой защите, то на ответвлении к электродвигателю перед пускателем ставят автоматический выключатель с электромагнитным расцепителем. Чувствительным элементом у реле служит термобиметалл, по которому проходит ток. У реле на большие токи имеется нихромовый нагреватель для дополнительного нагревания биметалла. Чувствительные элементы реле включаются в две фазы электродвигателя, контакты реле включаются в цепь катушки пускателя.

Реле тока подразделяются на реле контроля и защиты (реле максимального тока). Реле контроля тока в схемах управления электроприводами выполняют функции определения наличия тока в цепи или нахождения тока в заданных пределах. Реле максимального тока предназначены для защиты электродвигателей от перегрузок. В качестве реле максимального тока применяют электромагнитные реле с последовательным включением обмоток в цепь двигателя.

Реле напряжения в основном используются в цепях защиты и выполняют функции защиты от прекращения питания, недопустимого снижения или повышения напряжения.

В промышленности используются отечественные реле, например, серий РПУ-0, РПУ-2, РПУ-3, РПУ-4, РВП72, ВЛ, ТРН, ТРТП, РТЛ, РЭВ800, РЭВ310 и др. [18, 48].

Реле времени пневматическое серии РВП72 состоит из пневматической приставки, имеющей контакты с временной задержкой, и электромагнитного привода. Номинальное переменное напряжение питания 36, 110, 127, 220, 380 и 440 В. Диапазон выдержки времени 0,4... 180 с.

Электронные реле времени серии ВЛ могут использоваться как реле времени и программные устройства. Диапазон выдержки времени реле от 0,1 с до 10 мин.

Реле постоянного тока серии РЭВ800 применяют в схемах автоматического управления в качестве электромагнитных реле времени, тока, напряжения и промежуточных. Электромагнитные реле постоянного тока серии РЭВ310 применяют в качестве реле напряжения и тока с высоким коэффициентом возврата.

Герконовые реле серии РПГ на герметизированных магнитоуправляемых контактах предназначены, в основном, для связи между полупроводниковыми приборами и сильноточными аппаратами управления (реле, пускатели, контакторы), а также для коммутации цепей управления с малыми токами и напряжениями.

При выборе реле управления должны быть заданы:

для коммутируемых цепей — количество и вид контактов, род тока, напряжение и ток, параметры нагрузки (сопротивление, индуктивность, емкость и т. д.), характер работы (включе-

ние нагрузки, отключение нагрузки, включение и отключение нагрузки);

для цепей управления реле — род тока, напряжение или ток, диапазон их возможных значений при включении и отключении, количество обмоток управления.

Для реле в целом задаются: срок службы, режим работы (кратковременный, повторно-кратковременный, продолжительный, прерывисто-продолжительный), диапазон изменения температуры окружающей среды, диапазон изменения влажности, степень наличия в окружающей среде пыли, взрывоопасных и агрессивных примесей, положение реле в пространстве.

Для реле, предназначенных к установке в нестационарных условиях, задают ускорение и частоту вибраций, время срабатывания реле, массу и размеры.

**Автоматические выключатели.** Эти аппараты предназначены для защиты от токов короткого замыкания и перегрузки электрических линий и приемников энергии, снижения напряжения в сети, включений и отключений линий и приемников энергии. Автоматические выключатели могут также использоваться для редких коммутаций нагрузки с током, например редкого включения и отключения асинхронных двигателей. Основными параметрами автоматических выключателей являются номинальное напряжение, номинальный ток, отключающая способность, время отключения.

Отключение автоматических выключателей происходит под действием расцепителей. Различают максимальные, минимальные и независимые расцепители. Для защиты электрооборудования от перегрузок используют максимальные расцепители. В качестве максимальных наибольшее распространение получили электромагнитные и тепловые расцепители. Времятоковая характеристика расцепителя должна выбираться возможно ближе к характеристике защищаемого объекта. Минимальные расцепители выполняются электромагнитного типа, для большинства выключателей напряжение отключения расцепителя регулируется в пределах 30 ... 70 % номинального. Независимые расцепители служат для дистанционного отключения автоматических выключателей.

В промышленности используются отечественные автоматические выключатели серий АП50, АК50, АК63, АЕ2000, АЗ700, АЗ100, АЕ1000 и др. [18, 48].

Например, выключатель АК63 разработан для замены выключателя АП50, имеющего малую коммутационную способность. Выключатель имеет расцепители максимального тока на 0,63...63 А, переменного 500 В и постоянного 220 В напряжения; его коммутационная способность в 2,5 раза больше, чем у выключателя АП50. В отличие от выключателей АП50 выключатели АК63 имеют от-



крытые выводы, для закрывания которых могут поставляться крышки. Открытые выводы, не соприкасающиеся с корпусом выключателя, имеют лучший теплоотвод, а при нагревании выводов не выгорает корпус выключателя.

Автоматические выключатели АЕ2000 разрабатывались для замены всех других выключателей на ток до 100 А. Они рассчитаны на токи 25, 63 и 100 А при работе с расцепителями максимального тока на 0,6 А и выше, а также с тепловыми и комбинированными расцепителями.

Расцепитель любого автоматического выключателя представляет собой блок, встроенный в корпус выключателя и предназначенный для отключения выключателя под действием тока, превышающего ток его настройки.

Действие теплового расцепителя основано на изменении формы биметаллической пластинки при протекании по ней тока нагрузки выключателя, превышающего номинальный ток этого выключателя. Пластинка действует на механизм отключения выключателя.

Электромагнитный расцепитель состоит из электромагнитов, по катушкам которых проходит ток выключателя. Электромагниты приводятся в действие только при токе аварийной перегрузки, например при заклинивании механизма, или токе короткого замыкания и воздействуют на механизм отключения выключателя.

Комбинированный расцепитель содержит расцепители обоих видов.

Для выключателя может быть несколько расцепителей, имеющих разные номинальные токи, которые могут регулироваться. Уставка на ток мгновенного срабатывания, или ток отсечки, означает, что при данном токе срабатывает электромагнитный расцепитель данного выключателя.

Предельная коммутационная способность означает предельный ток, который может отключить выключатель.

**Выключатели (рубильники) и переключатели.** Пакетные выключатели и переключатели серий ПВМ и ППМ применяют в качестве коммутационных аппаратов с ручным приводом для цепей постоянного и переменного тока напряжением 220 В на токи до 400 А и цепей переменного тока напряжением 380 В на токи до 250 А. Они устанавливаются на панелях распределительных устройств, в шкафах и ящиках.

Пакетно-кулачковые переключатели ПКП и выключатели ПКВ на номинальные токи 10, 25, 40, 63, 100 и 160 А предназначены для коммутации электрических цепей с переменным напряжением 380 В.

Первая цифра в обозначении аппарата соответствует числу полюсов, вторая соответствует току: 1 — 100 А, 2 — 250 А, 4 — 400 А, 6 — 600 А.

Рубильники типа Р и переключатели типа П изготавливаются без дугогасительных камер и могут работать только в качестве разъединителей, т. е. размыкать обесточенные электрические цепи. Рубильники и переключатели прочих типов изготавливаются с дугогасительными камерами и могут коммутировать электрические цепи под нагрузкой.

**Кнопки и переключатели управления.** Кнопки управления серии КЕ и переключатели управления серии ПЕ предназначены для коммутации цепей управления переменного напряжения до 500 В, частотой 50 Гц и постоянного напряжения до 220 В, а также могут использоваться в цепях переменного напряжения 24 В, 50 и 60 Гц и постоянного напряжения 24 В при токе не менее 0,05 А.

Кнопки и переключатели классифицируют по типам, исполнению, виду управляющего элемента, степени защиты, количеству контактов, климатическому исполнению, наличию специальных устройств и цвету толкателя. Кнопки имеют электрически не связанные между собой замыкающие и размыкающие контакты с двойным размыканием цепи. Номинальный ток продолжительного режима работы 6 А.

**Предохранители.** Предназначены для защиты цепей от токов коротких замыканий и недопустимых перегрузок. Основными элементами предохранителя является плавкая вставка и дугогасительное устройство.

Наибольшее распространение получили следующие предохранители: НПН, имеющие стеклянный корпус круглого сечения с наполнителем из кварцевого песка; ПН2, имеющие фарфоровый корпус прямоугольного сечения с наполнителем из кварцевого песка; ПР2 — разборные трубчатые без наполнителя; ПРС — резьбовые; ПНБ5 быстродействующие — для защиты от токов короткого замыкания агрегатов с полупроводниковыми приборами; ППЗ1 — с высокой разрывной способностью [18, 48].

Основным условием при выборе предохранителя является расположение времятоковой характеристики предохранителя ниже характеристики защищаемого объекта.

## 1.3. Энергетические сети

### 1.3.1. Источники и сети электроснабжения систем электроприводов

К энергетическим сетям относятся в общем случае сети электро-, тепло- и газоснабжения, обеспечивающие энергией технологическое оборудование. Примером тепловой сети является сеть пароконденсатной системы сушильных агрегатов бумагоделательной машины. Примером сети газоснабжения является сеть системы на-

гревательных печей, используемых в прокатных комплексах металлургических производств. По мощности и разветвленности сети электроснабжения намного превосходят иные сети. Имеется тенденция к переводу технологического оборудования нагрева на электронагревание, а следовательно, к еще большему расширению сетей электроснабжения. Основными потребителями электроэнергии в технологических комплексах являются электроприводы, далее следует электронагревательное оборудование. Электроэнергия расходуется также на освещение и электропитание различного рода контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации.

Источниками электроснабжения технологических комплексов и агрегатов являются, как правило, цеховые и комплектные трансформаторные подстанции (КТП), комплектные распределительные устройства (КРУ). Стандартными на этом уровне распределения электроэнергии являются напряжения 10 000, 6000, 3000, 660, 380, 220, 127 В переменного тока и 440, 220 и 110 В постоянного тока. Наиболее распространены потребители электроэнергии напряжением 660 В и ниже, относящиеся к категории потребителей низкого напряжения. Высокие напряжения 10; 6 и 3 кВ могут применяться для специальных электроприводов большой мощности

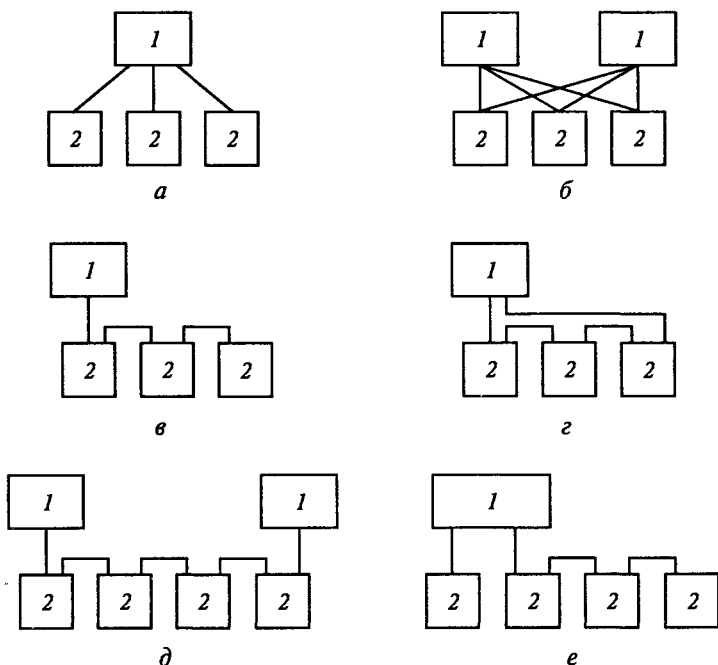


Рис. 1.10

(несколько мегаватт). Для питания электроприводов в основном используется напряжение 380 и 660 В.

Сеть электроснабжения состоит, как правило, из питающей и распределительной сетей. Питающая сеть связывает источник питания со щитами и сборками питания. Распределительная сеть связывает щиты и сборки питания с отдельными электроприемниками (управляемыми преобразователями, электродвигателями, контрольно-измерительными приборами и др.).

Питающая и распределительная сети могут быть выполнены трехфазными четырехпроводными, трехфазными трехпроводными, двухпроводными с двумя фазными проводами, двухпроводными с одним фазным и одним нулевым проводами.

В зависимости от взаимного расположения источников питания, щитов питания, а также требований резервирования схемы питающие сети могут иметь разную конфигурацию, отдельные варианты которой показаны на рис. 1.10 [25, 50].

Применяются следующие сети: радиальные с односторонним (см. рис. 1.10, *а*) или двусторонним (см. рис. 1.10, *б*) питанием; магистральные с односторонним (см. рис. 1.10, *в*) или двусторонним питанием от одного (см. рис. 1.10, *г*) или двух (см. рис. 1.10, *д*) независимых источников; радиально-магистральные (см. рис. 1.10, *е*). Цифрой 1 обозначены источники питания, 2 — щиты питания. Питание от одного источника могут иметь только щиты, допускающие перерыв в питании.

**Трансформаторные подстанции.** Для наибольшего приближения к потребителям рекомендуется применять внутренние, встроенные в здание или пристроенные к нему трансформаторные подстанции. Такие подстанции имеют выход из камер с масляными трансформаторами и высоковольтными аппаратами непосредственно наружу. Внутрицеховые подстанции можно размещать на первом и втором этажах производственных помещений. Внутрицеховые подстанции размещают открыто и в отдельных помещениях.

Размещение внутрицеховых подстанций в помещениях пыльных и с химически активной средой допускается при условии принятия мер, обеспечивающих надежную работу электрооборудования.

В производственных помещениях трансформаторы и КРУ можно устанавливать открыто или в камерах и отдельных помещениях. На каждой открыто установленной цеховой подстанции и КТП могут быть применены масляные трансформаторы мощностью до 1600 кВ · А. Расстояние между масляными трансформаторами должно быть не менее 10 м. Для внутрицеховых подстанций и КТП с сухими трансформаторами или с негорючим диэлектриком их мощность и расстояние между ними не ограничиваются.

Как правило, КРУ и КТП размещают в пределах «мертвой зоны» подъемно-транспортных механизмов. В цехах с интенсивным движением внутризаводского транспорта КРУ и КТП ограждают.

Ввод от трансформатора на щит может быть выполнен двумя способами: кабелями снизу на вводных панелях, предназначенных для кабельных вводов; шинами сверху с помощью вводных панелей или же непосредственно к сборным шинам через разъединитель, установленный на стене.

Обычно КТП состоит из одного или двух силовых трансформаторов, шкафа ввода высокого напряжения, шкафа ввода низкого напряжения, отсека контрольно-измерительной аппаратуры, шкафа отходящих линий низкого напряжения, шинного короба. В качестве защитно-коммутационной аппаратуры применяются разъединители, автоматические выключатели, предохранители.

**Комплектные распределительные устройства.** КРУ напряжением до 1 кВ состоят из полностью или частично закрытых шкафов или блоков со встроенными в них аппаратами, устройствами защиты и автоматики, измерительными приборами и вспомогательными устройствами.

Применение комплектных электротехнических устройств с выдвижными блоками улучшает эксплуатацию электрооборудования. Вместо ревизии и ремонта электрического аппарата на месте установки в стесненных и неудобных условиях можно быстро отсоединить аппарат от схемы и отремонтировать его в условиях мастерских. Создание комплектных устройств с выдвижными блоками повысило эксплуатационную надежность: благодаря замене ремонтируемого блока запасным появилась возможность не прекращать работу во время ремонта блока. При наличии штепсельных разъемов такая замена производится в течение короткого времени без снятия напряжения с данного узла при полной безопасности обслуживающего персонала.

К комплектным распределительным устройствам напряжением до 1 кВ относятся распределительные щиты, силовые пункты и шкафы, щиты станций управления.

*Распределительные щиты* предназначены для приема и распределения электроэнергии переменного и постоянного тока напряжением до 1 кВ. Их устанавливают на трансформаторных и преобразовательных подстанциях и в машинных залах. Щиты изготавливают в открытом и закрытом (шкафном) исполнениях.

Щиты открытого исполнения состоят из панелей, устанавливаемых в специальных электротехнических помещениях. Щиты закрытого исполнения устанавливают в шкафах в цехах промышленных предприятий.

По условиям обслуживания щиты бывают с одно- и двусторонним обслуживанием. Щиты с двусторонним обслуживанием часто называют свободно стоящими, поскольку для обслуживания устройства требуются проходы с двух сторон — лицевой и задней; таким образом, щиты устанавливают в отдалении от стен. Щиты с односторонним обслуживанием принято называть при-

слонными, так как обычно их устанавливают непосредственно у стен помещения и обслуживают с лицевой стороны. Каркасы панелей в современных конструкциях щитов выполняют с применением различных профилей из листовой стали.

В качестве коммутационных и защитных аппаратов на щитах устанавливают рубильники, предохранители, блоки «выключатель — предохранитель», выключатели. Для обеспечения автоматической работы по схеме автоматического включения резерва (АВР) на щитах устанавливают релейную аппаратуру. Для смены предохранителей, осмотра и ремонта аппаратуры на фасадной стороне каждой панели, кроме секционных, предусмотрена одностворчатая дверь, на которой установлены приводы рубильников или кнопки управления выключателей. Для присоединения кабелей к аппаратам в панелях предусмотрены шинные сборки.

*Силовые распределительные пункты* предназначены для распределения электрической энергии и защиты электрических установок постоянного тока напряжением до 220 В или переменного тока напряжением до 660 В при перегрузках и коротких замыканиях. Пункты изготовляют в виде шкафов или устройств, собираемых из отдельных стандартных элементов: ящиков с соединительными шинами и ящиков с разными аппаратами. Преимущество этих устройств заключается в возможности получения разных схем из небольшого набора стандартных ящиков.

*Силовые распределительные шкафы* применяют для приема и распределения электроэнергии в промышленных установках на номинальный ток до 400 А. В зависимости от типа шкафа на вводе устанавливают рубильник, два рубильника при питании шкафа от двух источников или рубильник с предохранителями. Шкафы имеют несколько отходящих групп, укомплектованных предохранителями и автоматическими выключателями.

*Щиты станций управления.* Современные электроприводы производственных машин и механизмов имеют сложные системы управления с большим числом контакторных аппаратов и регулирующих элементов. Требования режимов пуска, разгона, регулирования частоты вращения, торможения и установки электропривода, многообразие форм защиты и контроля за работой двигателя и установок определили широкую номенклатуру станций управления электроприводами. Щиты станций управления устанавливают на крупных трансформаторных подстанциях, в машинных залах промышленных предприятий. Щиты выполняют одно- и двухрядными, комплектуют из блоков и панелей управления.

*Схемы электропитания.* *Магистральные* схемы питания находят широкое применение для питания многих электроприемников одного технологического комплекса, а также для большого числа сравнительно мелких приемников, не связанных единым технологическим процессом, к которым относятся металлорежущие станки в

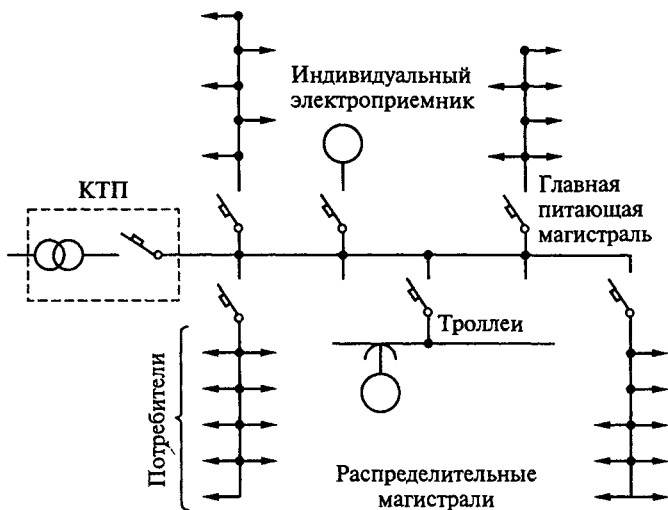


Рис. 1.11

цехах механической обработки металлов и другие потребители, распределенные относительно равномерно по площади цеха.

Магистральные схемы позволяют отказаться от применения громоздкого и дорогого распределительного устройства или щита. В этом случае возможно использование схемы блока «трансформатор — магистраль», где в качестве питающей линии применяется токопровод (шинопровод), изготовляемый промышленностью. Магистральные схемы, выполненные шинопроводами, обеспечивают высокую надежность, гибкость и универсальность цеховых сетей, что позволяет технологам перемещать оборудование внутри цеха без существенных переделок электрических сетей.

Для питания большого числа электроприемников сравнительно небольшой мощности, относительно равномерно распределенных по площади цеха, применяются схемы с двумя видами магистральных линий: питающими и распределительными (рис. 1.11). Питающие, или главные, магистрали подключаются к шинам шкафов трансформаторной подстанции, специально сконструированным для магистральных схем. Распределительные магистрали, к которым непосредственно подключаются электроприемники, получают питание от главных питающих магистралей или непосредственно от шин КТП, если главные магистрали не применяются (рис. 1.12).

К главным питающим магистралям подсоединяется возможно меньшее число индивидуальных электроприемников. Это повышает надежность всей системы питания.

Следует учитывать недостаток магистральных схем, заключающийся в том, что при повреждении магистрали одновременно от-

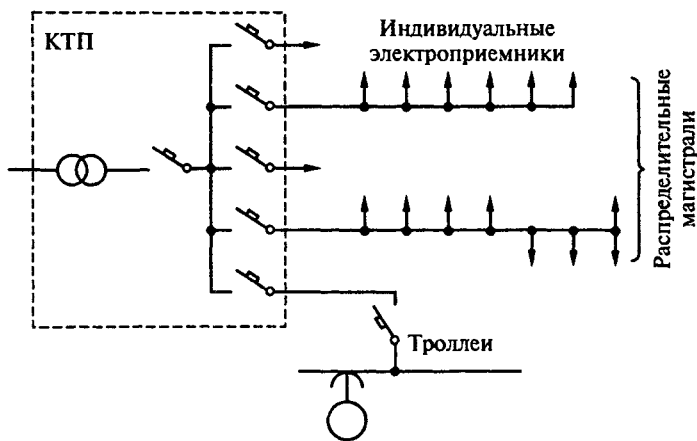


Рис. 1.12

ключаются все питающиеся от нее электроприемники. Этот недостаток ощутим при наличии в цехе отдельных крупных потребителей, не связанных единым непрерывным технологическим процессом.

*Радиальные* схемы питания характеризуются тем, что от источника питания, например КТП, отходят линии, питающие непосредственно мощные электроприемники или отдельные распределительные пункты, от которых по самостоятельным линиям питаются более мелкие электроприемники.

Радиальные схемы обеспечивают высокую надежность питания отдельных потребителей, так как аварии локализуются отключением автоматического выключателя поврежденной линии и не влияют на другие линии.

Все потребители могут отключиться от питания только при повреждении на сборных шинах КТП, что мало вероятно вследствие достаточно надежной конструкции шкафов этих КТП.

Сосредоточение на КТП аппаратов управления и защиты отдельных присоединений позволяет легче решать задачи автоматизации в системе распределения электроэнергии напряжением до 1 кВ, чем при рассредоточенном расположении аппаратов, что имеет место при магистральной схеме.

Радиальные схемы питающих сетей с распределительными устройствами или щитами применяют при наличии в цехе нескольких достаточно мощных потребителей, не связанных единым технологическим процессом или друг с другом настолько, чтобы для них было целесообразно магистральное питание.

Радиальные и магистральные схемы применяются редко. Наибольшее распространение получили *смешанные* схемы, сочетающие в себе элементы радиальных и магистральных схем. В крупных цехах



металлургических заводов, литейных, кузнечных и механосборочных цехах машиностроительных заводов, на заводах искусственного волокна и других предприятиях всегда имеются радиальные и магистральные схемы питания различных групп потребителей.

Питание сетей электрического освещения, как правило, не связывается с силовыми сетями, а выполняется отдельно от шин главных распределительных щитов подстанций. Такое разделение сетей вызвано сравнительно малой потерей напряжения, допустимой в осветительных сетях, а также возможностью отключения силовой сети с одновременным сохранением питания осветительной сети.

### **1.3.2. Резервирование электропитания**

На выбор схемы существенно влияет и необходимость резервирования питания электроприемников I и II категорий.

К электроприемникам I категории относятся такие, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, значительный экономический ущерб, повреждение дорогостоящего основного оборудования, массовый брак продукции, нарушение сложного технологического процесса. Из состава электроприемников I категории выделяется особая группа электроприемников, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов, пожаров и повреждения дорогостоящего основного оборудования.

К электроприемникам II категории относятся электроприемники, перерыв электроснабжения которых приводит к массовой задержке отпуска продукции и массовым простоям рабочих машин.

Остальные электроприемники относятся к III категории.

Для электроприемников I категории обязательно питание от двух независимых источников, к числу которых могут быть отнесены и силовые трансформаторы, если они подключены к различным, не связанным между собой секциям распределительного устройства высшего напряжения. При этом резервное питание электроприемников должно иметь автоматическое включение (АВР). Обычно у наиболее ответственных установок имеются резервные агрегаты на случай выхода установки из строя или профилактического ремонта рабочих агрегатов. Включение резервных агрегатов также может быть автоматическим, если это необходимо по условиям технологического процесса.

Для электроприемников II категории резервное питание включается дежурным персоналом или автоматически, но принципы построения схем остаются такими же, как и для электроприемников I категории, с той лишь разницей, что второй источник питания может и не быть независимым.

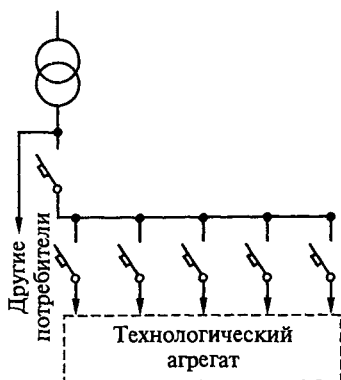


Рис. 1.13

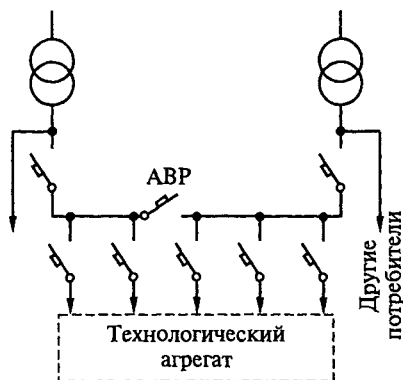


Рис. 1.14

Основным условием рационального проектирования сети электроснабжения является принцип одинаковой надежности питающей линии (со всеми аппаратами) и одного электроприемника технологического комплекса, получающего питание от этой линии. Поэтому нет смысла, например, питать один электропривод технологического комплекса по двум взаиморезервируемым линиям. Если технологический комплекс имеет много электроприемников, осуществляющих единый, связанный группой машин, технологический процесс, и прекращение питания любого из этих электроприемников вызывает необходимость прекращения работы всего комплекса, то надежность электроснабжения обеспечивается при магистральном питании (рис. 1.13). Когда требуется высокая степень надежности питания электроприемников в непрерывном технологическом процессе, применяется двустороннее питание магистральной линии (рис. 1.14).

В цехах машиностроительных и металлургических заводов применяют схемы магистрального питания с взаимным резервированием питания отдельных магистралей. Схема на рис. 1.15 позволя-

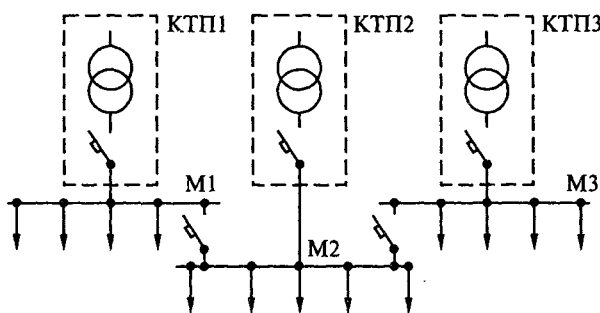


Рис. 1.15

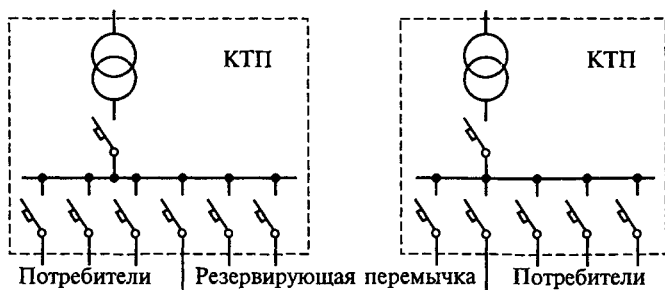


Рис. 1.16

ет отправить на ремонт или ревизию один из трансформаторов и, используя перегрузочную способность, обеспечить питание нескольких магистралей от одного работающего трансформатора. Такая схема питания позволяет отправлять на ремонт или ревизию один из трансформаторов во время ремонта технологического оборудования.

При неравномерной загрузке технологического оборудования в течение суток (например, пониженная нагрузка в ночные или ремонтные смены) схемы с взаимным резервированием питания магистралей обеспечивают возможность отключения незагруженных трансформаторов.

Большое значение для повышения надежности питания имеют переключатели между отдельными магистралями или соседними КТП при радиальном питании (рис. 1.16). Такие переключатели, обеспечивая частичное или полное взаимное резервирование, создают удобства для эксплуатации, особенно при проведении ремонтных работ.

### 1.3.3. Показатели качества электроэнергии

Государственный стандарт (ГОСТ 13109—99) устанавливает показатели и нормы качества электрической энергии (КЭ) в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц в точках, к которым присоединяются электрические сети, находящиеся в собственности различных потребителей, или приемники электрической энергии (точки общего присоединения — ТОП).

Устанавливаются 11 основных показателей качества электроэнергии (ПКЭ): отклонение частоты  $\delta f$ , установившееся отклонение напряжения  $\delta U_y$ , размах изменения напряжения  $\delta U_n$ , доза фликера (мерцания или колебания)  $P$ , коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$ , коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$ , коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$ , коэф-

фициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{0U}$ , глубина и длительность провала напряжения соответственно  $\delta U_n$ ,  $\Delta t_n$ , импульсное напряжение  $U_{имп}$ , коэффициент временного перенапряжения  $K_{перU}$ .

При определении значений некоторых показателей КЭ используют следующие вспомогательные параметры электрической энергии: частоту повторения изменений напряжения  $F_{\delta U_i}$ , интервал между изменениями напряжения  $\Delta t_{i,i+1}$ , частоту появления провалов напряжения  $F_n$ , длительность импульса по уровню 0,5 его амплитуды  $\Delta t_{имп0,5}$ , длительность временного перенапряжения  $\Delta t_{перU}$ .

Установлены нормально допустимые (норм.) и предельно допустимые (пред.) нормы ПКЭ.

### 1.3.4. Энергосбережение средствами электропривода

Электроприводами потребляется более 60 % производимой в мире электроэнергии, поэтому вопросы энергосбережения имеют чрезвычайно важное значение. Для России это тем более важно, поскольку стоимость электроэнергии возрастает и при неэкономичных системах электроприводов производственные расходы возрастают, соответственно возрастает стоимость вырабатываемой технологическими комплексами продукции.

Установленные стандартами показатели качества электроэнергии делают необходимым при выборе систем электроприводов, особенно при большой их установленной мощности, рассмотрение всей электротехнической цепи от КТП, где осуществляется контроль потребляемой активной и реактивной мощности и качества электроэнергии, до исполнительных органов рабочих и транспортных машин. Следует оптимально осуществлять набор силовых модулей (трансформаторов, реакторов, фильтров, полупроводниковых преобразователей, тормозных средств), при которых обеспечиваются минимальные потери электроэнергии, не нарушаются показатели качества электроэнергии у источника питания и решаются все задачи технологии.

К основным методам сбережения электроэнергии в автоматизированных электроприводах технологических агрегатов и комплексов относятся следующие.

1. Применение вместо нерегулируемых электроприводов регулируемых, с помощью которых возможно при изменении режимов работы технологического оборудования и физико-механических свойств обрабатываемого вещества устанавливать оптимальные по энергетическим затратам условия обработки вещества, например, устанавливать оптимальные скорости насосов при изменении расхода и свойств жидкости, шпинделей металлообрабатывающих станков при изменении размеров и материала обра-

батываемых деталей, роторов дробилок при изменении размеров и свойств дробимых веществ и др.

Переход на регулирование давления и расхода воды насосных агрегатов с помощью регулируемых электроприводов взамен дроссельного регулирования (см. п. 4.3.1) приводит к исключению потерь напора и экономии электроэнергии примерно на 30 %. Насос как устройство преобразования энергии имеет свой коэффициент полезного действия  $\eta_n$  — отношение механической энергии, приложенной к валу, к гидравлической энергии, получаемой в напорном трубопроводе насосного агрегата. Характер изменения  $\eta_n$  в зависимости от расхода жидкости  $Q$  при различных частотах вращения показан на рис. 1.17 [23]. Максимум коэффициента полезного действия с уменьшением частоты вращения снижается и смещается влево. Анализ требуемого изменения частоты насосного агрегата при изменении расхода в сети показывает, что с уменьшением расхода требуется снижение частоты вращения. Если рассмотреть работу агрегата для расхода меньше номинального (вертикальные линии *A* и *B*), то для этих режимов рационально работать с пониженной частотой вращения. В этом случае КПД насоса выше, чем при работе с номинальной частотой вращения. Таким образом, снижение частоты вращения в соответствии с технологической нагрузкой позволяет не только экономить потребляемую энергию благодаря исключению гидравлических потерь, но и получить экономический эффект из-за повышения коэффициента полезного действия самого насоса — преобразователя механической энергии в гидравлическую.

Аналогичная ситуация имеет место и в других агрегатах.

2. Применение силовых модулей регулируемых электроприводов, имеющих максимальные коэффициенты полезного действия и мощности (главными среди них являются электродвигатели, управляемые полупроводниковые преобразователи — выпрямители

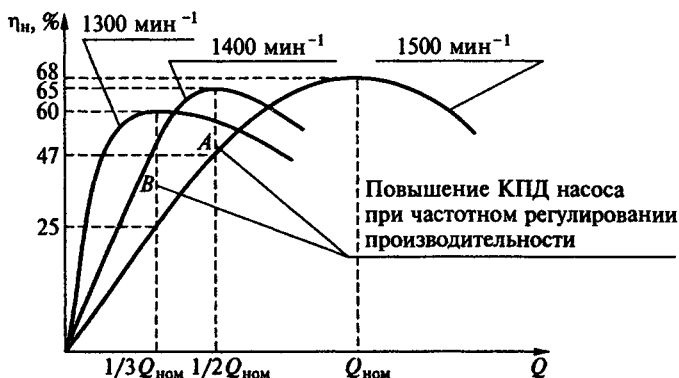


Рис. 1.17

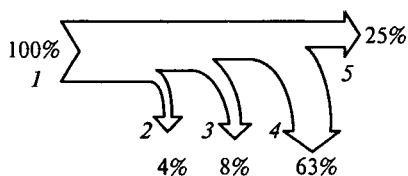


Рис. 1.18

и инверторы, тормозные модули, обеспечивающие рекуперацию электроэнергии от двигателя в сеть переменного или постоянного напряжения); максимально возможное исключение потерь электроэнергии при использовании тормозных резисторов.

Рассмотрим тяговые электроприводы маршрутного электротранспорта, в частности трамвая. В широко распространенных тяговых электроприводах трамваев с пускотормозными реостатами потери в реостатах достигают 63 % энергии, потребляемой трамваем из контактной линии [26]. На рис. 1.18 представлена схема энергетического баланса трамвая КТ49, на котором установлены четыре электродвигателя по 40 кВт каждый. На рис. 1.18 обозначено: 1 — энергия, потребляемая из контактной сети; 2 — потери в обмотках возбуждения; 3 — потери в якорных обмотках; 4 — потери в пуско-тормозных реостатах; 5 — энергия, расходуемая на движение трамвая.

Непосредственно на движение задействуется 25 % энергии сети, а 63 % энергии превращаются в тепло в реостатах в процессах разгона и торможения трамвая.

Замена реостатного регулирования электроприводов на регулирование с использованием транзисторных широтно-импульсных преобразователей (см. п. 4.10.3) дает возможность снизить потери в пусковых режимах и возратить энергию, вырабатываемую при торможении, в контактную сеть. В результате расход энергии, потребляемой трамваем, уменьшается почти в 2 раза.

3. Исключение режимов пуска и торможения технологических агрегатов и комплексов в результате применения дополнительных механизмов с регулируемыми электроприводами, обеспечивающих совмещение движений основных механизмов в технологическом процессе для перевода их в непрерывные режимы работы. Рассмотрим этот метод на примерах роторно-конвейерной линии и непрерывного стана холодной прокатки [32].

Роторно-конвейерная линия (рис. 1.19), предназначена для сборки и контроля герметичности клапанов аэрозольных упаковок. Линия состоит из загрузочных (P1, P6... P9), технологических (P3... P5) и контрольных (P2, P3) роторов, связанных между собой транспортно-технологическими конвейерами I... III. Каждый ротор имеет ряд позиций, оснащенных однотипными устройствами для выполнения определенных операций, присущих ротору. В верхней части каждого загрузочного ротора расположен бункер для деталей одного наименования. Механизмы блокировки загрузочных и технологических устройств исключают возможность сборки клапана при отсутствии хотя бы одной комплектующей детали.

В бункер каждого загрузочного ротора засыпают детали. Из бункеров детали поступают в ориентирующие устройства, где получают необходимую ориентацию и выдаются в гнезда конвейера, который в течение короткого времени движется совместно с ротором. Последовательно огибая загрузочные роторы P1, P8, P9, конвейер I получает в каждое гнездо карман К, в карман — пружину П, на пружину — шток Ш и перемещает их к ротору P2 контроля (Ko) комплектности «карман — пружина — шток» (К — П — Ш).

В ротор P3 конвейер I подает этот комплект. Одновременно конвейер II, огибая последовательно роторы P6, P7, подает в ротор P3 комплект «ниппель — корпус» (Н — Кр). В роторе P3 производится технологическое совмещение в результате обжатия (O) двух комплектов в один комплект. Собранный клапан транспортируется конвейером I к ротору вакуумирования (B) P4, который переносит каждый клапан из гнезда конвейера I в гнездо конвейера III и осуществляет контроль герметичности клапана. Далее клапаны поступают в ротор P5 выдачи клапанов.

Автоматизированные электроприводы 1... 12 обеспечивают синхронизированные движения всех роторов и конвейеров, заданную точность поддержания скорости и заданные соотношения скоростей и мгновенных положений гнезд конвейера с устройствами выдачи роторов. Работа роторно-конвейерной линии происходит

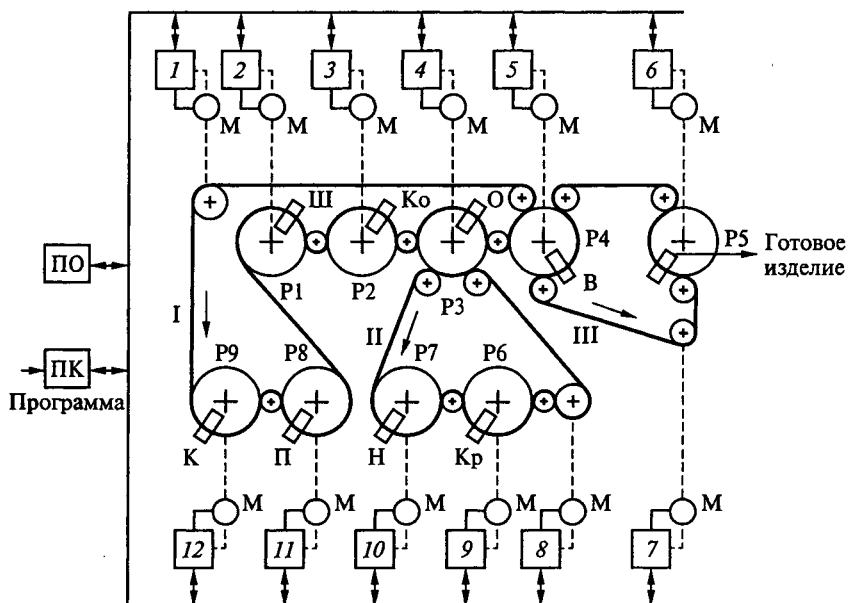


Рис. 1.19

в соответствии с заданной программой, включающей в себя режимы автоматического управления скоростями и мгновенными положениями механизмов, выбора оптимальных условий работы линии.

Такие линии используются в крупносерийных производствах. Они обеспечивают высокую производительность и низкое электропотребление благодаря применению непрерывной конвейерной системы, при которой транспортные и технологические операции совмещены во времени и исключены прерывистые режимы для последовательного выполнения технологических операций.

В п. 5.5.5 рассматривается стан холодной прокатки металлической полосы, в котором имеются режимы: пуска агрегатов до заправочной скорости, заправки полосы, пуска до номинальной скорости, рабочей прокатки, остановки агрегатов, смены рулона на размотке. Далее цикл повторяется. Перевод стана в непрерывный режим осуществляется введением в технологическую схему дополнительных агрегатов (рис. 1.20).

Основное механическое оборудование непрерывного стана холодной прокатки состоит из разматывателей Р1...Р3, сварочной машины СМ, натяжных устройств НУ1...НУ4, петлевого накопительного устройства ПНУ, петлевой ямы ПЯ, гильотинных ножниц НГ, барабанных ножниц НБ, моталок М1, М2, клетей К1...К6 и весов В для взвешивания прокатанных рулонов. Стан оснащен датчиками, электроприводами и исполнительными механизмами. Основными из них являются: электроприводы разматывателей Р1 и Р2, исполнительные механизмы сварочной машины, исполнительные механизмы головной части, электропривод разматывателя Р3, главные электроприводы, обеспечивающие получение заданной частоты вращения рабочих валков клетей, датчики и измерительные устройства стана, электроприводы нажимных устройств, обеспечивающие получение заданного раствора валков клетей, исполнительные механизмы выходной части, электроприводы моталок.

В отличие от схемы прокатного стана, показанной на рис. 5.29 (см. п. 5.5.5), в данной имеется ряд дополнительных механизмов, обеспечивающих непрерывную («бесконечную») прокатку путем сваривания выходного конца предыдущего рулона с входным кон-

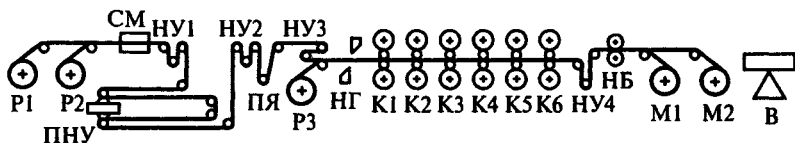


Рис. 1.20



цом следующего рулона. На период задержки движения полосы в зоне сварки непрерывность работы клетей стана обеспечивается подачей полосы из петлевого накопительного устройства.

4. Использование адаптивных методов управления режимами электроприводов исполнительных органов технологических и транспортных машин для минимизации электропотребления при соблюдении заданных требований к производительности машин и качеству обработки вещества.

### **1.3.5. Применение правил устройства электроустановок к электроприводам**

Правила устройства электроустановок (ПУЭ) [37] распространяются на вновь создаваемые и реконструируемые электроприводы и предназначены для обеспечения безопасной и безаварийной работы с ними.

В этой связи в ПУЭ сформулированы основные требования, предъявляемые к персоналу, эксплуатирующему электрооборудование, помещениям и самому электрооборудованию.

Правила устройства электроустановок разработаны с учетом обязательности проведения в условиях эксплуатации планово-предупредительных и профилактических испытаний, ремонтов электроустановок и электрооборудования, а также систематического обучения и проверки обслуживающего персонала в объеме требований действующих правил технической эксплуатации и правил техники безопасности.

Электроустановки по условиям электробезопасности разделяются ПУЭ на электроустановки напряжением до 1 кВ и электроустановки напряжением выше 1 кВ.

Обслуживать электрооборудование должен квалифицированный персонал, прошедший проверку знаний в объеме, обязательном для данной работы (должности), и имеющий квалификационную группу по технике безопасности, предусмотренную Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок.

По степени опасности поражения людей электрическим током различаются:

помещения без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность;

помещения с повышенной опасностью, характеризующиеся наличием в них одного или нескольких следующих условий, создающих повышенную опасность: сырость или токопроводящая пыль; токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п.); высокая температура; возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппара-

там, механизмам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования, — с другой.

Применяемые в электроприводах электрооборудование и материалы должны соответствовать требованиям государственных стандартов или технических условий, утвержденных в установленном порядке.

Конструкция, исполнение, способ установки и класс изоляции применяемых машин, аппаратов, приборов и прочего электрооборудования, а также кабелей и проводов должны соответствовать параметрам сети или электроустановки, условиям окружающей среды и требованиям ПУЭ.

Электроприводы и связанные с ними конструкции должны быть стойкими к воздействию окружающей среды или защищены от этого воздействия, должны удовлетворять требованиям действующих директивных документов о запрещении загрязнения окружающей среды, вредного или мешающего влияния шума, вибрации и электрических полей.

В электроприводах должна быть обеспечена возможность легкого распознавания частей, относящихся к отдельным их элементам.

Буквенно-цифровое и цветовое обозначения одноименных шин в каждой электроустановке должны быть одинаковыми. Шины должны быть обозначены:

при переменном трехфазном токе шины фазы *A* — желтым цветом, фазы *B* — зеленым, фазы *C* — красным, нулевая рабочая шина *N* — голубым, эта же шина, используемая в качестве нулевой защитной, — продольными полосами желтого и зеленого цветов;

при переменном однофазном токе шина *A*, присоединенная к началу обмотки источника питания, — желтым цветом, шина *B*, присоединенная к концу обмотки, — красным. Шины однофазного тока, если они являются ответвлением от шин трехфазной системы, обозначаются как соответствующие шины трехфазного тока;

при постоянном токе положительная шина (+) — красным цветом, отрицательная (–) — синим;

резервная шина — как резервируемая основная шина; если же резервная шина может заменять любую из основных шин, то она обозначается поперечными полосами цвета основных шин.

При расположении шин в распределительных устройствах необходимо соблюдать ряд условий.

Безопасность обслуживающего персонала и посторонних лиц должна обеспечиваться следующими способами:

применение надлежащей изоляции, а в отдельных случаях — повышенной;

применение двойной изоляции;

соблюдение соответствующих расстояний до токоведущих частей или закрытие, ограждение токоведущих частей;

применение блокировки аппаратов и ограждающих устройств для предотвращения ошибочных операций и доступа к токоведущим частям;

надежное и быстродействующее автоматическое отключение частей электрооборудования, случайно оказавшихся под напряжением, и поврежденных участков сети, в том числе защитного отключения;

заземление или зануление корпусов электрооборудования и элементов электроустановок, которые могут оказаться под напряжением вследствие повреждения изоляции;

выравнивание потенциалов;

применение разделительных трансформаторов;

применение напряжений 42 В и ниже переменного тока частотой 50 Гц и 110 В и ниже постоянного тока;

применение предупреждающей сигнализации, надписей и плакатов;

применение устройств, снижающих напряженность электрических полей;

использование средств защиты и приспособлений, в том числе для защиты от воздействия электрического поля в электроустановках, в которых его напряженность превышает допустимые нормы.

Пожаро- и взрывобезопасность электроустановок, содержащих маслонаполненные аппараты и кабели, а также электрооборудования, покрытого и пропитанного маслами, лаками, битумами и т.п., обеспечивается выполнением требований, приведенных в ПУЭ.

Присоединение электроустановки к энергосистеме производится в соответствии с Правилами пользования электрической энергией.

Вновь созданные и реконструированные электроустановки и установленное в них электрооборудование должны быть подвергнуты приемосдаточным испытаниям и только после этого введены в промышленную эксплуатацию.

**Электродвигатели и их коммутационные аппараты.** Меры по обеспечению надежности питания должны выбираться в зависимости от категории ответственности электроприемников. Эти меры могут применяться не к отдельным электродвигателям, а к питающим их трансформаторам и преобразовательным подстанциям, распределительным устройствам и пунктам.

Если необходимо обеспечить непрерывность технологического процесса при выходе из строя электродвигателя, его коммутационной аппаратуры или линии, непосредственно питающей электродвигатель, резервирование следует осуществлять установкой резервного технологического агрегата или другими способами.

Электродвигатели и их коммутационные аппараты должны быть выбраны и установлены таким образом и в необходимых случаях

обеспечены такой системой охлаждения, чтобы их температура при работе не превышала допустимую.

Вращающиеся части электродвигателей и части, соединяющие электродвигатели с механизмами (муфты, шкивы), должны иметь ограждения от случайных прикосновений.

Электродвигатели и их коммутационные аппараты должны быть заземлены или занулены в соответствии с требованиями ПУЭ.

Исполнение электродвигателей должно соответствовать условиям окружающей среды.

*Выбор электродвигателей.* Электрические и механические параметры электродвигателей (номинальные мощность, напряжение, частота вращения, относительная продолжительность рабочего периода, пусковой, минимальный, максимальный моменты, пределы регулирования частоты вращения и т.п.) должны соответствовать параметрам приводимых ими механизмов во всех режимах их работы в данной установке.

Для механизмов, поддержание работы которых после кратковременных перерывов подачи питания или понижения напряжения, обусловленных отключением в результате КЗ, действием АПВ или АВР, необходимо по технологическим условиям и допустимо по условиям техники безопасности, должен быть обеспечен самозапуск их электродвигателей.

Для приводов механизмов, не требующих регулирования частоты вращения, независимо от их мощности рекомендуется применять синхронные электродвигатели или асинхронные с короткозамкнутым ротором.

Для приводов механизмов, имеющих тяжелые условия пуска или работы либо требующих изменения частоты вращения, следует применять электродвигатели с наиболее простыми и экономичными методами пуска или регулирования частоты вращения, возможными в данной установке.

Синхронные электродвигатели, как правило, должны иметь устройства форсирования возбуждения или компаундирования.

Электродвигатели постоянного тока допускается применять только в тех случаях, когда электродвигатели переменного тока не обеспечивают требуемых характеристик механизма или неэкономичны.

Электрические машины выпускаются в защитных оболочках, обеспечивающих защиту обслуживающего персонала, а также самой машины от попадания в нее посторонних предметов. Для обозначения степени защиты применяются латинские буквы IP и следующие за ними две цифры. Первая цифра обозначает степень защиты персонала от соприкосновения с находящимися под напряжением частями или приближения к ним и от соприкосновения с движущимися частями, расположенными внутри оболочки, а также степень защиты машины от попадания внутрь нее

твердых посторонних тел. Расшифровка первых цифр приведена в табл. 1.1. Вторая цифра обозначает степень защиты от попадания воды (табл. 1.2). Исполнения электрических машин по степеням защиты приведены в табл. 1.3.

Электродвигатели, устанавливаемые в помещениях с нормальной средой, как правило, должны иметь исполнение IP00 или IP20. Электродвигатели, устанавливаемые на открытом воздухе, должны иметь исполнение не менее IP44 или специальное, соответствующее условиям их работы. Электродвигатели, устанавливаемые в помещениях, где возможно оседание на их обмотках пыли и других веществ, нарушающих естественное охлаждение, должны иметь исполнение не менее IP44 или продуваемое с подводом чистого воздуха. Корпус продуваемого электродвигателя, воздухопроводы и все сопряжения и стыки должны быть тщательно уплотнены для предотвращения притока воздуха в систему вентиляции.

Электродвигатели, устанавливаемые в сырых или особо сырых местах, должны иметь исполнение не менее IP43 и изоляцию,

Таблица 1.1

Первая цифра	Расшифровка	
	Краткое описание	Определение
0	Защита отсутствует	Специальная защита отсутствует
1	Защита от твердых тел размером более 50 мм	Защита от проникновения внутрь оболочки большого участка поверхности человеческого тела, например руки, и проникновения твердых тел размером свыше 50 мм
2	То же, размером более 12 мм	Защита от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной не более 80 мм и от проникновения твердых тел размером свыше 12 мм
3	То же, размером более 2,5 мм	Защита от проникновения внутрь оболочки инструментов, проволоки и т.п. толщиной более 2,5 мм и твердых тел размером свыше 2,5 мм
4	То же, размером более 1,0 мм	Защита от проникновения внутрь оболочки проволоки и твердых тел размером свыше 1 мм
5	Защита от пыли	Проникновение внутрь оболочки пыли не предотвращено полностью, однако пыль не может проникать в количестве, достаточном для нарушения работы изделия
6	Пыленепроницаемость	Проникновение пыли предотвращено полностью

Вторая цифра	Расшифровка	
	Краткое описание	Определение
0	Защита отсутствует	Специальная защита отсутствует
1	Защита от капель воды	Капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать вредного воздействия на изделие
2	То же, при наклоне до 15°	То же, но при наклоне изделия на любой угол до 15° относительно нормального положения
3	Защита от дождя	Дождь, падающий на оболочку под углом 60° от вертикали, не должен оказывать вредного воздействия на изделие
4	Защита от брызг	Вода, разбрызгиваемая на оболочку в любом направлении, не должна оказывать вредного воздействия на изделие
5	Защита от водяных струй	Струя воды, выбрасываемая в любом направлении на оболочку, не должна оказывать вредного воздействия на изделие
6	Защита от волн воды	Вода при наличии волн не должна попасть внутрь оболочки в количестве, достаточном для повреждения изделия
7	Защита при погружении в воду	Вода не должна проникать в оболочку, погруженную в воду, при определенных условиях давления и времени в количестве, достаточном для повреждения изделия
8	Защита при длительном погружении в воду	Изделия пригодны для длительного погружения в воду при условиях, установленных изготовителем

рассчитанную на действие влаги и пыли (со специальной обмазкой, влагостойкую и т. п.).

Электродвигатели, устанавливаемые в местах с химически активными парами или газами, должны иметь исполнение не менее IP44 или продуваемое с подводом чистого воздуха при соблюдении требований, приведенных в ПУЭ. Допускается также применение электродвигателей исполнения не менее IP33, но с химически стойкой изоляцией и с закрытием открытых неизолированных токоведущих частей колпаками или другим способом.

Для электродвигателей, устанавливаемых в помещениях с температурой воздуха более плюс 40 °С, должны выполняться ме-

Степень защиты персонала от соприкосновения и попадания посторонних тел	Исполнение электрических машин по степени защиты от проникновения воды								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	IP00	IP01	—	—	—	—	—	—	—
1	IP10	IP11	IP12	IP13	—	—	—	—	—
2	IP20	IP21	IP22	IP23	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	IP43	IP44	—	—	—	—
5	—	—	—	—	IP54	IP55	IP56	IP57	IP58

роприятия, исключаяющие возможность их недопустимого нагревания. При замкнутой принудительной системе вентиляции электродвигателей следует предусматривать приборы контроля температуры воздуха и охлаждающей воды.

*Установка электродвигателей.* Электродвигатели должны быть выбраны и установлены так, чтобы исключалась возможность попадания на их обмотки и токосъемные устройства воды, масла, эмульсии и т. п., а вибрация оборудования, фундаментов и частей здания не превышала допустимых значений.

Шум, создаваемый электродвигателем совместно с приводимым им механизмом, не должен превышать уровня, допускаемого санитарными нормами.

Проходы между фундаментами или корпусами электродвигателей, электродвигателями и частями здания или оборудования должны быть не менее указанных в ПУЭ.

Электродвигатели напряжением выше 1 кВ разрешается устанавливать непосредственно в производственных помещениях, соблюдая определенные условия [37].

Кабели и провода, присоединяемые к электродвигателям, установленным на виброизолирующих основаниях, на участке между подвижной и неподвижной частями основания должны иметь гибкие медные жилы.

*Коммутационные аппараты.* Для группы электродвигателей, служащих для привода одной машины или ряда машин, осуществляющих единый технологический процесс, следует, как правило, применять общий аппарат или комплект коммутационных аппаратов, если это оправдывается требованиями удобства или безопасности эксплуатации. В остальных случаях каждый электродвигатель должен иметь отдельные коммутационные аппараты.

Коммутационные аппараты в цепях электродвигателей должны отключать от сети одновременно все проводники, находящиеся под напряжением. В цепи отдельных электродвигателей допускается иметь аппарат, отключающий не все проводники, если в общей цепи группы таких электродвигателей установлен аппарат, отключающий все проводники.

При наличии дистанционного или автоматического управления электродвигателем какого-либо механизма вблизи последнего должен быть установлен аппарат аварийного отключения, исключающий возможность дистанционного или автоматического пуска электродвигателя до принудительного возврата этого аппарата в исходное положение.

Не требуется устанавливать аппараты аварийного отключения у следующих механизмов:

- расположенных в пределах видимости с места управления;
- доступных только квалифицированному обслуживающему персоналу (например, вентиляторы, устанавливаемые на крышах, вентиляторы и насосы, устанавливаемые в отдельных помещениях);
- конструктивное исполнение которых исключает возможность случайного прикосновения к движущимся и вращающимся частям;
- имеющих аппарат местного управления с фиксацией команды на отключение.

Цепи управления электродвигателями допускается питать от главных цепей и других источников электроэнергии, если это вызывается технической необходимостью.

Во избежание внезапных пусков электродвигателя при восстановлении напряжения в главных цепях должна быть предусмотрена блокировочная связь, обеспечивающая автоматическое отключение главной цепи во всех случаях исчезновения напряжения в ней, если не предусматривается самозапуск.

Коммутационные аппараты должны коммутировать наибольшие токи нормальных режимов работы управляемого ими электродвигателя (пусковой, тормозной, реверса, рабочий). Коммутационные аппараты должны быть стойкими к расчетным токам КЗ.

Включение обмоток магнитных пускателей, контакторов и автоматических выключателей в сети напряжением до 1 кВ с заземленной нейтралью может производиться на междуфазное или фазное напряжение. При включении обмоток указанных выше аппаратов на фазное напряжение должно быть предусмотрено одновременное отключение всех трех фаз ответвления к электродвигателю автоматическим выключателем, а при защите предохранителями — специальными устройствами, действующими на отключение пускателя или контактора при сгорании предохранителей в одной или любых двух фазах.

Коммутационные аппараты электродвигателей, питаемых по схеме блока «трансформатор — электродвигатель», следует, как



правило, устанавливаются на вводе от сети, питающей блок, без установки их на вводе к электродвигателю.

Пуск асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором и синхронных электродвигателей должен производиться, как правило, непосредственным включением в сеть (прямой пуск). При невозможности прямого пуска следует применять пуск через реактор, трансформатор или автотрансформатор. В особых случаях допускается применение пуска с подъемом частоты сети от нуля.

**Защита электродвигателей напряжением до 1 кВ (асинхронных, синхронных и постоянного тока).** Для электродвигателей переменного тока должна предусматриваться защита от многофазных замыканий, в сетях с глухозаземленной нейтралью — и от однофазных замыканий, а также защита от токов перегрузки и от снижения напряжения. На синхронных электродвигателях (при невозможности вхождения в режим синхронизма с полной нагрузкой) дополнительно должна предусматриваться защита от асинхронного режима.

Для электродвигателей постоянного тока должна предусматриваться защита от КЗ. При необходимости дополнительно можно устанавливать защиту от перегрузки и чрезмерного повышения частоты вращения.

Для защиты электродвигателей от КЗ должны применяться предохранители или автоматические выключатели, которые выбирают так, чтобы обеспечивалось надежное отключение при КЗ на зажимах электродвигателя и чтобы электродвигатели при нормальных для данной электроустановки пульсациях тока (пиках технологических нагрузок, пусковых токах, токах самозапуска и т. п.) не отключались этой защитой. С этой целью для электродвигателей механизмов с легкими условиями пуска отношение пускового тока электродвигателя к номинальному току плавкой вставки должно быть не более 2,5, а для электродвигателей механизмов с тяжелыми условиями пуска (большая длительность разгона, частые пуски и т. п.) это отношение должно быть равным 2,0...1,6.

Допускается осуществление защиты от КЗ одним общим аппаратом для группы электродвигателей при условии, что эта защита обеспечивает термическую стойкость пусковых аппаратов и аппаратов защиты от перегрузок в цепи каждого электродвигателя данной группы.

Защита электродвигателей от перегрузки должна устанавливаться в случаях, когда возможна перегрузка механизма по технологическим причинам, а также когда при особо тяжелых условиях пуска или самозапуска необходимо ограничить длительность пуска при пониженном напряжении. Защита должна выполняться с выдержкой времени и может быть осуществлена тепловым реле или другими устройствами.

Применение защиты от перегрузки не требуется для электродвигателей с повторно-кратковременным режимом работы.

Защита от снижения напряжения должна устанавливаться в следующих случаях: для электродвигателей постоянного тока, которые не допускают непосредственного включения в сеть; для электродвигателей механизмов, самозапуск которых после останова недопустим по условиям технологического процесса или безопасности; для части прочих электродвигателей в соответствии с условиями, приведенными в ПУЭ.

Для ответственных электродвигателей, в которых необходим самозапуск, если они включаются при помощи контакторов и пускателей с удерживающей обмоткой, в цепи управления должны применяться механические или электрические устройства выдержки времени, обеспечивающие включение электродвигателя при восстановлении напряжения в течение заданного времени.

Для синхронных электродвигателей защита от асинхронного режима должна, как правило, осуществляться с помощью защиты от перегрузки по току статора.

Защита от КЗ в электродвигателях переменного и постоянного тока должна предусматриваться:

в электроустановках с заземленной нейтралью — во всех фазах или полюсах;

в электроустановках с изолированной нейтралью: при защите предохранителями — во всех фазах или полюсах; при защите автоматическими выключателями — не менее чем в двух фазах или одном полюсе, при этом в пределах одной и той же электроустановки защиту следует осуществлять в одних и тех же фазах или полюсах.

Защита электродвигателей переменного тока от перегрузок должна выполняться: в двух фазах при защите электродвигателей от КЗ предохранителями; в одной фазе при защите электродвигателей от КЗ автоматическими выключателями.

Защита электродвигателей постоянного тока от перегрузок должна выполняться в одном полюсе.

Аппараты защиты электродвигателей должны удовлетворять требованиям, изложенным в ПУЭ.

## **1.4. Информационные сети**

### **1.4.1. Структура сетей**

Средства коммуникаций обеспечивают создание сетей для обмена данными между различными микропроцессорными средствами автоматизации. К ним относятся модули коммуникационных процессоров для соединения контроллеров «точка — точка» и адап-

теров магистральных интерфейсов связи, коаксиальные и оптоволоконные кабели, повторители, интерфейсные мультиплексоры и др. Структура информационных сетей может быть магистральной (линейной), радиальной (типа «звезда»), кольцевой и древовидной. При создании систем отдают предпочтение магистральным структурам, которые по сравнению с другими структурами требуют меньших материальных затрат при прокладке кабелей, легко расширяются и позволяют осуществлять непосредственную коммуникационную связь от абонента к абоненту через единственную линию передачи данных. Как правило, сети делают открытыми для интегрирования компьютерных средств автоматизации различных производителей. С этой целью выпускаются мосты и межсетевые преобразователи для связи различных локальных сетей и интерфейсов.

Из разнообразных типов средств коммуникации можно создавать сети, оптимально приспособленные к топологии технологического комплекса и обеспечивающие требуемые объемы и скорости передачи информации.

Для связи агрегатов в технологическом комплексе, а также для единого управления комплексами на производстве, применяют локальные промышленные сети. В промышленности применяется большое количество сетей. Обобщенные данные некоторых из них представлены в табл. 1.4. Наиболее известными и часто используемыми являются сети: Industrial Ethernet, Ethway, Mapway, Profibus, Modbus, Modbus plus, Fipio, Unitelwey, Fipway, Masterbus.

Промышленные сети, как правило, имеют трехуровневую структуру построения.

На нижнем уровне обеспечивается взаимодействие между агрегатами (их подключение и обмен информацией между ними), что дает возможность: экономии модулей входов/выходов; простого и быстрого монтажа; электропитания датчиков и исполнительных механизмов через коммуникационные линии; осуществления функций самотестирования и параметрирования; достижения высокой помехозащищенности и др. На этом уровне соединяются датчики и исполнительные механизмы с системой автоматизированного управления. Максимальная длина соединительной линии примерно 100 м без повторителей и примерно 300 м с повторителями.

Средний уровень предназначен для координации работы всех агрегатов, входящих в технологический комплекс, для получения информации от каждого из них, визуализации режимов работы комплекса. Протяженность сети может быть от 1200 м до 100 км в зависимости от физической среды передачи данных и применения повторителей.

Верхний уровень (административный) предназначен для связи с системой управления производством.

Таблица 1.4

Протокол	Среда передачи	Число узлов	Скорость передачи данных, кбод	Длина линий, м	Топология сети	Принцип доступа к сети
Bitbus	Витая пара, радиоканал, оптопара	До 250	До 1400	30 ... 1200	Шина	Master/Slave
ASI	Витая пара, ASI-кабель	До 32	До 167	До 1000	Линия, звезда, дерево, кольцо	То же
Hart	Витая пара, выделенный телефонный канал	До 15	1200	До 3000	Звезда	»
LonWorks	Витая пара, коаксиальный кабель, волоконно-оптический кабель, радиоканал	До 127	4,88... 1250	До 2000	Произвольная	Произвольный доступ (CSMA/CD)
Canbus	Витая пара	До 30	50 ... 1000	До 1000 — 20 кбод; до 40 м — 1 Мбод	Шина	Произвольный доступ по приоритету (CSMA/CM)
WorldFIP	Витая пара, волоконно-оптический кабель	До 256	31,25; 1000; 2500; 5000	До 2000	»	Master/Slave/Token
Modbus	Не специфицированная	1 master до 247 slaves	0,6 ... 19,2	15 — RS232C; 1200 — RS422; 1000 — токовая петля	Звезда, шина	То же
Profibus	Витая пара, волоконно-оптический кабель	До 126	500 ... 1500 (FMS); 1500 ... 12 000 (DP); 31 (PA)	1200; 4800 с повторителем; до 23000 оптокабель	То же	»

К промышленным сетям предъявляют следующие требования: выполнение разнообразных функций по передаче данных, включая пересылку файлов, поддержку терминалов, обмен с внешними запоминающими устройствами, обработку сообщений, доступ к файлам и базам данных, передачу речевых сообщений;

подключение большого набора стандартных и специальных устройств, в том числе оборудования контроля и управления и др.;

подключение современных и перспективных, а также ранее разработанных устройств с различными программными средствами, архитектурой, принципами работы;

доставка с высокой достоверностью информации адресату;

обеспечение непосредственной взаимосвязи между подключенными устройствами без промежуточного накопления и хранения информации;

простота монтажа, модификации и расширения сети; подключение новых устройств и отключение прежних без нарушения работы сети длительностью более 1 с.

Взаимодействие устройств в сети должно отвечать следующим требованиям:

возможность для каждого устройства связываться и взаимодействовать с любым другим устройством;

обеспечение равноправного доступа к физической среде для всех пользователей;

возможность адресации пакетов информации одному устройству, группе устройств, всем подключенным устройствам.

Информационные требования заключаются в следующем:

должны быть обеспечены «прозрачный» режим обслуживания, а также возможность приема, передачи и обработки любых сочетаний битов, слов и символов;

пропускная способность сети не должна существенно снижаться при достижении полной загрузки.

Требования к надежности и достоверности заключаются в следующем:

отказ или отключение питания подключенного устройства должны вызывать только переходную ошибку;

средства обнаружения ошибок должны выявлять все пакеты, содержащие до четырех искаженных битов. Если же достоверность передачи достаточно высока, сеть не должна сама исправлять обнаруженные ошибки; функции анализа, принятия решения и исправления ошибки должны выполняться подключенными устройствами.

Перечисленные требования обуславливают основные особенности промышленных сетей: возможность размещения их на сравнительно небольшой территории; наличие высокоскоростного общего канала (физической среды); отсутствие применения средств и методов сетей общего пользования без накладывания ограниче-

ний на эти сети; соединение в сетях самых разнообразных и независимых устройств (термин «высокоскоростной канал» условен, поскольку скорость передачи оценивается только по отношению к подключенным устройствам).

### 1.4.2. Сетевые средства

Основным сетевым средством любой сети является интеллектуальный коммуникационный процессор, позволяющий подключать персональные компьютеры, программируемые контроллеры, программаторы и другие устройства и осуществлять их взаимодействие с системой управления. Основными характеристиками коммуникационного процессора являются: тип монтажной шины (слота), скорость передачи данных, количество соединений и потребляемый ток. Коммуникационные процессоры выпускаются с монтажными слотами следующих типов: ISA, PCMCIA, PCI. Скорость передачи данных у коммуникационных процессоров от 9,6 кбит/с до 12 Мбит/с для сетей среднего уровня и от 10 до 100 Мбит/с для сетей верхнего уровня.

Для подключения к сети активных и пассивных оконечных устройств применяются шинные терминалы RS485, шинные штекеры, трансиверы и другие специальные модули, например Optical Bus Terminal для подключения устройств к оптической сети.

Технологические комплексы могут использовать несколько децентрализованных систем управления, связанных друг с другом мощной информационной сетью. В этом случае для их совместной работы применяют коммутаторы или маршрутизаторы.

На нижнем уровне для подключения датчиков и исполнительных механизмов используют различные модули. Целый модуль состоит из верхней (пользовательский модуль) и нижней (монтажный модуль) частей. Эти части имеют различные исполнения. Для монтажных модулей возможна установка на профильную планку или крепеж с помощью винтового соединения. Пользовательские модули по своим функциям соответствуют обычным модулям входов/выходов.

Для передачи информации на большие расстояния применяют повторители, позволяющие конфигурировать сети, состоящие из нескольких сегментов.

Физическая среда сетей представляет собой физический материал, по которому передается информация. В качестве такого материала могут использоваться различные виды кабелей (витая пара, коаксиальные, многожильные, волоконно-оптические), а также эфир (радиоканалы, УКВ-каналы, инфракрасные каналы).

Кабель состоит из проводников, слоев экрана и изоляции. В некоторых случаях кабели оборудуются разъемами, с помощью которых присоединяются к оборудованию. Для обеспечения быстрой

перекоммутации кабелей и оборудования используются различные электромеханические устройства, называемые кроссовыми секциями, кроссовыми коробками или шкафами.

В сетях применяются кабели, удовлетворяющие определенным стандартам, что позволяет строить кабельную систему сети из кабелей и соединительных устройств разных производителей. Наиболее распространены в мировой практике следующие стандарты: американский EIA/TIA-568A; международный ISO/IEC 11801; европейский EN50173.

В кабеле на витой паре обычно используются несколько пар изолированных проводов, обвитых друг вокруг друга. Взаимная обвивка обеспечивает защиту от собственных и внешних наводок. Кабель на витой паре бывает неэкранированным и экранированным. Стандарт EIA/TIA 568A Commercial Building Wiring Standard определил семь категорий кабелей на неэкранированной витой паре (Unshielded Twisted Pair, UTP1... UTP7). Наиболее современным является кабель UTP5, способный работать со скоростью 100 Мбит/с; его волновое сопротивление 100 Ом в диапазоне частот от 1 МГц до предельной. Для кабеля UTP5 установлено минимальное число взаимных скручиваний на единицу длины (примерно 26 на 1 м). Его основными недостатками являются: взаимное наложение сигналов между смежными проводами, чувствительность к внешним электромагнитным полям, бóльшая степень затухания сигнала по пути, чем у кабелей других типов.

Кабели категорий 6 и 7 промышленность начала выпускать сравнительно недавно. Для кабеля категории 6 характеристики определяются до частоты 200 МГц, а для кабелей категории 7 — до 600 МГц.

Все кабели UTP выпускаются в четырехпарном исполнении. Каждая из четырех пар кабеля имеет определенный цвет и шаг скрутки. Для соединения кабелей с оборудованием используются вилки и розетки, представляющие восьмиконтактные разъемы.

Экранированная витая пара (Shielded Twisted Pair, STP) содержит электрически заземляемую медную оплетку или алюминиевую фольгу. Существуют кабели с общим экраном и экраном вокруг каждой пары. Экран обеспечивает защиту от всех внешних электромагнитных полей. Однако по скорости передачи данных и ограничениям, накладываемым на максимальное расстояние, такие кабели идентичны кабелям без экранирования.

Коаксиальные кабели (RG-8, RG-11, RG-58/U, RG-58 A/U, RG-58 C/U, RG-59) способны обеспечивать передачу данных со скоростью 10 Мбит/с на расстояние до 500 м. Минимальное расстояние между точками подключения должно быть не меньше 2,5 м. Кабели имеют волновое сопротивление 50 или 75 Ом.

Волоконно-оптический кабель состоит из свободно уложенных или определенным образом скрученных волоконных световодов и

защитного покрытия. Передача данных производится при помощи лазерного или светодиодного передатчика, который генерирует световые импульсы, проходящие через световоды. Перед попаданием в световод сигнал от передатчика (излучателя) проходит через оптическое согласующее устройство и оптический разъемный соединитель (коннектор). На принимающем конце сигнал воспринимается фотодиодом, который преобразует его в электрический ток. Волоконно-оптический кабель обладает рядом преимуществ: малым затуханием и независимостью затухания от частоты передаваемого сигнала; высокой степенью защиты от внешних электромагнитных полей; исключает несанкционированный доступ к данным.

В зависимости от условий распространения световой волны в центральном световоде волоконно-оптические кабели делятся на одномодовые (single mode — SM) и многомодовые (multi mode — MM). Максимальная длина кабеля (412 м) определяется временными параметрами. Полоса пропускания одномодового кабеля очень широкая — до сотен гигагерц на километр. Многомодовые кабели имеют более узкую полосу пропускания — от 500 до 800 МГц/км. Сужение полосы происходит из-за потерь световой энергии при отражениях, а также из-за интерференции лучей разных мод. Для передачи информации применяется свет с длиной волны 1550 нм (1,55 мкм), 1300 нм (1,3 мкм) и 850 нм (0,85 мкм). Светодиоды могут излучать свет с длиной волны 850 нм и 1300 нм.

Волоконно-оптические кабели присоединяют к оборудованию разъемами MIC, ST и SC.

Волоконно-оптические кабели обладают отличными параметрами всех типов: электромагнитными, механическими (хорошо гнутся, а в соответствующей изоляции обладают хорошей механической прочностью). Однако у них есть один серьезный недостаток — сложность соединения волокон с разъемами и между собой при необходимости наращивания длины кабеля.

Для работы промышленной сети используется программное обеспечение, позволяющее: реализовывать связь между активными аппаратными устройствами, входящими в сеть любого уровня; производить обмен данными в сети; реализовывать различные режимы передачи данных по сети; реализовывать функции удаленного программирования контроллеров по сети; реализовывать функции диагностирования и др.

## **1.5. Режимы работы технологического оборудования и электроприводов**

Любой технологический процесс, связанный с производством материалов и изделий, стремятся, руководствуясь экономической целесообразностью, сделать непрерывным. В соответствии с этим



технологические комплексы и агрегаты могут длительное время работать непрерывно. Примерами непрерывных технологических комплексов являются бумаго- и картоноделательные машины, непрерывные станы холодной прокатки, конвейерные линии многих производств и др. Соответственно агрегаты и механизмы этих комплексов работают в *непрерывном* режиме. Наряду с этим многие технологические агрегаты и их механизмы работают в циклическом режиме со сменой скоростей и нагрузок. В их работе могут быть перерывы. Такие агрегаты и механизмы называются агрегатами и механизмами *циклического* действия. К ним относятся разнообразные подъемно-транспортные машины (мостовые, козловые краны), экскаваторы, металлообрабатывающие станки, промышленные манипуляторы и др. Среди механизмов выделяются механизмы циклического и условно циклического режимов. Последние работают с изменяющимися параметрами цикла (ускорения, скорости, время от цикла к циклу). Имеются и механизмы кратковременного режима работы, выполняющие, как правило, вспомогательные функции.

Режимы работы комплексов, агрегатов и механизмов учитываются при выборе автоматизированных электроприводов и систем управления с точки зрения реализации заданных технологических функций и соответствия номинальным режимам работы электродвигателей.

Под *номинальным* режимом работы электродвигателя понимается режим, который был предусмотрен для электродвигателя предприятием-изготовителем. Для этого режима в каталогах и паспорте двигателя указываются: номинальная полезная механическая мощность на валу (Вт, кВт или МВт); номинальное напряжение (В, кВ, в том числе номинальное напряжение системы возбуждения, номинальное напряжение ротора АД с контактными кольцами); номинальный ток (А, кА, в том числе ток возбуждения, ток ротора); номинальная частота вращения ( $\text{мин}^{-1}$ ) или номинальная угловая скорость (рад/с); номинальный КПД (%); номинальный коэффициент мощности.

В соответствии со стандартом установлено восемь номинальных режимов работы электрических машин, которые имеют условные обозначения S1...S8; соответствующие этим режимам диаграммы изменения нагрузки  $M$  (полезного механического момента на валу двигателя), мощности тепловых потерь  $\Delta P_T$  и температуры  $\theta$  показаны на рис. 1.21. Режимы определяются следующим образом [48].

S1 — режим продолжительной нагрузки — работа при постоянной нагрузке, достаточно длительная для достижения теплового равновесия, т.е. температура всех частей электрической машины достигает установившегося значения  $\theta_{\text{max}}$ , показанного на рис. 1.21.

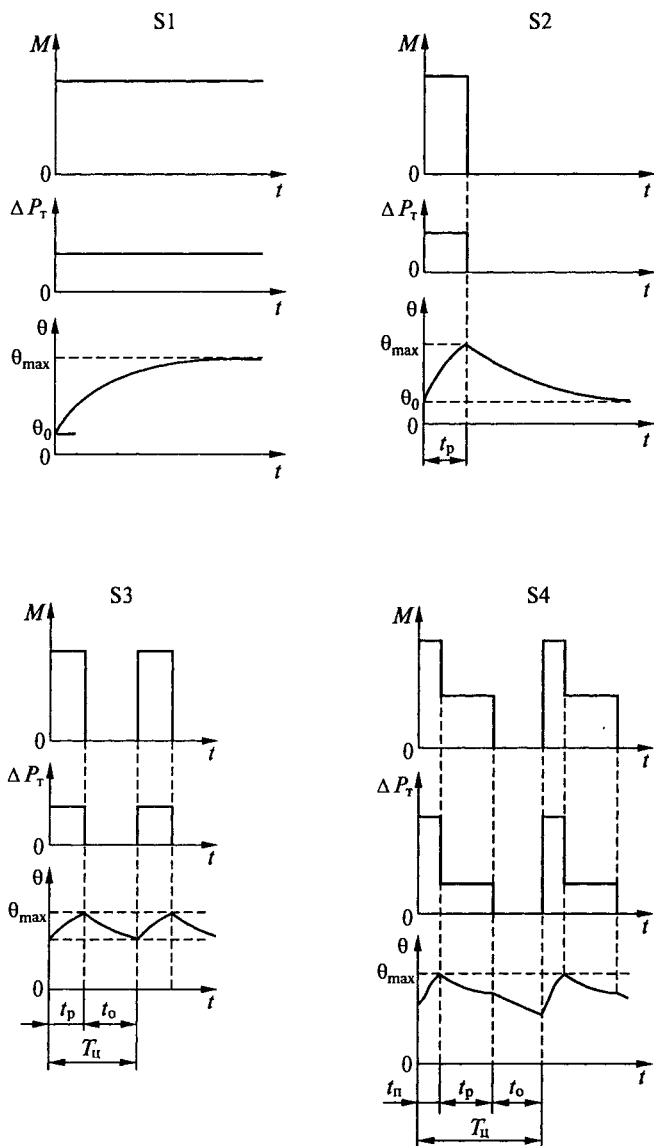
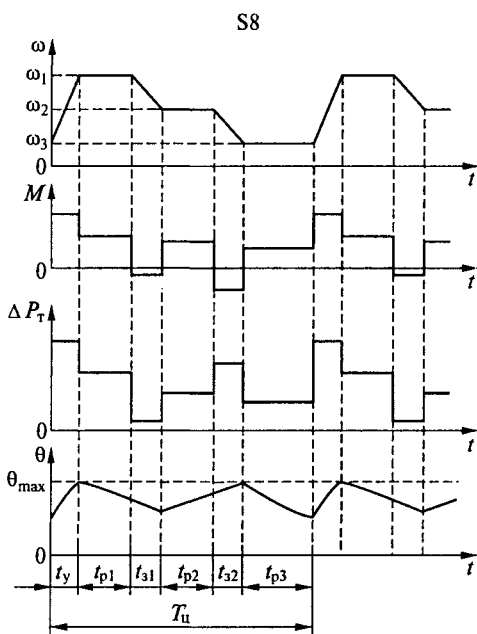
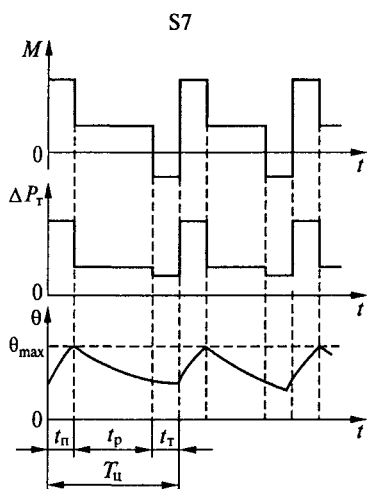
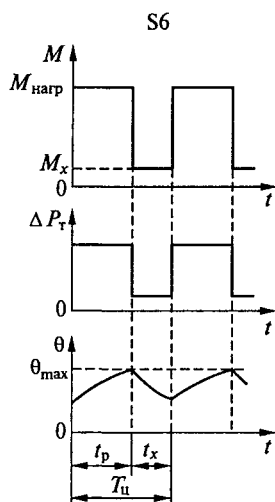
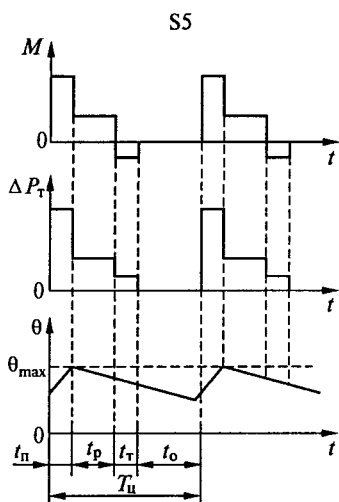


Рис. 1.21

S2 — режим кратковременной нагрузки — работа при постоянной нагрузке в течение заданного времени, меньшего, чем требуется для получения теплового равновесия, с последующим отключенным неподвижным состоянием, имеющим достаточную



продолжительность для достижения машиной температуры окружающей среды  $\theta_0$ . Характерным параметром является продолжительность кратковременной работы, предпочтительные значения которого 10; 30; 60 и 90 мин.

S3 — режим повторно-кратковременной нагрузки — последовательность идентичных рабочих циклов, каждый из которых состоит из периодов работы при постоянной нагрузке и отключенного неподвижного состояния; длительность этих периодов не достаточна для достижения теплового равновесия за время одного рабочего цикла, а наличие пускового тока существенно не влияет на нагревание.

Для режима S3 характерным параметром является относительная продолжительность работы  $PВ = (t_p/T_{ц})100\%$ , где  $T_{ц} = t_p + t_0$  — продолжительность цикла;  $t_p$  — период работы при номинальных условиях;  $t_0$  — период отключенного неподвижного состояния (паузы).

Предпочтительными являются следующие значения относительной продолжительности работы: 15; 25; 40 и 60 %. Продолжительность одного цикла (если нет других указаний) принимается равной 10 мин.

S4 — режим повторно-кратковременной нагрузки, включая пуск, — последовательность идентичных рабочих циклов, каждый из которых состоит из периодов пуска, работы при постоянной нагрузке и отключенного неподвижного состояния; длительность этих периодов недостаточна для достижения теплового равновесия за время рабочего цикла.

S5 — режим повторно-кратковременной нагрузки, включая электрическое торможение, — последовательность идентичных рабочих циклов, каждый из которых состоит из периодов пуска, работы при постоянной нагрузке, быстрого электрического торможения и отключенного неподвижного состояния; длительность этих периодов недостаточна для достижения теплового равновесия за время одного цикла.

Для режимов работы S4 и S5 характерными параметрами являются: относительная продолжительность включения, число включений в 1 ч, коэффициент инерции и постоянная кинетической энергии.

Под относительной продолжительностью включения понимается для режима S4  $PВ_{S4} = [(t_n + t_p)/T_{ц}]100\%$ , для режима S5  $PВ_{S5} = [(t_n + t_p + t_T)/T_{ц}]100\%$ , где  $t_n$  и  $t_T$  — периоды соответственно пуска и торможения.

Продолжительность цикла  $T_{ц} = 3600/z$ , где  $z$  — число включений (циклов) в 1 ч.

Под коэффициентом инерции понимается отношение суммы момента инерции двигателя и приведенного к валу двигателя момента инерции механизма к моменту инерции двигателя:  $k_j = (J_{дв} + J_{пр.мех})/J_{дв} = J_{\Sigma}/J_{дв}$ .

Постоянная кинетической энергии — отношение кинетической энергии, запасенной ротором при номинальной частоте вращения (угловой скорости), к номинальной полной мощности или

произведению номинальных напряжения и тока в машинах постоянного тока.

Для режимов работы S4 и S5 предпочтительными являются следующие значения: ПВ — 15; 25; 40 и 60 %;  $z$  — 30; 60; 90; 120; 180; 240 и 360 вкл./ч;  $k_j$  — 1,2; 1,6; 2; 2,5 и 4.

S6 — режим продолжительной работы при переменной нагрузке — последовательность идентичных рабочих циклов, каждый из которых состоит из периодов работы при постоянной нагрузке и на холостом ходу; длительность этих периодов недостаточна для достижения теплового равновесия за время одного рабочего цикла.

Характерным параметром является продолжительность работы  $ПР = (t_p/T_u)100\%$ .

Предпочтительными являются следующие значения ПР: 15; 25; 40 и 60 %. Продолжительность одного цикла (если нет других указаний) принимается равной 10 мин.

S7 — режим продолжительной нагрузки, включая электрическое торможение — последовательность идентичных рабочих циклов, каждый из которых состоит из периодов пуска, работы при постоянной нагрузке и электрического торможения; длительность рабочего периода недостаточна для достижения теплового равновесия за время одного цикла.

Для режима работы S7 характерными параметрами являются число включений в 1 ч, коэффициент инерции и постоянная кинетической энергии. Предпочтительными являются следующие значения:  $z$  — 30; 60; 90; 120; 180; 240 и 360 вкл./ч;  $k_j$  — 1,2; 1,6; 2; 2,5; 4.

S8 — режим работы при периодическом изменении частоты вращения и нагрузки — последовательность идентичных рабочих циклов, каждый из которых состоит из периодов ускорения, работы при постоянной нагрузке, соответствующей заданной частоте вращения, затем одного или нескольких периодов работы при других постоянных значениях нагрузки, соответствующих другим частотам вращения; длительность каждого рабочего периода недостаточна для достижения теплового равновесия за время одного рабочего цикла.

Для режима работы S8 характерными параметрами являются число включений в 1 ч, относительная продолжительность работы (ПР) при каждой внешней нагрузке и соответствующей ей частоте вращения, а также коэффициент инерции и постоянная кинетической энергии. Относительная продолжительность работы в данном случае при каждой из нагрузок  $ПР_j = [(t_{n,j} + t_{pj})/T_u]100\%$ , где  $t_{pj}$  — период работы при постоянной  $j$ -й нагрузке;  $t_{n,j}$  — период переходного процесса (ускорения или замедления) при переходе к  $j$ -му значению частоты вращения (угловой скорости) и соответствующей ей нагрузке.

Например, для диаграммы S8 (см. рис. 1.21)  $PP_1 = [(t_y + t_{p1})/T_u]100\%$ ,  $PP_2 = [(t_{z1} + t_{p2})/T_u]100\%$ , где  $t_y$  — период ускорения;  $t_{p1}$  — период работы при номинальных условиях на первом участке;  $t_{z1}$  — период замедления на первом участке;  $t_{p2}$  — период работы при номинальных условиях на втором участке.

Для режима работы S8 предпочтительными являются следующие значения параметров:  $z$  — 30; 60; 90; 120; 180; 240 и 360 вкл./ч;  $k_j$  — 1,2; 1,6; 2; 2,5; 4;  $PP$  — 15, 25, 40 и 60 %.

В каталогах электрических машин приводятся данные для номинальных режимов S1, S2 и S3. Задача выбора электрической машины по мощности заключается в том, чтобы правильно сопоставить ее рабочий режим с номинальным, обеспечив максимальное использование выбранного двигателя по условиям нагревания.

## 1.6. Алгоритмы управления электроприводами, механизмами, агрегатами и комплексами

### 1.6.1. Математические модели и структура систем управления

Основываясь на блочно-модульных принципах построения современных компьютерных систем управления электроприводами технологических агрегатов и комплексов (как в части технических средств, так и в части программных и алгоритмических средств) структурную схему системы управления можно представить в виде трехуровневой иерархической схемы (рис. 1.22).

Нижний уровень (1) содержит взаимосвязанную электромагнитную подсистему ВЭП, входными переменными  $u$ , которой являются сигналы управления различными полупроводниковыми преобразователями, а выходными переменными  $N$  — электромагнитные моменты (силы) электродвигателей. Второй (2) уровень содержит взаимосвязанную механическую подсистему ВМП, имеющую обратные связи с ВЭП по цепям электромагнитной индукции. Выходными переменными ВМП являются переменные  $q$ , характеризующие движения механизмов (линейные и угловые перемещения, скорости, упругие силы и моменты). Подсистемы ВМП и ВЭП, рассматриваемые совместно, образуют взаимосвязанную электромеханическую систему ВЭМС. Третий (3) уровень содержит функциональную подсистему ФП, обеспечивающую формирование показателей качества  $\epsilon$  технологического процесса. Эти показатели являются выходными переменными технологического объекта ТО. Для каждой из подсистем можно рассматривать соответствующие им регуляторы РВЭП, РВЭМС, РТО, находящиеся в межуровневой подчиненности в комплексе управления КУ вза-

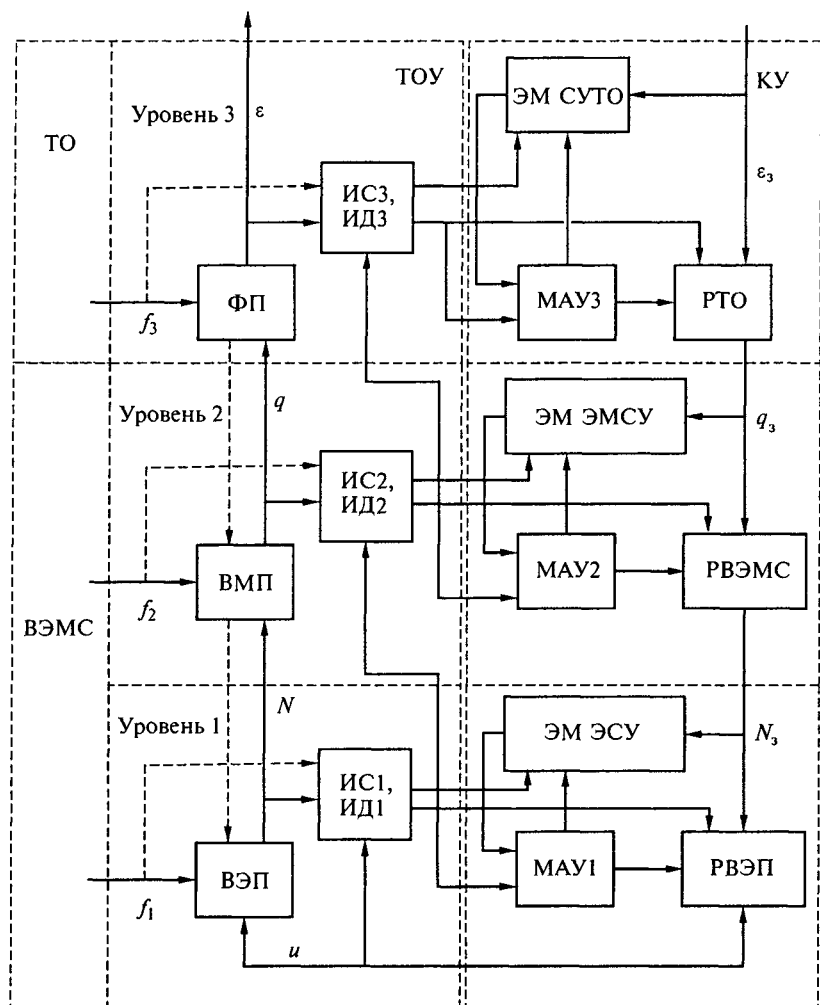


Рис. 1.22

имосвязанной системы аналогично тому, как это имеет место в технологическом объекте управления ТОУ. В регуляторы поступают сигналы заданий переменных  $N_3$ ,  $q_3$ ,  $\varepsilon_3$  и измеренные или вычисленные значения переменных. На каждую из подсистем действуют возмущения  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ . Подсистемы каждого уровня содержат информационные средства ИС и идентификаторы ИД, формирующие необходимую информацию для процесса управления на каждом уровне и в системе управления в целом. В общем случае системы управления каждого уровня представляют собой адаптивные системы, осуществляющие адаптацию через модули адаптивного управления МАУ в соответствии с эталонными моделями процес-

сов управления в электромагнитной, электромеханической системах управления ЭМ ЭСУ, ЭМ ЭМСУ и в системе управления технологическим объектом в целом ЭМ СУТО.

Функции адаптации используются в режимах наладки каждой из подсистем и рабочего функционирования в соответствии с изменением параметров и воздействий. Эталонные модели могут содержать математические описания объекта или системы и обобщенные показатели нормированных динамических характеристик, в соответствии с которыми выполняется автоматическая настройка подсистем и системы управления в целом на оптимальные режимы.

**Взаимосвязанные электромагнитные подсистемы.** Управление взаимосвязанными электромагнитными переменными имеет место при управлении электродвигателями постоянного и переменного токов, так как необходимо осуществить независимое управление электромагнитным моментом и потоком. Значительно более разнообразными могут быть варианты взаимосвязей в том случае, когда много электродвигателей и управляемых полупроводниковых преобразователей составляют единую сложную систему электропривода технологического комплекса. Применяются системы с параллельным и последовательным включениями управляемых преобразователей и электродвигателей.

Параллельное и последовательное включение управляемых преобразователей применяется для увеличения мощности и реализации двухканального управления. Во втором случае используется включение мощного преобразователя с ограниченным быстродействием совместно с маломощным быстродействующим преобразователем.

Широко распространены системы электроприводов с групповыми источниками питания, например системы для многодвигательных электроприводов переменного (рис. 1.23) и постоянного (схема, аналогичная показанной на рис. 1.23, но с другим обозначением двигателей) токов.

В качестве источника питания используется неуправляемый выпрямитель с фильтром. Электроприводы переменного тока управляются от автономных инверторов напряжения, постоянного тока — широтно-импульсных преобразователей. Рекуперация энергии в таких системах происходит с двигателя на двигатель. В случае необходимости рекуперации энергии в сеть применяются инверторы (дополнительно к неуправляемому выпрямителю) или реверсивные выпрямители вместе с фильтрокомпенсирующими устройствами.

При групповом управлении несколькими электродвигателями постоянного тока от общего управляемого преобразователя, кроме одновременного управления скоростью всех электродвигателей путем изменения напряжения якорных цепей, возникает необходимость также и в управлении скоростью отдельных электродвигателей. В этом случае применяют управление электродвигателями по цепям якоря и возбуждения. По цепи якоря осуществля-



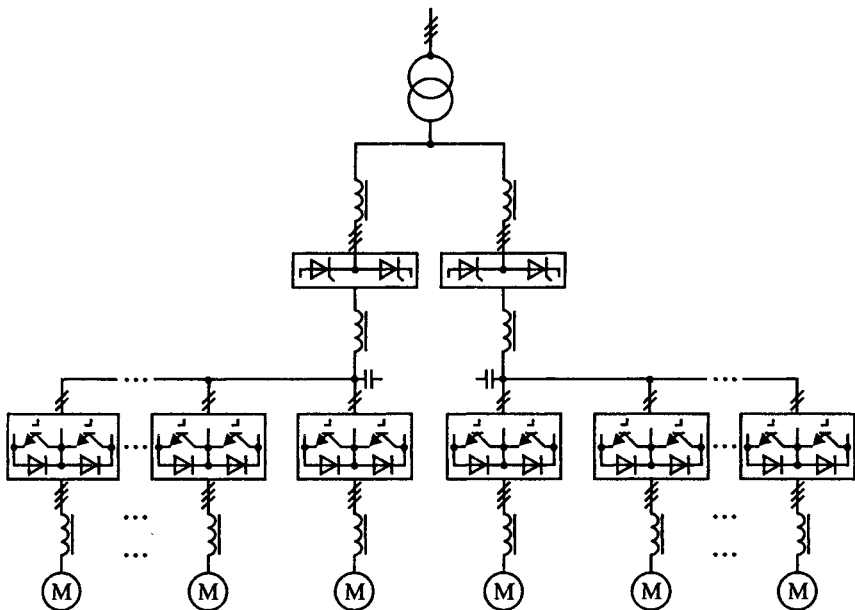


Рис. 1.23

ется групповое управление, по цепи возбуждения — автономное. Одновременное управление электродвигателями по двум цепям происходит в замкнутых системах управления.

Существующая взаимосвязь электромагнитных цепей через общую сеть питания не рассматривается при описании различных их видов. Влияние этой взаимосвязи на динамику системы электропривода, как правило, оказывается слабым для промышленных систем, но может оказаться весьма существенным для систем, питание которых осуществляется от автономных источников энергии.

**Взаимосвязанные механические подсистемы.** Агрегаты и комплексы, предназначенные для обработки и перемещений ленточных материалов, роботы, манипуляторы, металлообрабатывающие станки, прессы и другие объекты имеют взаимосвязанные многомассовые механические подсистемы, управление которыми осуществляется многодвигательными электроприводами. Если исходить из предположения, что взаимосвязь механической и электромагнитной подсистем слаба (по существу, это предположение связано с оценкой влияния обратных связей по ЭДС двигателей на динамику отдельных систем управления), то механическая подсистема может рассматриваться независимо от электромагнитной подсистемы.

Если в многомассовой упругой механической подсистеме, управление которой осуществляется многодвигательными электро-

приводами, в явном виде отсутствуют звенья с распределенными параметрами, то механическая подсистема может быть представлена в виде многих элементов с сосредоточенными массами, соединенных между собой безмассовыми упругими связями. Под действием нескольких входных переменных ВМП совершает основное движение и колебательные движения относительно основного. Колебания ВМП всегда являются затухающими из-за влияния восстанавливающих сил системы, поэтому математическое описание ВМП следует выполнять с учетом этих сил. Однако делать это можно только для простых случаев или после упрощения исходной модели системы, поскольку полная математическая модель ВМП может оказаться сложной и обращение с нею в задачах анализа и синтеза взаимосвязанных систем управления становится невозможным. Поэтому целесообразно вначале составить детализированное математическое описание ВМП без учета демпфирующих сил, упростить его так, чтобы с достаточной точностью отразить динамические свойства системы в заданных полосах частот сепаратных подсистем, а затем в упрощенных моделях учесть силы демпфирования.

К механическим системам с сосредоточенными параметрами могут быть приведены и системы с распределенными параметрами.

При исследовании ВМП возникают задачи:

определения структуры механической модели ВМП, обеспечивающей при  $m$  входных и  $r$  выходных переменных оптимальное решение задачи управления ВЭМС;

анализа и синтеза ВМП, в соответствии с которыми на стадии проектирования находят такие сочетания инерционно-жесткостных и демпфирующих параметров, которые обеспечивали бы малую интенсивность колебаний механизма в заданных полосах частот сепаратных подсистем управления.

Рассмотрим наиболее общий вариант ВМП, при котором отдельные элементы системы имеют несколько степеней свободы. Такая подсистема имеется у манипуляторов, экскаваторов, козловых кранов. Дифференциальные уравнения, характеризующие свободные колебания такой ВМП, могут быть получены из уравнений Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_j};$$

$$T = 0,5 \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \mu_{ij} \dot{q}_i \dot{q}_j; \quad i, j = \overline{1, k}; \quad (1.6)$$

$$\Pi = 0,5 \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k c_{ij} q_i q_j.$$

Раскрытие уравнения (1.6) относительно  $T$  и  $\Pi$  приводит к системе линейных однородных дифференциальных уравнений второго, порядка:

$$M\ddot{q}(t) + Cq = 0, \quad (1.7)$$

где  $q$  —  $k$ -вектор обобщенных координат;  $M, C$  — симметричные квадратные  $k \times k$  матрицы соответственно коэффициентов инерции и коэффициентов жесткостей ( $\mu_{ij} = \mu_{ji}, c_{ij} = c_{ji}$ ).

По полученным таким образом дифференциальным уравнениям целесообразно составить структуру механической модели, которую в дальнейшем удобно использовать для анализа и синтеза ВМП.

Подставляя частные решения в уравнение (1.7), получим

$$-\lambda Mq_0 + Cq_0 = 0,$$

где  $q_0$  —  $k$ -вектор относительных амплитуд свободных колебаний;  $\lambda = \omega^2$ .

Переписав это уравнение в виде

$$(M^{-1}C - \lambda I)q_0 = 0, \quad (1.8)$$

где  $I$  — единичная матрица, можем определить вектор  $q_0$  как собственный вектор матрицы  $M^{-1}C$ , а  $\lambda$  — как ее собственное значение.

Для многих вариантов механизмов, имеющих одну степень свободы, уравнение (1.8) может быть записано в более простом виде:

$$(G - \lambda I)q_0 = 0, \quad (1.9)$$

где

$$G = M^{-1}C = \begin{bmatrix} c_{11}/\mu_{11} & c_{12}/\mu_{11} & \cdots & c_{1k}/\mu_{11} \\ c_{21}/\mu_{22} & c_{22}/\mu_{22} & \cdots & c_{2k}/\mu_{22} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{k1}/\mu_{kk} & c_{k2}/\mu_{kk} & \cdots & c_{kk}/\mu_{kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c'_{11} & c'_{12} & \cdots & c'_{1k} \\ c'_{21} & c'_{22} & \cdots & c'_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c'_{k1} & c'_{k2} & \cdots & c'_{kk} \end{bmatrix}.$$

Собственные значения  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$  матрицы  $G$  определяют собственные частоты колебаний механической подсистемы  $\omega_{y1} = \sqrt{\lambda_1}, \omega_{y2} = \sqrt{\lambda_2}, \dots, \omega_{yk} = \sqrt{\lambda_k}$ . Решение уравнения (1.9) для каждого из найденных  $\lambda_r$  дает собственные векторы матрицы  $G$ , имеющие важное значение при исследовании динамики ВМП. Соотношение относительных амплитуд колебаний элементов механической системы в теоретической механике иллюстрируется графически в виде формы колебаний. Однако они не дают однозначного ответа о преимущественной принадлежности интересующей частоты колебаний к тому или иному элементу ВМП. Такую ин-

формацию можно получить, если совместно с формой колебаний рассматривать для каждой  $\omega_{yr}$  распределение относительных значений потенциальной энергии, запасаемой в упругих звеньях  $\bar{P}_{ij(r)} = c_{ij} (\bar{q}_{0ir} - \bar{q}_{0jr})^2$ , где  $\bar{P}_{ij(r)}$  — относительное значение потенциальной энергии, запасаемой в упругом звене  $c_{ij}$  при  $\lambda = \lambda_r$ ;  $\bar{q}_{0ir}$ ,  $\bar{q}_{0jr}$  — относительные амплитуды колебаний  $i$ -го и  $j$ -го инерционных звеньев.

Тогда можно точно установить принадлежность каждой частоты колебаний элементам ВМП, что важно в задачах синтеза при варьировании инерционно-жесткостных параметров для получения заданных частот колебаний.

Для математического описания механической подсистемы в составе системы управления при линейном приближении необходимо знать передаточную матрицу, связывающую выходные и входные переменные. Такая матрица может быть определена через уравнение состояния или непосредственно по дифференциальным уравнениям, составленным для известной структуры механической модели.

Если кроме обобщенных координат ВМП  $q_1, q_2, \dots, q_k$  рассматривать их производные  $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_k$  и ввести обозначения  $x_1 = q_1, x_2 = q_2, \dots, x_k = q_k, x_{k+1} = \dot{q}_1, \dots, x_{2k} = \dot{q}_k$ , то уравнения состояния можно записать в следующем стандартном виде:

$$\dot{x} = Ax + Bu; \quad (1.10)$$

$$y = Cx, \quad (1.11)$$

где  $x - 2k$  — вектор состояния системы;  $u - m$  — вектор входных переменных;  $y - r$  — вектор выходных переменных;  $A, B, C$  — матрицы размерности соответственно  $2k \times 2k, 2k \times m, r \times 2k$ .

В изображениях в области комплексной переменной  $p$  имеем

$$(pI - A)x = Bu; \quad (1.12)$$

$$y = Cx. \quad (1.13)$$

Умножив обе части уравнения (1.12) на  $(pI - A)^{-1}$ , получим

$$x = (pI - A)^{-1} Bu. \quad (1.14)$$

Обозначив  $(pI - A)^{-1} B = H(p)$ , получим

$$x = H(p)u, \quad (1.15)$$

где  $H(p)$  — передаточная матрица «вход—состояние»:

$$H(p) = \frac{1}{\det(pI - A)} \text{adj}(pI - A)B. \quad (1.16)$$

Воспользовавшись уравнением (1.14), запишем

$$y = C(pI - A)^{-1}Bu. \quad (1.17)$$

Обозначив

$$W(p) = CH(p) = C(pI - A)^{-1}B, \quad (1.18)$$

получим

$$y = W(p)u, \quad (1.19)$$

где  $W(p)$  — передаточная матрица «вход — выход»:

$$W(p) = \frac{1}{\det(pI - A)} C \text{adj}(pI - A)B. \quad (1.20)$$

Определив передаточные матрицы механической системы (1.20), следует упростить их, исключив из рассмотрения все члены, соответствующие значениям частот собственных колебаний, значительно превышающих верхнюю границу полосы пропускания сепаратных систем управления. В первую очередь это относится к полюсам передаточных функций. Достаточно иметь два или три члена рассматриваемых произведений, соответствующих минимальным частотам колебаний для того, чтобы получить математическое описание ВМП, близкое к реальному. Нули передаточных функций следует ограничивать предельными значениями частот, но при этом надо иметь в виду, что значения минимальных частот колебаний, определяющих нули передаточных функций, могут быть меньше минимальных частот колебаний, определяющих полюса, и эквивалентирование следует выполнять с определенной осторожностью.

Эквивалентирование механической системы можно выполнять и на уровне механической модели, если использовать методику уменьшения обобщенных координат, основанную на преобразовании парциальных систем ВМП, содержащих коэффициент инерции  $\mu_j$  и два коэффициента податливости  $e_{j-1,j}$ ,  $e_{j,j+1}$  или два коэффициента инерции  $\mu_j$ ,  $\mu_{j+1}$  и один коэффициент податливости  $e_{j,j+1}$  (коэффициент податливости определяется как величина, обратная коэффициенту жесткости).

Если значение парциальных частот

$$\omega'_{nj} = \left( \mu_j \frac{e_{j-1,j}e_{j,j+1}}{e_{j-1,j} + e_{j,j+1}} \right)^{-\frac{1}{2}}; \quad \omega''_{nj} = \left( e_{j,j+1} \frac{\mu_j\mu_{j+1}}{\mu_j + \mu_{j+1}} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1.21; 1.22)$$

отвечают неравенствам  $\omega'_{nj} \gg \omega_{\max}$  и  $\omega''_{nj} \gg \omega_{\max}$ , где  $\omega_{\max}$  — верхняя граница полосы пропускания сепаратной системы управления, то преобразование парциальной системы одного вида в парциальную систему другого вида не приводит к существенным искажениям динамической характеристики всей системы. Параметры парциальной системы одного вида преобразуются в эквивалентные параметры парциальной системы другого вида по формулам:

$$\mu'_j = \frac{e_{j,j+1}}{e_{j-1,j} + e_{j,j+1}} \mu_j; \quad \mu'_{j+1} = \frac{e_{j-1,j}}{e_{j-1,j} + e_{j,j+1}} \mu_j; \quad (1.23; 1.24)$$

$$e'_{j,j+1} = e_{j-1,j} + e_{j,j+1}; \quad \mu''_j = \mu_j + \mu_{j+1}; \quad (1.25; 1.26)$$

$$e''_{j-1} = \frac{\mu_{j+1}}{\mu_j + \mu_{j+1}} e_{j,j+1}; \quad e''_{j+1} = \frac{\mu_j}{\mu_j + \mu_{j+1}} e_{j,j+1}, \quad (1.27; 1.28)$$

где штрихами обозначены преобразованные параметры.

Приведенные коэффициенты демпфирования в передаточных функциях обычно бывает сложно рассчитывать, поэтому пользуются их приближенными оценками. Но это не вносит существенных погрешностей в динамические модели механических систем, так как значения этих коэффициентов очень малы и пределы их изменений для однородных сред также малы. Например, при деформациях металлических конструкций приводов коэффициенты демпфирования находятся в пределах 0,02...0,07. Поэтому, приняв средние значения этих коэффициентов, можно выполнить теоретические исследования, а далее для реальных конструкций уточнить их значения по результатам экспериментальных исследований.

Таким образом для механической подсистемы произвольного вида, применив уравнения Лагранжа, можно получить систему дифференциальных уравнений и механические модели. В соответствии с этим можно определить динамические свойства подсистемы с учетом обратных связей по механическим переменным.

На рис. 1.24 показаны механические модели многомассовых подсистем с контурами регулирования обобщенных координат и упругих сил для цепочной (см. рис. 1.24, а), разветвленной (см. рис. 1.24, б) и разветвленно-кольцевой (см. рис. 1.24, в) структур.

В сложных многомассовых механических подсистемах применением электроприводных узлов добиваются новых соотношений параметров и обеспечивают активное влияние на колебания звеньев системы. На этой базе сложилось новое направление в теоретической и прикладной механике, называемое *активной* или *адаптивной* механикой.

**Функциональные подсистемы.** Математическое описание функциональных подсистем содержит описания физических процес-

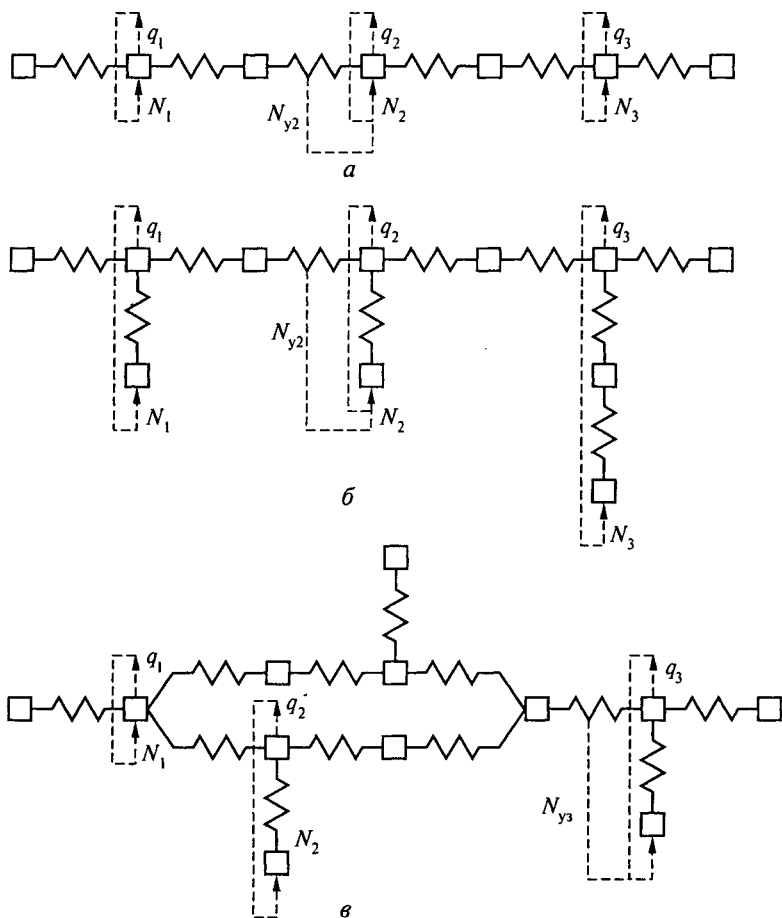


Рис. 1.24

сов, характерных для конкретной технологии. Часто эти описания включают в себя имперические формулы с разнообразными значениями коэффициентов, зависящими от многих факторов, важных для конкретной технологии (см. гл. 4 и 5).

Управление технологическими переменными диктует необходимость управления механическими переменными, а через них и электромагнитными переменными. В соответствии с этим устанавливаются виды оценок показателей качества управления переменными каждого уровня.

В наиболее общем виде описание каждой из подсистем может быть выполнено в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений

$$\dot{x} = F(x, u, f, t) \quad (1.29)$$

или

$$\dot{x} = A(x, t)x + B(x, t)u + D(x, t)f; \quad (1.30)$$

$$y = Cx, \quad (1.31)$$

где  $A(x, t)$ ,  $B(x, t)$ ,  $D(x, t)$  — матрицы состояния, управления и возмущения соответственно;  $C$  — масштабная матрица;  $x$ ,  $u$ ,  $f$ ,  $y$  — векторы переменных состояния, управления, возмущения и измеряемых переменных соответственно.

### 1.6.2. Каскадное (подчиненное) и модальное управление

Разработку алгоритмов управления электроприводами технологических объектов разного производственного назначения выполняют, как правило, с учетом двух важнейших оценок качества — быстродействия (с учетом ограничений на потребляемую мощность) и связанной с ним производительности, а также интегральной квадратичной оценки ошибок управления и связанного с ней качества технологического процесса. Достижение положительных результатов по второй оценке предопределяет (с учетом энергетических ресурсов) положительный результат и по первой оценке.

Структура системы управления каждого уровня может быть представлена в виде, показанном на рис. 1.25, а, где  $F$ ,  $M$ ,  $R$  —

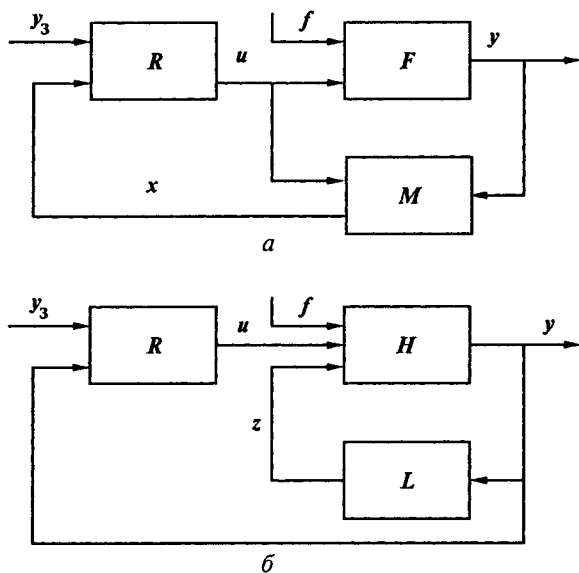


Рис. 1.25



математические модели объекта, наблюдателя и регулятора соответственно. Управление осуществляется по полному вектору переменных состояния каждого уровня.

В работе [24] дан анализ методов синтеза оптимальных алгоритмов управления локальными и взаимосвязанными системами, и с позиции синергетической теории управления разработаны новые подходы к синтезу регуляторов в соответствии с оптимизирующими функционалами вида

$$J_i = \int (m_i^2 \psi_i^2 + \lambda_i^2 u_i^2) dt, \quad (1.32)$$

где  $\psi_i = \psi_i(x_1, \dots, x_n)$  — агрегированная макропеременная, представляющая собой произвольную дифференцируемую или кусочно-непрерывную функцию фазовых координат  $x_1, \dots, x_n$ ,  $\psi(0, \dots, 0) = 0$ ;  $u_i$  — управляющее воздействие на объект;  $m_i, \lambda_i$  — весовые коэффициенты.

С единых позиций синтезируются алгоритмы управления локальными и взаимосвязанными объектами в режимах малых и больших отклонений переменных. На основе процедур *агрегирования* (получение из исходной модели эквивалентной ей модели с меньшим количеством переменных) и *аттракции* (организации притягивающих множеств в фазовом пространстве) синтезируются алгоритмы управления, соответствующие функционалу (1.32) и обеспечивающие оптимальность по быстродействию и точности.

В теории и практике управления взаимосвязанными электромеханическими системами сложилось направление, в котором формальные процедуры оптимального синтеза одномерных или многомерных регуляторов по тем или иным критериям используются редко. Чаще стремятся получить нормированные динамические процессы на основе типовых алгоритмов управления при малых и больших изменениях переменных, учитывая совокупность физических особенностей технических средств, на базе которых реализуется электромеханическая система. Для автономных систем при малых изменениях переменных к ним относятся широко известные в методах каскадного (подчиненного) управления настройки контуров регулирования на «оптимум по модулю» (ОМ) и «симметричный оптимум» (СО), а в методах модального управления — стандартные распределения корней характеристических полиномов. Такая настройка соответствует стабилизирующим и следящим (контурным) режимам работы систем, а также режимам параболических, треугольных и трапецеидальных движений, характерных для больших изменений переменных и соответствующих пусковым, тормозным, циклическим, программно-логическим режимам работы систем электроприводов. Последнее реализуется формированием соответствующих программных заданий на входы систем управления с использованием или без использования ог-

раничений переменных регуляторов. Оптимизация динамических процессов при больших изменениях переменных осуществляется при условии оптимизации динамических процессов при малых изменениях переменных.

В унифицированных системах автоматизированных электроприводов, представляемых на рынок различными фирмами в виде управляемых преобразователей или комплектных ЭП, предусматривается, как правило, раздельное регулирование электромагнитного момента и тока двигателя. В частотно-регулируемых электроприводах переменного тока осуществляют регулирование модуля потока статора или ротора. В любых случаях структуры контуров регулирования электромагнитных переменных являются закрытыми для пользователя и возможна только настройка параметров в режиме самонастройки или в результате ввода в систему информации о параметрах используемого электродвигателя.

Поскольку включение электропривода в сеть и его работа при наличии только электромагнитных контуров невозможны, в основном электронном блоке контроллера привода предусматривается установка регулятора скорости, структура и параметры которого могут меняться. По отношению к контуру регулирования электромагнитного момента регулятор скорости включается и по структуре каскадного управления. Его же реализация, как и реализация регуляторов других механических переменных (положения, натяжения и др.), а также технологических переменных, может производиться методами каскадного и модального управления. Для этого, как правило, используют дополнительные интеллектуальные технологические модули (см. гл. 2).

### 1.6.3. Декомпозиция взаимосвязанных систем

Методы оптимизации автономных систем можно органично перенести и на взаимосвязанные системы, но при этом одновременно следует решать задачу декомпозиции взаимосвязанной системы. В общем случае для системы, содержащей  $m$  отдельных систем и обеспечивающей регулирование  $m$  выходных переменных, можно получить  $m \times m$ -матрицу оценок регулируемых переменных:

$$J = [J_{ij}], \quad i, j = \overline{1, m}. \quad (1.33)$$

Формально декомпозиция обеспечивается при реализации условий диагональной доминантности матрицы  $J$ :

$$J_{ii} \gg \sum J_{ij}, \quad i \neq j, \quad (1.34)$$

где  $J_{ii}$  — диагональный элемент матрицы;  $\sum J_{ij}, i \neq j$  — сумма недиагональных элементов строки матрицы оценок.

Обобщенная оценка в этом случае

$$J \approx \sum r_i J_{ij},$$

где  $r_i$  — весовой коэффициент оценки каждой регулируемой переменной, учитывающий ее значение для формирования показателей качества технологического процесса.

Рассматривая малые отклонения переменных, в качестве  $J_{ij}$  можно использовать интегральную квадратичную оценку (ИКО), при которой ошибка  $i$ -й переменной

$$J_{ij} = a_{0i} I_{0ij} + a_{1i} I_{1ij} + \dots + a_{ri} I_{rij} + \dots + a_{ni} I_{nij} = \sum_{r=0}^n a_n I_{nij}, \quad (1.35)$$

где  $a_n$  — весовые коэффициенты;  $I_{0ij} = \int_0^{\infty} e_{ij}^2(t) dt$ ;  $I_{1ij} = \int_0^{\infty} (de_{ij}(t)/dt)^2 dt$ ;

$$I_{2ij} = \int_0^{\infty} (d^2 e_{ij}(t)/dt^2)^2 dt \text{ и т. д.}$$

При использовании ИКО во взаимосвязанных системах минимизация матрицы  $J$  приводит к реализации условия (1.34), что соответствует декомпозиции системы, т. е. превращению взаимосвязанных сепаратных систем в квазиавтономные системы. Исключение для электромеханических систем составляют системы электрической синхронизации, в которых предусматривается применение перекрестных связей для синхронизации движений механизмов при действии возмущений.

Декомпозиция взаимосвязанной электромеханической системы может быть формально обеспечена применением многомерного регулятора, синтезируемого методами модального управления. Но более приемлемой является динамическая декомпозиция, обеспечиваемая, выражаясь языком синергетической теории управления, организацией притягивающих множеств в фазовом пространстве переменных. В электромеханических системах  $m$  притягивающих множеств могут быть образованы в  $m$  сепаратных системах, синтез алгоритмов управления которыми выполняется не только по фазовым, но и по обобщенным переменным, существенно влияющим на динамику системы. Такими переменными являются частоты коммутации широтно-импульсных модуляторов управляемых полупроводниковых преобразователей, собственные частоты колебаний механизмов, полосы пропускания или частоты среза сепаратных систем.

Положительные результаты данного подхода в электромеханических системах определяются следующим:

условие регулирования электромагнитных и механических переменных, как правило, диктуется регулированием технологических переменных. Их виды, методы оптимизации и возможности

хорошо известны из исследований автономных систем и они составляют основу сепаратных систем;

развитие управляемых полупроводниковых преобразователей идет по пути широкого применения широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с частотами коммутации до 10... 15 кГц, что создает потенциальные возможности для расширения полос пропускания систем;

тенденция к упрощению механических передач, переходу к безредукторным электроприводам и механотронным модулям приводит к существенному повышению собственных частот колебаний механической подсистемы, а следовательно, к расширению полос пропускания систем управления.

На каждом уровне взаимосвязанной системы управления синтез алгоритмов управления может быть выполнен автономно с учетом представления математической модели нижнего уровня в эквивалентном упрощенном виде аналогично тому, как это делается при синтезе контуров регулирования автономных систем каскадного (подчиненного) управления.

Оптимизация взаимосвязанной системы по ИКО с использованием редуцированных «наблюдателей» и многомерных регуляторов, содержащих элементы собственных каналов и перекрестных связей (в виде регуляторов состояния или модальных регуляторов одновременно), приводит к декомпозиции системы. Это может быть учтено при синтезе алгоритмов управления с использованием в этом синтезе не только параметров регуляторов, но и параметров объектов управления.

Варьирование в широких пределах частот среза сепаратных систем  $\omega_{ci}$  за счет применения соответствующих технических средств позволяет установить границы в соотношении параметров матриц  $H$  и  $L$  (рис. 1.25, б), представляющих собой математическое описание прямых и перекрестных связей объекта управления, при которых выполняется декомпозиция системы управления и сепаратные системы можно рассматривать квазиавтономными.

Особым и распространенным случаем взаимосвязей электро-механических систем являются взаимосвязи через технологические агрегаты, которые объединяются упругим обрабатываемым материалом. Это характерно для станов холодной прокатки, бумагоделательных машин, кордных линий и других объектов. В таких системах условие декомпозиции может быть установлено из анализа соотношений собственных частот упругих колебаний механической подсистемы  $\omega_{yk}, k = \overline{1, n}$  с частотами среза сепаратных систем управления  $\omega_{ci}, i = \overline{1, m}$ .

Рассмотрим систему управления двумя агрегатами, взаимосвязанными гибким натянутым полотном, функциональная схема которой показана на рис. 1.26.

Агрегаты 1 и 2 изображены в виде валов, к которым приведены все механизмы каждого из агрегатов;  $r_1, r_2$  — радиусы валов;  $i_{p1}, i_{p2}$  — передаточные числа редукторов;  $J_{a1}, J_{a2}$  — приведенные моменты инерции агрегатов;  $M_1, M_2$  — моменты электродвигателей;  $M_{c1}, M_{c2}$  — моменты сопротивлений. Приведенная схема является частью более общей схемы, поэтому действия на полотно агрегатов, предшествующих агрегату 1 и следующих за агрегатом 2, учтены в виде их реакций  $F_1$  и  $F_3$ .

Взаимосвязь сепаратных систем управления агрегатами осуществляется по цепям нагрузки и управления для задания общей скорости и соотношения скоростей агрегатов. Последнее выполняется технологическим программируемым микроконтроллером КТ. Блоки управления БУ1, БУ2 содержат все компоненты комплектов электроприводов, включая датчики.

Поведение полотна на участке растяжения длиной  $L_{1,2}$  с учетом скоростного и внутреннего демпфирования описывается дифференциальными уравнениями

$$F_2 = [(c_2/p) + b_2][v_2 - v_1(1 + \epsilon_2)]; \quad (1.36)$$

$$\epsilon_2 = (1/L_{1,2})[1/(c_2 + b_2 p)]F_2, \quad p \equiv d/dt, \quad (1.37)$$

где  $F_2$  — натяжение;  $\epsilon_2$  — относительное удлинение;  $v_2$  и  $v_1$  — линейные скорости полотна в начале и в конце участка растяжения;  $c_2$  и  $b_2$  — коэффициенты жесткости и внутреннего демпфирования.

Взаимосвязи агрегатов иллюстрируются переходными характеристиками  $v_1(t), v_2(t), F_2(t)$ , полученными при ступенчатом изменении момента электродвигателя  $M_1$  в разомкнутых системах управления (рис. 1.27).

Аналогичные результаты получаются при изменении момента  $M_2$ . Данные агрегатов и приводов следующие:  $i_{p1} = 4; J_{a1} = 600 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$

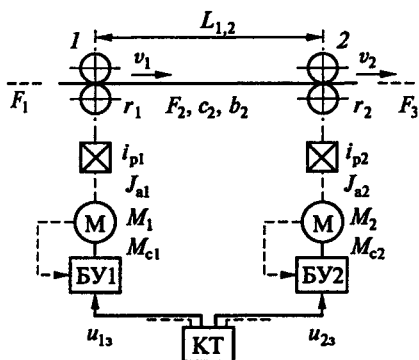


Рис. 1.26

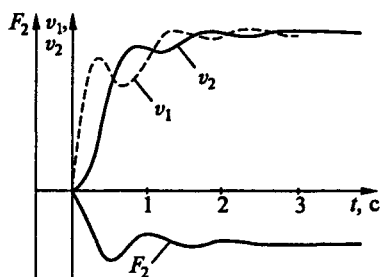


Рис. 1.27

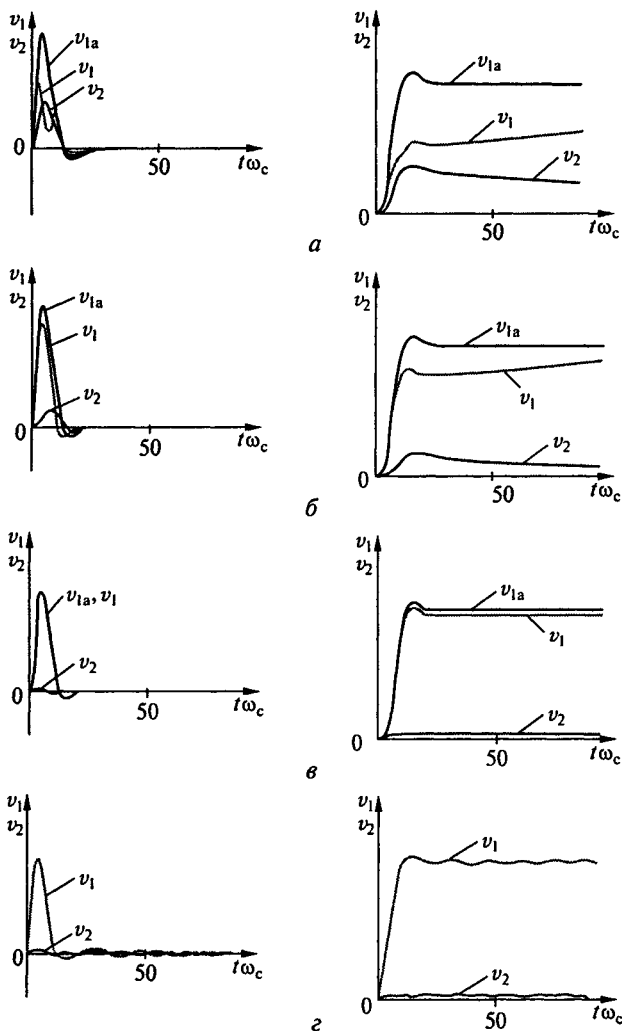


Рис. 1.28

$r_1 = 0,8$  м;  $c_2 = 20\,000$  Н/м;  $b_2 = 800$  Н/(м · с<sup>-1</sup>);  $L_{1,2} = 4$  м;  $i_{p2} = 5$ ;  $J_{a2} = 500$  кг · м<sup>2</sup>;  $r_2 = 0,6$  м;  $\omega_{y2} = 6$  с<sup>-1</sup>.

Выполнив сепаратные системы управления скоростью и соотношением скоростей с использованием типовых алгоритмов управления (ОМ — в электромагнитных контурах, СО — в механических), получим математическое описание в форме (1.30) в виде системы дифференциальных уравнений 14-го порядка. Получив частоты среза контуров регулирования скоростями  $\omega_{c1}$  и  $\omega_{c2}$  из условия  $\omega_{c1} \geq 6\omega_{y2}$ ,  $\omega_{c2} \geq 6\omega_{y2}$ , будем иметь хорошо декомпозиро-

ванную динамическую систему, в которой сепаратные системы можно рассматривать квазиавтономными.

Это иллюстрируется переходными характеристиками (рис. 1.28), полученными при ступенчатых изменениях управляющих  $u_{13}$ ,  $u_{23}$  и возмущающих  $M_{c1}$  воздействий в замкнутых системах управления при условии  $\omega_{c1} = \omega_{c2} = 12 \text{ с}^{-1}$  (рис. 1.28, а),  $\omega_{c1} = \omega_{c2} = 36 \text{ с}^{-1}$  (см. рис. 1.28, б) и  $\omega_{c1} = \omega_{c2} = 108 \text{ с}^{-1}$  (см. рис. 1.28, в).

На рис. 1.28, г показаны переходные характеристики в системе управления при действии реальных управляющих и возмущающих воздействий. Индексом 1а (см. рис. 1.28, а, б, в) обозначены переходные характеристики в автономной системе управления агрегатом 1 (см. рис. 1.26).

Использование изложенных выше приемов декомпозиции систем и типовых алгоритмов управления дает возможность адаптивных настроек сепаратных систем и взаимосвязанных систем управления в целом в режимах наладки и рабочего функционирования.

#### 1.6.4. Управление с использованием нечеткой логики

Алгоритмы управления с использованием нечеткой логики реализуются в системах управления электропривода программным способом. В программируемых контроллерах предусматриваются модули с инструкциями для пользователей, а в промышленных компьютерах — программные средства с набором стандартных ситуаций.

Нечеткая логика используется для замены традиционных алгоритмов управления и совместно с ними.

В простейшем случае вместо традиционного регулятора применяется фазы-регулятор (рис. 1.29) [46].

При построении нечеткого регулятора исходят из предположения, что эксперты в состоянии сформировать базу правил в форме

ЕСЛИ <предпосылка> ТО <вывод>

и базу данных с функциями принадлежности для предпосылок  $\mu(e)$  и выводов  $\mu(u)$ , т. е. определить все необходимые лингвистические правила с лингвистическими переменными и термами.

Терм — основная структурная единица выражения. Этот термин применяется к символическому имени (самоопределенный терм), ссылке на значение счетчика адреса. Символьный терм может содержать от одного до трех символов.

Для решения задачи принятия решения необходима еще определенная *инференц-стратегия*, т. е. определенный механизм нечетких логических выводов. С помощью этого механизма можно выполнить [46]:

оценку предпосылок, т. е. установление значения истинности ЕСЛИ части каждого правила, представляющей собой совокупность связанных между собой нечеткими операторами И, ИЛИ нечетких

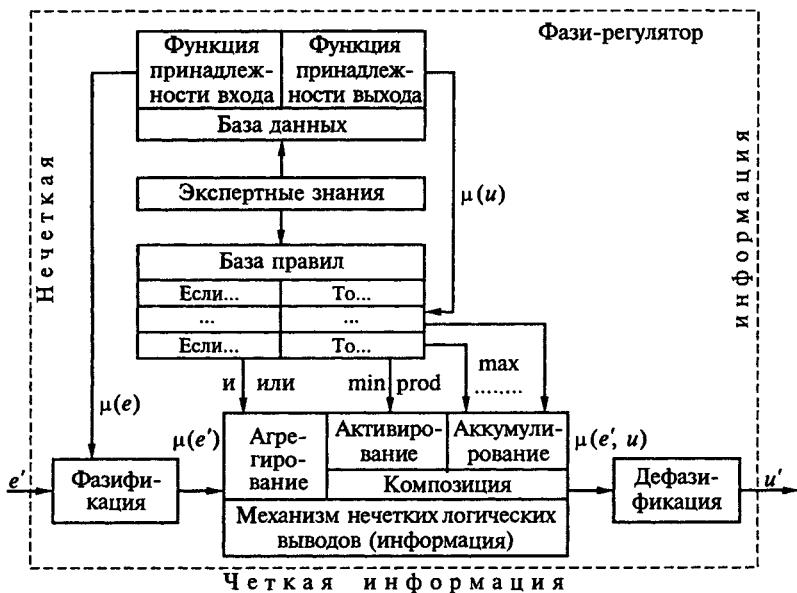


Рис. 1.29

логических высказываний. Определение значения истинности (степени выполнения) предпосылки называется агрегированием;

оценку степени истинности ТО части каждого правила на основе оценки предпосылки, т.е. степени активирования каждого правила;

обобщение частичных решений каждого активированного правила базы правил и формирование результирующего нечеткого логического вывода в форме функции принадлежности выходной лингвистической переменной, соответствующей текущему входному сигналу.

Проектирование нечеткого регулятора представляет собой циклически протекающий процесс, который лишь после многих итераций позволяет достигнуть требуемого качества управления. Обобщенная процедура проектирования представлена в виде алгоритма, показанного на рис. 1.30.

Однако, поскольку собственное ядро фазы-регулятора (фазификация, механизм нечетких логических выводов, дефазификация) не обладает внутренней динамикой, то принципиально невозможно в простейшем случае обеспечить требуемое динамическое поведение регулятора. Если ставится задача обеспечения любого динамического или нединамического поведения регулятора (например, подобного классическому ПИД-регулятору), то эта задача решается введением в контур управления блока подготовки контролируемых параметров на основе данных измерения сиг-



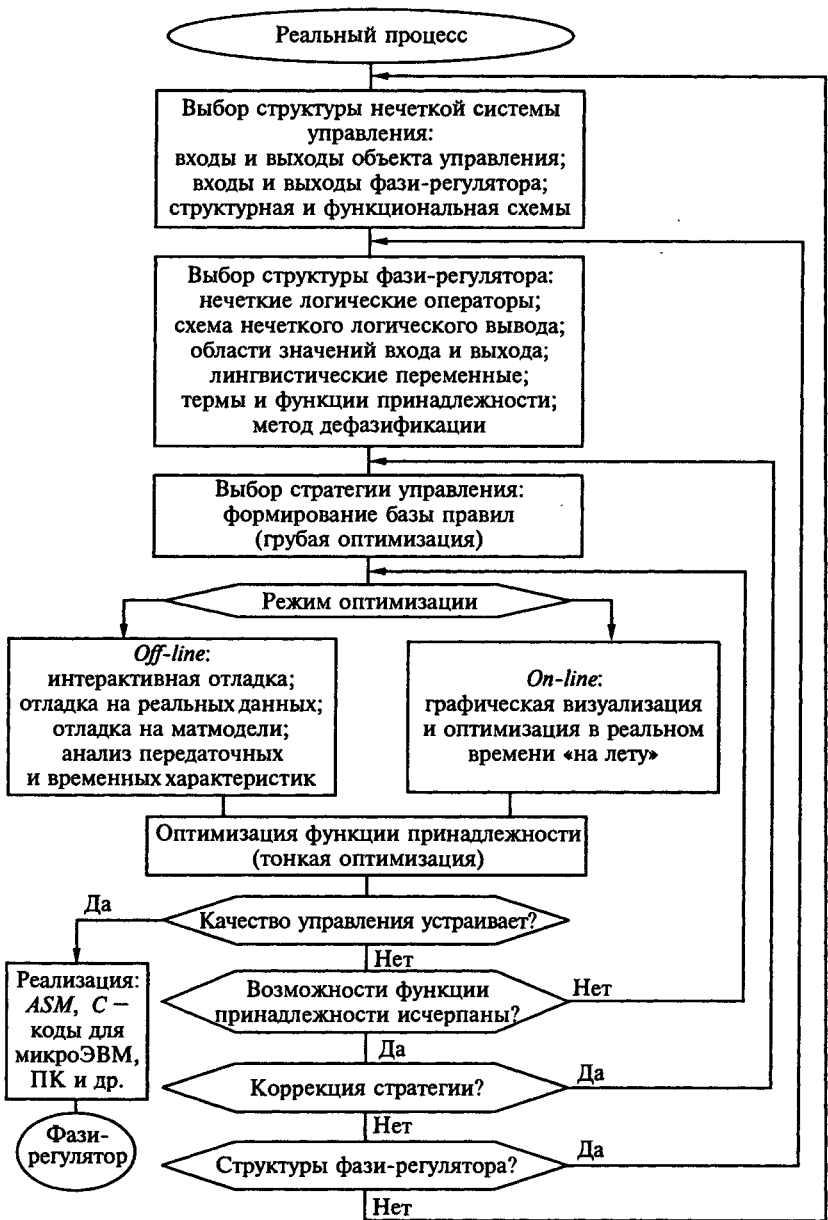


Рис. 1.30

налов датчиков. Этот блок обеспечивает расчет требуемых параметров на основе измеренной ошибки регулирования (производные, интегралы и т.п.) и является, в отличие от классических

регуляторов, не составной частью регулятора, а самостоятельным модулем.

Если некоторые процессы объекта управления плохо поддаются формализации и математическому описанию, то в существующей системе управления используют фазы-регулятор параллельно традиционному регулятору.

При использовании методов каскадного управления с классическим регулятором во внутреннем контуре фазы-регулятор может быть применен во внешнем контуре.

Методы нечеткой логики успешно используются в адаптивных системах для настройки и коррекции параметров регуляторов в процессе их работы.

Возможны варианты выполнения таких систем. В частности, осуществляется настройка параметров традиционных регуляторов с использованием модулей адаптивной системы, реализованных алгоритмами нечеткой логики. В другом случае перестраиваемый регулятор и модули адаптивной системы реализуются алгоритмами нечеткой логики, чем создаются самоорганизующиеся фазы-контроллеры, которые посредством модификации параметров регулятора оптимальным образом настраиваются на управляемый процесс.

Основой для адаптации фазы-контроллера является наблюдение за ошибкой регулирования и (или) выходной величиной объекта управления, из которой формируется значение показателя качества (например, минимума интегральной квадратичной оценки). Стратегия настройки параметров сосредоточена в модуле алгоритма адаптации. Он имеет «интеллект» адаптивного регулятора в форме различных команд установки параметров в зависимости от значения текущего показателя качества. При этом реализация алгоритма адаптации как фазы-алгоритма выполняется на основе правил типа ЕСЛИ..., ТО...

Алгоритм адаптации можно применять также к различным компонентам нечеткого регулятора. В простейшем случае достаточно изменения масштаба области значений входных величин для достижения переключения между настройками. Более сложные алгоритмы могут вовлекать в процесс адаптации функции принадлежности или даже базу правил, модифицируя в зависимости от состояния объекта управления форму нечетких множеств, отдельные правила или переключаясь между разными множествами правил.

Пример реализации управления с использованием нечеткой логики (фазы-регулятора) приведен в пп. 4.3.2.

## Глава 2

# ТИПОВЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ

### 2.1. Унифицированные системы электроприводов (комплектные электроприводы)

Унифицированные системы выполняются на базе комплектных электроприводов постоянного и переменного токов. Доля электроприводов постоянного тока составляет в новых разработках систем автоматизации примерно 10 %. Преимущественно применяются электроприводы переменного тока с асинхронными, синхронными и индукторными двигателями.

В состав комплектного электропривода входят:

- электродвигатель с датчиком или без датчика скорости;
- управляемый преобразователь, состоящий из силовых полупроводниковых элементов (диодов, тиристоров, транзисторов и др.) с системой охлаждения, защитных предохранителей, разрядных и защитных *RLC*-цепей, контроллеров управления преобразователями и контроля состояния элементов преобразователей;
- силовой трансформатор, автотрансформатор, реактор;
- коммутационная и защитная аппаратура в цепях постоянного и переменного токов (автоматические выключатели, линейные контакторы, рубильники, предохранители);
- устройства торможения электродвигателей;
- контроллеры управления электроприводом, модули интеллектуальной периферии, ввода и вывода сигналов, сетевые средства, терминалы, кнопки управления;
- пульты управления, содержащие командные, сигнальные и управляющие устройства;
- источники питания.

В соответствии с идеологией блочно-модульного исполнения комплектных электроприводов, как правило, предусматривается возможность широкого варьирования средств, входящих в состав комплектного электропривода, с целью их адаптации к режимам и условиям работы механизмов в технологических агрегатах.

Типовая структурная схема комплектного электропривода показана на рис. 2.1, где КЗА — коммутационно-защитная аппаратура; ФНТ1, ФНТ2 — силовые модули фильтрации, согласования напряжений и ограничения токов на входе и выходе элект-

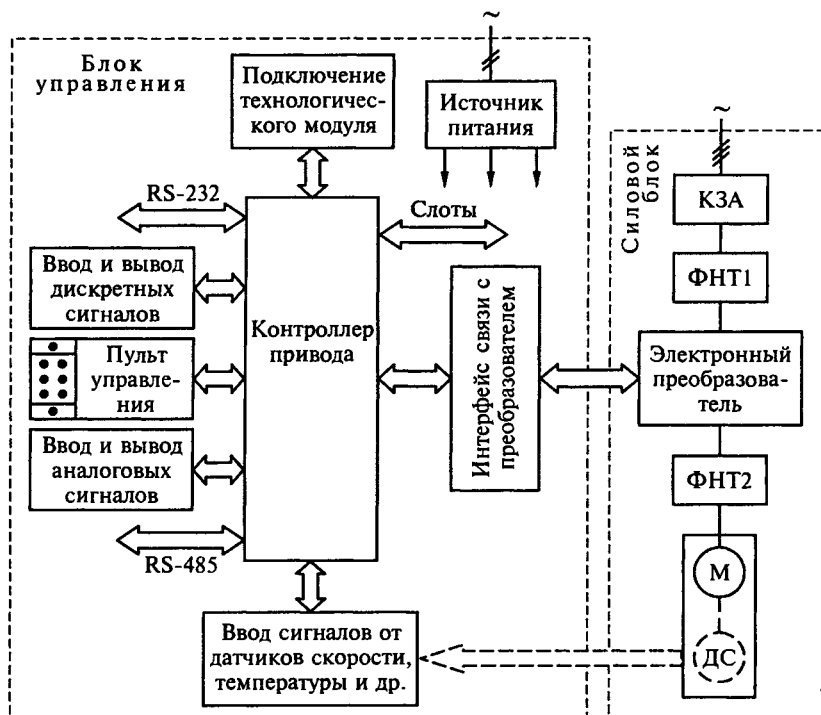


Рис. 2.1

ронного преобразователя; М — электродвигатель с датчиком скорости ДС или без него.

Модули электронного преобразователя соответствуют конкретной схеме электропривода. Так, для частотно-регулируемых электроприводов переменного тока применяются модули выпрямителя и инвертора; для электроприводов постоянного тока — модули реверсивного или нереверсивного выпрямителя.

Комплектные электроприводы имеют исполнения, различающиеся:

- по току, напряжению и мощности преобразователей;
- числу двигателей (одно-, многодвигательные);
- наличию или отсутствию реверса (нереверсивные, реверсивные);
- способу торможения (с рекуперацией, без рекуперации энергии в сеть, динамическое торможение);
- диапазону изменения скорости;
- регулируемым переменным (скорость, положение, синхронизация скоростей или положений, нагрузка многодвигательных электроприводов, мощность, натяжение, давление, подача и др.);
- напряжению и частоте питающей сети (380; 660 В; 3; 6 или 10 кВ);

способу связи с питающей сетью (трансформаторная связь, реакторная связь).

Комплектные электроприводы имеют также различные исполнения: по конструкции; виду охлаждения силовых полупроводниковых элементов (естественное, воздушное с помощью вентиляторов, водяное); по обслуживанию шкафов с аппаратурой (однорядное или двустороннее) и т. п.

Указанные признаки находят свое отражение в типе, который присваивает электроприводу завод-изготовитель.

## **2.2. Блочно-модульные принципы комплектования автоматизированных электроприводов**

### **2.2.1. Электроприводы переменного тока**

Рассмотрим варианты выполнения частотно-регулируемых электроприводов, выпускаемых ведущими электротехническими корпорациями.

Частотно-регулируемые электроприводы фирмы «Siemens» (Simovert Master Drives) [59] выполняются мощностью от 2,2 до 2300 кВт и имеют 12 типоразмеров. Существует два блочных варианта выполнения преобразователей: первый — для подключения к сети переменного трехфазного напряжения; второй — в виде автономного инвертора напряжения для подключения к сети постоянного напряжения. Соответственно имеется силовой блок ввода (преобразования переменного напряжения в постоянное), модульные варианты выполнения которого обеспечивают:

шестиимпульсное преобразование переменного напряжения в постоянное (одноквadrантный режим) (рис. 2.2, а, б, в);

шестиимпульсное преобразование переменного напряжения в постоянное и наоборот с использованием тиристоров (четыреkhвadrантный режим) (рис. 2.2, г);

шестиимпульсное преобразование переменного напряжения в постоянное и наоборот с использованием силовых транзисторов, шунтированных диодами (четыреkhвadrантный режим) (рис. 2.2, д).

Двенадцатиимпульсное преобразование обеспечивается двумя трехфазными мостовыми схемами выпрямления, питание которых осуществляется через трехобмоточный трансформатор с двумя вторичными обмотками, сдвинутыми на 30 электрических градусов.

Силовым блоком вывода является автономный инвертор напряжения (рис. 2.2, е). Объединение блоков ввода и вывода соответствует полной схеме преобразователя частоты (ПЧ).

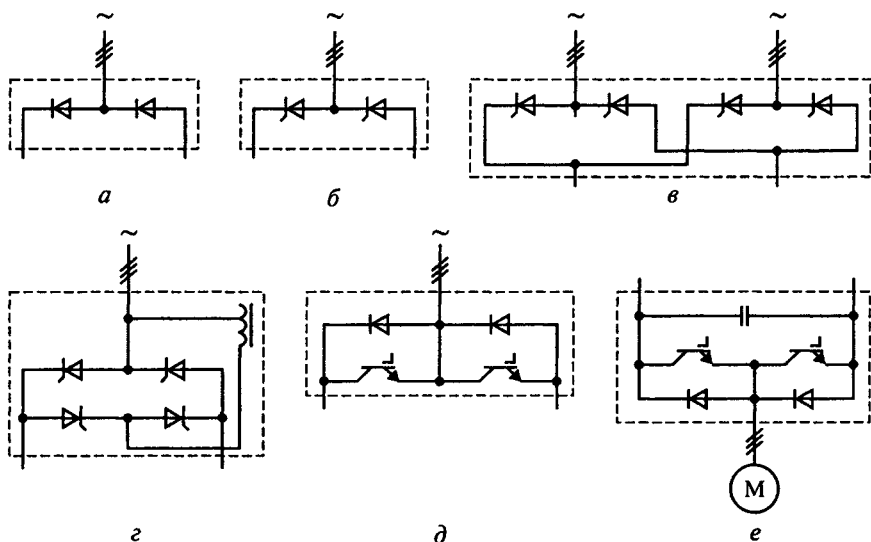


Рис. 2.2

Дополнительными силовыми модулями ПЧ являются модули: коммутационно-защитной аппаратуры (КЗА), дросселей ввода и вывода, фильтров (ввода и вывода) электромагнитных помех, торможения (транзисторные с внутренним или наружным резистором).

При использовании четырехквadrантного режима преобразования (блок ввода и вывода) возможна рекуперация энергии двигателя в сеть переменного тока. Это происходит в режимах торможения и реверса электродвигателя. Если используется одноквadrантный режим преобразования (блок ввода), для торможения электродвигателя предусматривается тормозной модуль в виде транзисторного ключа и тормозного резистора, подключенных к сети постоянного напряжения. Происходит рекуперация энергии двигателя через инвертор в сеть постоянного тока и «гашение» ее на тормозном резисторе.

Аналогично выполняются преобразователи частоты фирмы АВВ. В рамках концепции ACS 600 MultiDrive [56] разработана единая система управления приводами с общей питающей шиной постоянного тока для широкого диапазона мощностей, позволяющая снизить расходы на настройку и обеспечивающая максимальные эффективность и экономичность при ее использовании. Система имеет возможность расширения благодаря объединению с другими системами управления — от простых до охватывающих все предприятие. Для управления большими системами электроприводов возможно применение распределенной системы управления. Для ее координации используются дополнительные контроллеры и взаимодействующие локальные шины. Также имеются в наличии

приложения к системе в виде программного обеспечения (программные пакеты Alvabuild for Windows, DriveLink, DriveWindow, DriveSupport) для снижения инжиниринговых затрат в зависимости от требований, предъявляемых к системе управления.

Система имеет модульную конструкцию с общей питающей шиной постоянного тока. В базовую конфигурацию входят следующие модули.

*Входной модуль.* Через этот модуль к системе подводится трехфазное питающее напряжение. В модуль может быть встроен диодный или тиристорный питающий выпрямитель мощностью до 525 кВ·А. В зависимости от требований по мощности во входном модуле устанавливается контактор или воздушный выключатель. Базовую конфигурацию модуля составляют главный выключатель, плавкие предохранители, контактор или воздушный выключатель.

*Модуль диодного трехфазного выпрямителя.* Этот модуль используется в нерекуперативных системах электроприводов для преобразования трехфазного переменного напряжения в постоянное. Для снижения вредного влияния высших гармоник на качество питающего напряжения применяют двенадцатипульсную схему выпрямителя. Она может быть построена из двух шестипульсных выпрямителей, питающихся от общего трехобмоточного трансформатора с двумя вторичными обмотками, сдвинутыми на 30 электрических градусов. Чтобы предотвратить чрезмерный рост среднего значения выпрямленного напряжения при групповом торможении, устанавливается блок тормозных резисторов. Базовая конфигурация состоит из шестипульсного диодного моста со сглаживающим реактором постоянного тока, платы контроллера для управления одним шестипульсным диодным мостом.

*Шинная структура.* Питание от общей шины постоянного тока позволяет осуществлять торможение от двигателя к двигателю без использования тормозного инвертора или рекуперативного модуля. Стандартно используются плоские алюминиевые шины.

*Модули приводов.* Каждый инвертор имеет модуль управления приводом, который содержит контроллер и стандартную плату ввода и вывода. Инверторы имеют встроенные конденсаторы для сглаживания напряжения питающей шины постоянного тока. Электрическое соединение с питающей шиной постоянного тока защищено плавкими предохранителями. Базовая конфигурация состоит из модуля инвертора с IGBT-транзисторами, контроллера двигателя и вспомогательного контроллера, модулей ввода и вывода, выходного фильтра.

*Вспомогательный модуль управления.* Этот модуль подает напряжение на вспомогательное оборудование, например вентиляторы шкафов электрооборудования, контакторы и реле в секциях приводов, модули подачи питания и управления. В нем также

могут быть расположены необходимые приборы (амперметры, вольтметры) и аппаратура сигнализации неисправностей. Базовая конфигурация состоит из вспомогательного питающего трансформатора (трансформатор собственных нужд), источника напряжения 24 В постоянного тока.

Аналогично выполняются преобразователи частоты других фирм [38, 52]. На рис. 2.3 показаны схемы ПЧ, объединяющие основные силовые модули. Первая схема (см. рис. 2.3, а) обеспечивает в тормозных режимах электродвигателя рекуперацию энергии торможения в сеть переменного напряжения. Для согласования напряжений автономного инвертора и сети применяется повышающий автотрансформатор. В силовом блоке ввода может использоваться неуправляемая группа выпрямителя, если не ставится задача ограничения тока заряда конденсатора при включении ПЧ.

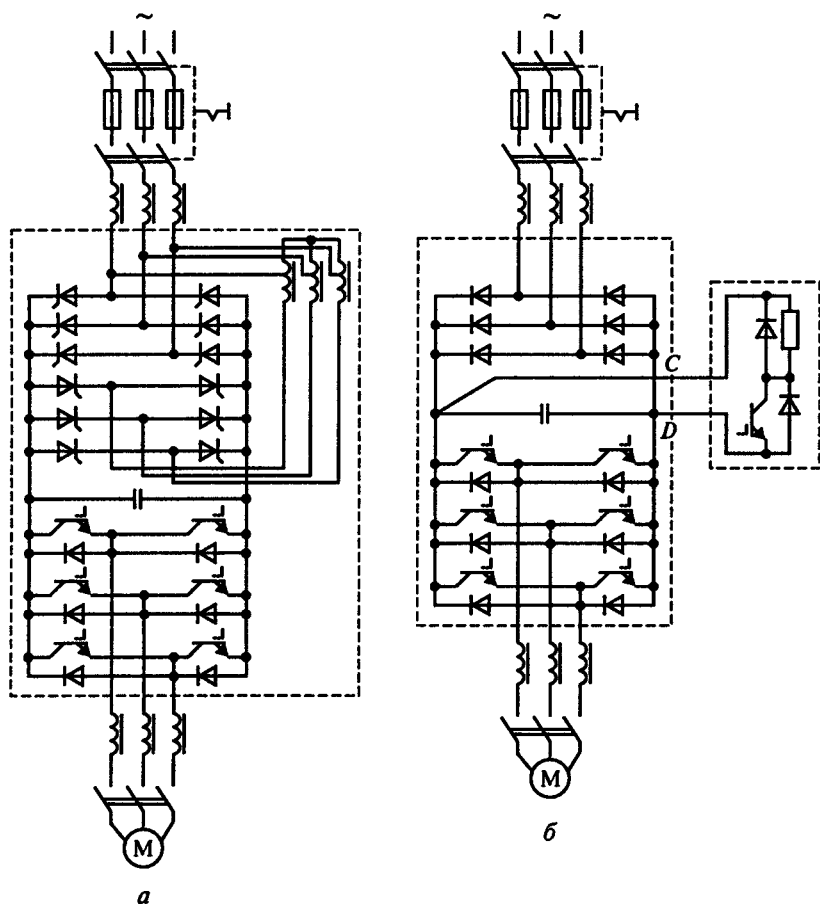


Рис. 2.3



Таблица 2.1

Характеристика работы	Значение параметров и описание характеристики и функций
Способ управления	Мягкое ШИМ-управление (векторное регулирование или по характеристике $U/f$ )
Диапазон выходных частот	0,2 ... 400 Гц
Диапазон регулирования частоты на входе: аналоговом	0,015 Гц (вход 2: двенадцатибитный АЦП для напряжения 0 ... 10 В, одиннадцатибитный АЦП для напряжения 0 ... 5 В; вход 1: двенадцатибитный АЦП для напряжения -10 ... +10 В, одиннадцатибитный АЦП для напряжения -5 ... +5 В)
цифровом	0,01 Гц
Точность выходной частоты	$\pm 0,2$ % максимальной выходной частоты при температуре окружающей среды ( $25 \pm 10$ )°С для аналогового входа; 0,01 % для задания с пульта
$U/f$ -характеристика	Установка номинальной частоты от 0 до 400 Гц с постоянным или переменным моментом
Стартовый момент	150 % на частоте 0,5 Гц (для векторного управления)
Стартовое напряжение	Регулируется вручную
Время разгона и торможения	0 ... 3600 с (задаются отдельно)
Параметры торможения постоянным током:	
рабочая частота	0 ... 120 Гц
время	0 ... 10 с
напряжение	(0 ... 0,3) $U_{ном}$
Уровень токоограничения	0 ... 200 %
<i>Функции управления</i>	
Сигнал задания частоты на входе:	
аналоговом	0 ... 5 В; 0 ... 10 В; 0 ... $\pm 10$ В; 4 ... 20 мА
цифровом	Двенадцатибитный код (при использовании опции FR-F5AX)
Стартовый сигнал	Команды вращения в прямом и обратном направлениях

Характеристика работы	Значение параметров и описание характеристики и функций
<p>Характеристика входных сигналов:</p> <p>выбор уставок скорости</p> <p>установка второго времени разгона и торможения</p> <p>выбор JOG-режима (пошаговой работы)</p> <p>выбор токового режима</p> <p>отключение сброс</p> <p>встроенные функции</p>	<p>15 уставок (каждая скорость между частотами 0 и 400 Гц). Скорость вращения изменяют в процессе работы с пульта управления 0,04; 01 ... 3600 с (время разгона и торможения задают раздельно)</p> <p>Обеспечивается при подаче сигнала на соответствующий вход<sup>1</sup></p> <p>Входной задающий сигнал — ток 4... 20 мА</p> <p>Выходы преобразователя отключают</p> <p>Осуществляется сброс функций защиты</p> <p>Токоограничение, минимальное и максимальное ограничения частоты, JOG-режим, задание наклона характеристики <math>U/f</math>, защита двигателя от перегрузки, автоматический запуск после отключения питания, торможение при отключении питания, самонастройка на двигатель, самоподстройка параметров в работе, компенсация скольжения, выбор способа управления, ПИД-регулирование, программное управление, связь с компьютером (RS-485)</p>
<p>Характеристика выходных сигналов:</p> <p>состояние преобразователя</p>	<p>На пять выводов подаются сигналы: о работе двигателя; достижении заданной скорости; отключении питания (понижении напряжения); превышении контрольной скорости (первой, второй и третьей); работе в режиме программного управления; режиме управления с пульта, срабатывании защиты по перегрузке; предаварийном состоянии в режиме генераторного торможения; предаварийном состоянии защиты от перегрузки по току; недопустимом уменьшении тока; превышении контрольного тока; достижении нижней границы параметра при ПИД-регулировании; достижении верхней границы параметра при ПИД-регулировании; направлении вращения при ПИД-регулировании; отключении магнитных пускателей МС1, 2, 3; готовности к работе; запросе включения тормоза; неисправности вентилятора и предаварийном состоянии по перегреву</p>

Характеристика работы	Значение параметров и описание характеристики и функций
<p>сигнализация</p> <p>измерения</p>	<p>Пара «сухих» контактов (230 В переменного тока 0,3 А или 30 В постоянного тока 0,3 А), четырехбитный код сбоя (открытый коллектор)</p> <p>Для индикации на внешнем приборе могут быть выбраны сигналы: выходная частота, ток двигателя (средний или пиковый), выходное напряжение, заданная частота, выходная частота, момент, напряжение в звене постоянного тока (среднее или пиковое), статус генераторного торможения, статус защиты от токовой перегрузки, входная мощность, выходная мощность, нагрузка и ток намагничивания двигателя. Подключение аналогового измерителя со шкалой 0... 10 В или цифрового частотомера (1440 Гц полной шкалы)</p> <p style="text-align: center;"><i>Индикация</i></p>
<p>Пульт FR-DU04/PU04: рабочие значения</p>	<p>Выходная частота, ток двигателя (средний или пиковый), выходное напряжение, заданная частота, момент, перегрузка, напряжение в звене постоянного тока (среднее или пиковое), статус защиты от токовой перегрузки, входная мощность, выходная мощность, ток намагничивания двигателя, общее время наработки, время наработки на двигатель, счетчик энергии, статус генераторного торможения и нагрузки</p>
<p>сообщения защиты</p>	<p>При срабатывании защиты выводится соответствующее сообщение, восемь последних сообщений защит запоминаются (четыре последних — иницируются)</p>
<p>Дополнительная индикация (только FR-PU04): рабочие значения условия срабатывания защиты</p> <p>интерактивные функции</p>	<p>Статус входов, выходов, опций</p> <p>Выходные напряжение, ток, частота, общее время наработки в момент срабатывания защиты</p> <p>Помощь при настройке</p>

Характеристика работы	Значение параметров и описание характеристики и функций
Защитные функции	Защита от токовой перегрузки (во время разгона и торможения и с постоянной скоростью), превышения напряжения в генераторном режиме и понижении напряжения питания, электронная защита от токовой перегрузки, неисправности тормозного транзистора, замыкания на землю, КЗ на выходе, перегревания, тормозного транзистора, останова (опрокидывания) двигателя, неисправности вентилятора, неисправности опций, ненадежного соединения с пультом, ошибок параметрирования
<i>Условия эксплуатации</i>	
Температура окружающей среды	-10... +50 °С (без замерзания) или -10... +40 °С при использовании опции FR-A5CV (степень защиты IP40)
Влажность	Ниже 90 % (без конденсата)
Температура хранения	-20... +65 °С
Воздушная среда	Закрытое помещение без агрессивных газов, паров бензина и пыли
Высота над уровнем моря и амплитуда вибраций	Максимальная 1000 м над уровнем моря, не более 5,9 м/с <sup>2</sup> (0,6g)

<sup>1</sup> JOG-операции также могут осуществляться от пульта.

Вторая схема (см. рис. 2.3, б) включает в себя тормозной модуль для управляемого гашения энергии торможения на резисторе. Преобразователь ПЧ совместно с модулями управления, характеристики которых даны далее, представляется на рисунках книги как блок управления (БУ) приводом. Свойства такого БУ довольно разнообразны. Рассмотрим перечень свойств преобразователей FR-A500 фирмы Mitsubishi electric [52]. Основные параметры преобразователей приведены в табл. 2.1.

При использовании многодвигательных систем электропривода с групповым источником питания применяются один входной силовой модуль (выпрямитель) и несколько выходных модулей (инверторов). Энергия торможения одного из двигателей может передаваться по сети постоянного напряжения на другие, нетормозящиеся двигатели. В этом случае тормозной резистивный модуль можно

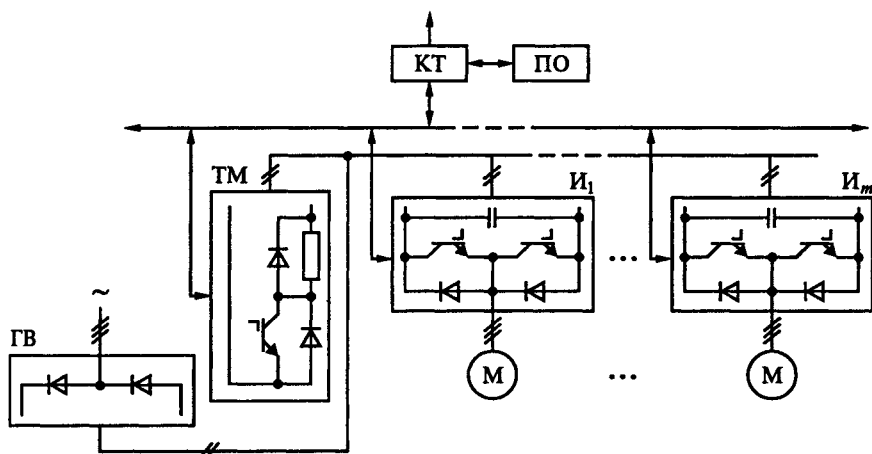


Рис. 2.4

не использовать. В случае группового торможения электродвигателей такой модуль необходим.

Схема многодвигательного автоматизированного электропривода с групповым выпрямителем показана на рис. 2.4, где ГВ — групповой выпрямитель;  $I_1 \dots I_m$  — инверторы; ТМ — тормозной модуль. Все силовые модули управляются от контроллеров приводов. Координацию работы модулей выполняет КТ.

### 2.2.2. Электроприводы постоянного тока

Проекты нового технологического оборудования выполняются с использованием систем автоматизированных электроприводов переменного тока. Доля электроприводов постоянного тока в таких проектах незначительна. Иное положение в проектах модернизации действующего оборудования. В базовых отраслях промышленности РФ (металлургической, машиностроительной, целлюлозно-бумажной и др.) действующее оборудование оснащено в основном регулируемым электроприводом постоянного тока с устаревшими средствами и системами управления, а зачастую и с высоким уровнем энергозатрат в технологическом процессе с глубоким регулированием скорости.

Проекты модернизации действующего оборудования в части автоматизированных электроприводов выполняются в следующих основных четырех вариантах.

1. Замена аналоговых и релейно-контактных систем управления на цифровые с использованием промышленных компьютеров, технологических контроллеров, логических контроллеров, интеллектуальных модулей периферии и других устройств, соответствующих нижнему и среднему уровню автоматизации.

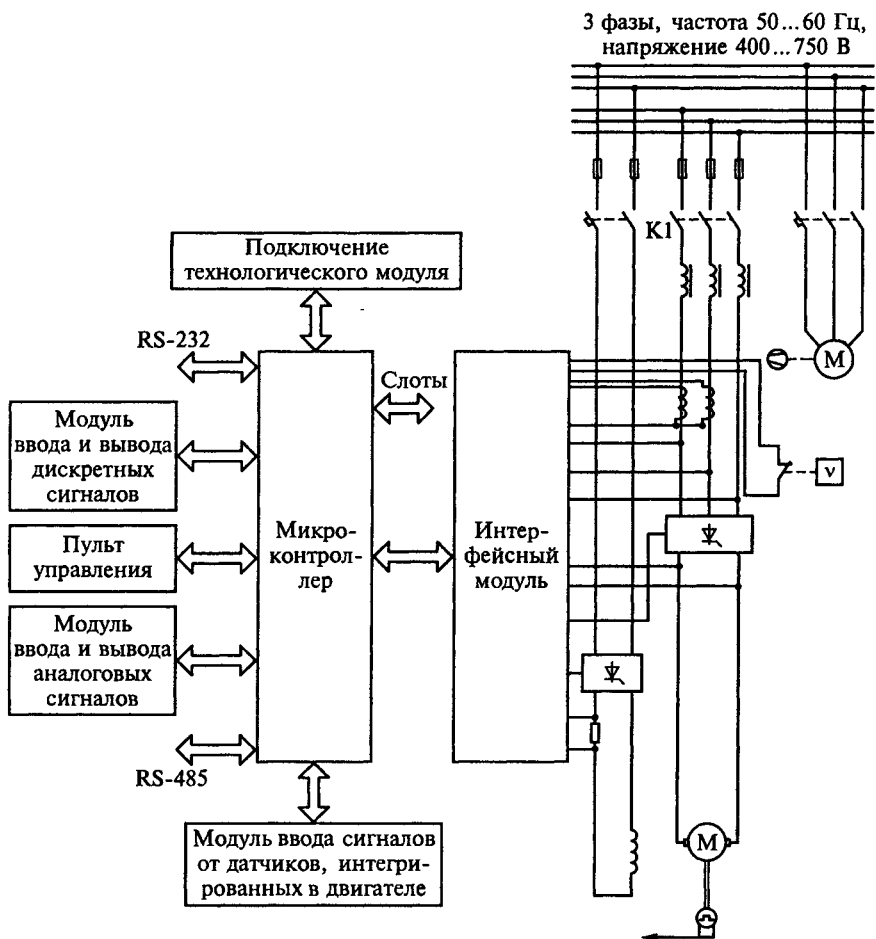


Рис. 2.5

2. Вариант 1, дополненный заменой аналоговых блоков управления комплектных электроприводов постоянного тока на цифровые с использованием контроллеров привода.

3. Вариант 2, дополненный заменой силовых блоков комплектных электроприводов. Электродвигатели и сети электропитания остаются неизменными.

4. Полная модернизация автоматизированных электроприводов. Замена электроприводов постоянного тока на электроприводы переменного тока.

Схемы силовых блоков комплектных электроприводов постоянного тока мало меняются на протяжении длительного времени и хорошо освещены в литературе (например [5]). Существенно изменились блоки управления, основой которых как и в электро-

приводах переменного тока является программируемый контроллер. Аналогичным образом реализуются и все функции управления электроприводами.

В состав комплектного электропривода постоянного тока (рис. 2.5) в общем случае входят управляемые выпрямители, обеспечивающие регулирование напряжений якоря и тока обмотки возбуждения. В таком варианте обеспечивается двухзонное управление скоростью электродвигателя.

Силовые выпрямители имеют различные электрические схемы, состоящие из одной, двух или четырех управляемых трехфазных групп, и выполняются из электрически изолированных тиристорных модулей.

Блоки имеют естественное воздушное охлаждение, а блоки рассчитанные на большие мощности, — принудительное воздушное охлаждение (вентилятор или сборку из нескольких вентиляторов).

Контроллер обрабатывает информацию, поступающую от внешних датчиков, реализует функции управления и диагностирования. Уставки и фактические параметры могут быть определены в аналоговой или цифровой форме.

Шкаф электроники содержит аппаратуру электроники и дополнительные платы. Внешние сигналы (бинарные, аналоговые, импульсные и др.) передаются на модули ввода и вывода по кабелям. Экранированные кабели позволяют устанавливать датчики на некотором расстоянии от силового блока электропривода.

Пульт управления состоит из блока индикации (семисегментные индикаторы или жидкокристаллический дисплей), светодиодов для индикации состояния, кнопок для ввода управляющих команд. В состав электропривода также входит выносной пульт управления.

К электроприводу через последовательный интерфейс может быть подключен персональный компьютер, который выполняет следующие функции: доступ к параметрам электропривода; запись и хранение параметров; копирование существующих параметров на другие преобразователи; распечатка параметров; выдача команд (бинарные команды Вкл. и Выкл. и т. д.) и ввод уставок; контроль через слово состояния и считывание фактических величин; чтение сигналов неисправности и системы индикации аварии.

Датчики, интегрированные в двигателе, позволяют контролировать температуру двигателя, воздушный поток, проходящий через вентилятор, состояние подшипников.

Если к выбранному преобразователю необходимо подключить электродвигатель большей мощности, к силовой схеме подключаются дополнительные тиристорные модули.

Для расширения функций к системе управления можно подключать интеллектуальные модули, обеспечивающие управление механизмами для решения различных технологических задач.

## 2.3. Средства управления и программирования электроприводов

Основным средством управления электроприводом является программируемый контроллер, с помощью которого решаются задачи, изложенные в п. 1.1. Имеются базовый модуль контроллера и модули расширения. С помощью базового модуля решаются все задачи управления локальным электроприводом с учетом его функциональной ориентации на заданную область применения. С помощью интеллектуальных модулей расширения решаются задачи последовательного или параллельного управления несколькими электроприводами, позиционирования, синхронизации скоростей и положений, управления технологическими переменными и др.

Рассмотрим реализацию средств управления в комплектных электроприводах с частотным регулированием скорости фирмы «Siemens». В зависимости от схемы управляемого преобразователя частоты и задач управления приводом базовые модули контроллеров совместно с периферийными устройствами могут иметь разнообразные схемы. На рис. 2.6 показана схема одного из вариантов контроллера.

Через разъем X300 подключается кабель дистанционного пульта управления одним или несколькими приводами. Пульт может быть удален от блока на 100... 300 м.

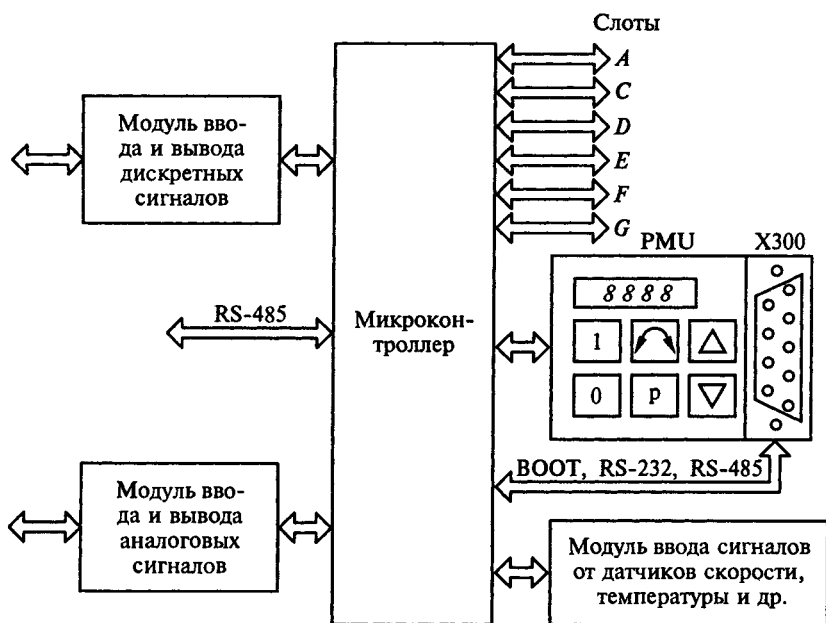


Рис. 2.6



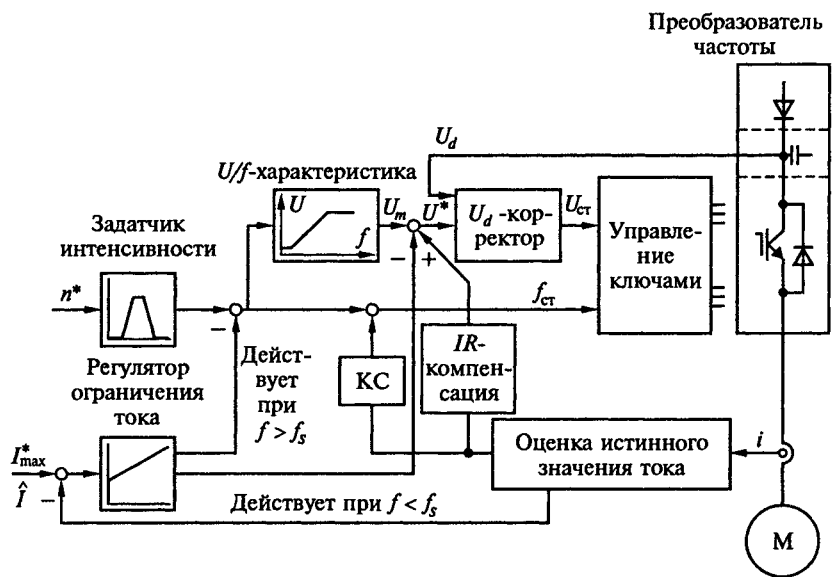


Рис. 2.7

Информация с датчиков поступает в контроллер через AS-интерфейс. Частотное управление электродвигателями осуществляется двумя основными способами:

по функциональной характеристике, связывающей напряжение и частоту статора электродвигателя ( $U/f$ -характеристике); применяется для электроприводов, в которых отсутствуют особые требования к динамике;

векторным; применяется для электроприводов со средней и высокой динамиками.

Теоретические аспекты этих способов управления рассматриваются в работе [22]. Каждый из них адаптирован к частным случаям с помощью функциональных модулей, влияющих на статические и динамические характеристики электроприводов.

На рис. 2.7... 2.10 приведены функциональные схемы систем управления электроприводами, в которых использованы описанные способы (символом «\*» обозначены заданные значения переменных, символом «^» — оценки значений переменных).

Все модули функциональных схем реализуются программно на контроллере привода. В соответствии с этим имеется набор типовых программных модулей и программ связки модулей, обеспечивающих реализацию нужной системы управления.

Управление по  $U/f$ -характеристике реализовано в системах управления одним или несколькими асинхронными электродвигателями (см. рис. 2.7 и 2.8). Наиболее простой является система управления, в которой отсутствуют датчики скорости (см. рис. 2.7).

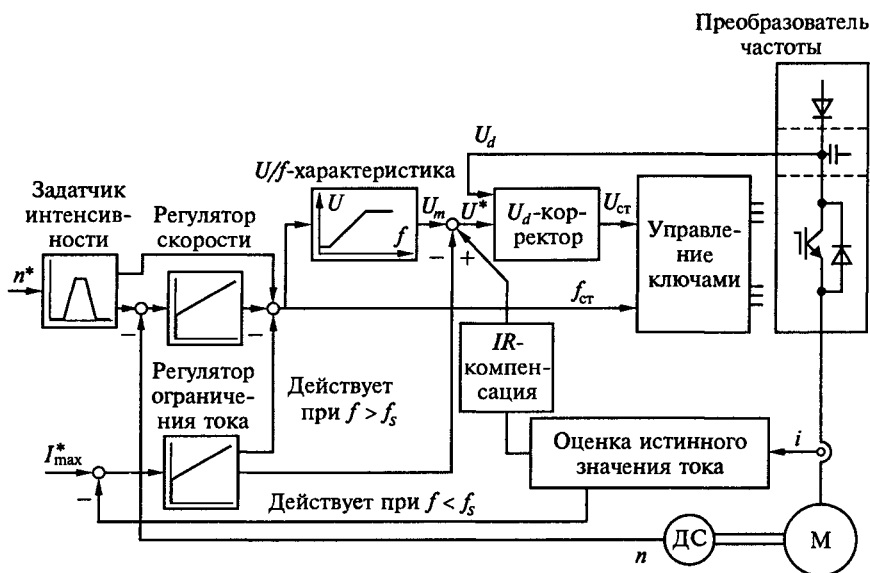


Рис. 2.8

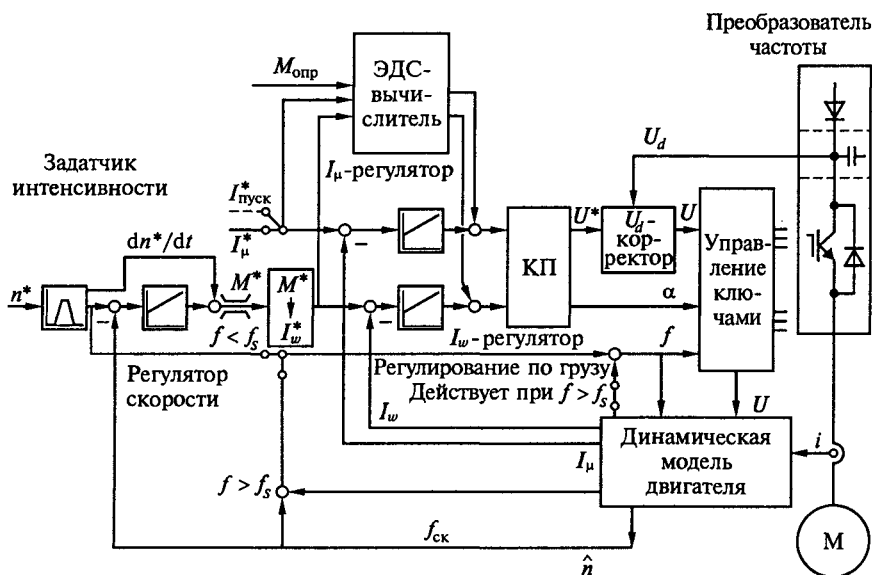


Рис. 2.9

Она применяется в приводах насосов, вентиляторов, в транспортных средствах при ограниченном диапазоне регулирования скорости (до 1:10).

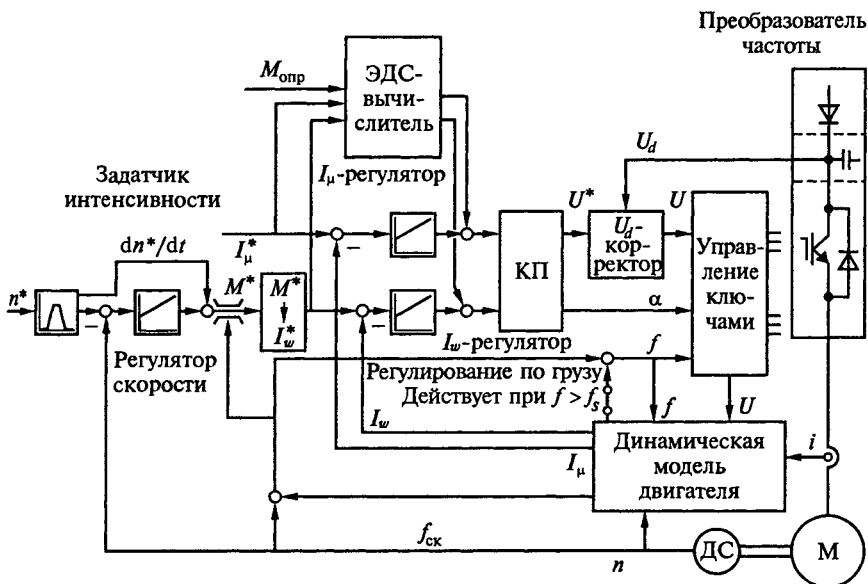


Рис. 2.10

Для поддержания постоянства потокосцепления статора в соответствии с  $U/f$ -характеристикой применяются модули  $IR$ -компенсации и  $U_f$ -коррекции. Повышение «жесткости» механической характеристики электропривода при изменении нагрузки достигается с помощью модуля компенсации скольжения (КС).

В системе предусматриваются регулирование тока ограничения в соответствии с заданным значением  $I_{\max}^*$  воздействием на напряжение или частоту статора и выбор  $U/f$ -характеристики, соответствующей управлению механизмами, имеющими постоянную или вентиляторную нагрузку. Имеется защита от «опрокидывания» привода в случае превышения момента нагрузки выше критического значения.

Для высокоскоростных электроприводов оборудования текстильного производства применяется система управления, аналогичная приведенной на рис. 2.7, но без модуля КС, ток ограничения регулируется воздействием на напряжение статора.

Для электроприводов механизмов, в которых диапазон регулирования скорости больше 1:10, применяются системы регулирования с датчиками и регуляторами скорости (см. рис. 2.8).

В качестве датчиков скорости используют аналоговые или импульсные датчики. Во втором случае применяются датчики с двумя каналами импульсов, имеющих фазовый сдвиг  $90^\circ$ .

Векторное управление реализовано в системах управления асинхронными электродвигателями, функциональные схемы которых показаны на рис. 2.9 и 2.10. В них предусматривается возможность

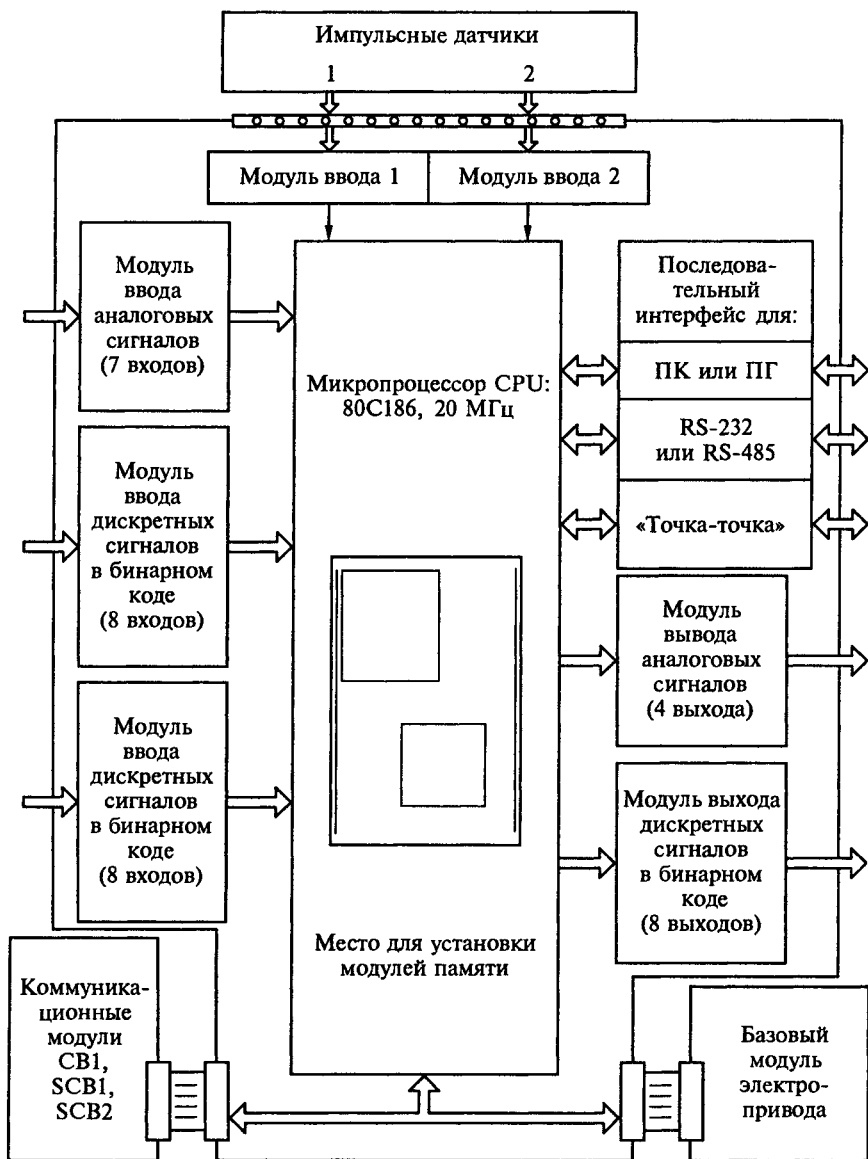


Рис. 2.11

управления одно- и многодвигательными электроприводами, в том числе электроприводами, взаимосвязанными механически по нагрузке. Динамические характеристики таких электроприводов аналогичны динамическим характеристикам электроприводов постоянного тока. Достигается это управлением составляющими  $I_w$  и

$I_d$  вектора тока, первая из которых пропорциональна моменту двигателя, а вторая — потокосцеплению. Величины  $I_w$  и  $I_d$  оцениваются по динамической модели двигателя, составленной представлением мгновенных значений переменных в виде результирующих векторов и переходом к вращающимся системам координат. В системе предусматривается возможность ограничивать момент двигателя в соответствии с заданным значением и управлять интенсивностью изменения момента.

Вариант векторного управления электропривода без датчика скорости применяется в производственных механизмах при диапазоне регулирования скорости, не превышающем 1:10 (например в экструдерах и вентиляторах большой мощности, в транспортных и подъемных механизмах, центрифугах).

В механизмах с большим диапазоном регулирования скорости применяется система управления с датчиком скорости (см. рис. 2.10).

Функциональные возможности базового модуля контроллера могут расширяться подключением интеллектуальных модулей технологической группы T100... T300. С помощью этих модулей решаются следующие задачи:

реализации П-, ПИ-, И-, ПД-, ПИД-регуляторов (регуляторов усилия, натяжения, подачи, давления, температуры и других технологических переменных);

задания требуемых режимов пуска приводов в соответствии с управляющей командой;

синхронизированного управления электроприводами;

реализации двух быстрых последовательных интерфейсов со скоростью передачи данных до 187,5 кбод, позволяющих выполнять каскадное управление группами комплектных электроприводов и осуществлять связь с сетью технологического уровня, с технологическим контроллером и (или) промышленным компьютером;

наблюдения за важными сигналами (параметрами) по индикатору параметров (функция мультиметрии).

На рис. 2.11 показаны аппаратные средства модуля T300.

Некоторые функции управления, которые наиболее часто встречаются в технологических агрегатах, автоматизируемых средствами электроприводов, запрограммированы в модулях памяти группы T100... T300 в виде стандартных программных модулей. Пользователю предоставляется возможность реализации специальных решений, соответствующих частным технологическим задачам. Выполнить это можно при помощи графического языка проектирования STRUC.

Информация обрабатывается процессором циклически. Время цикла минимум 1 мс. Программные и аппаратные компоненты модуля T300 представлены на рис. 2.12. Параллельный интерфейс не имеет задержек (ОЗУ двойного доступа) и позволяет осуществить

## Модули проектирования

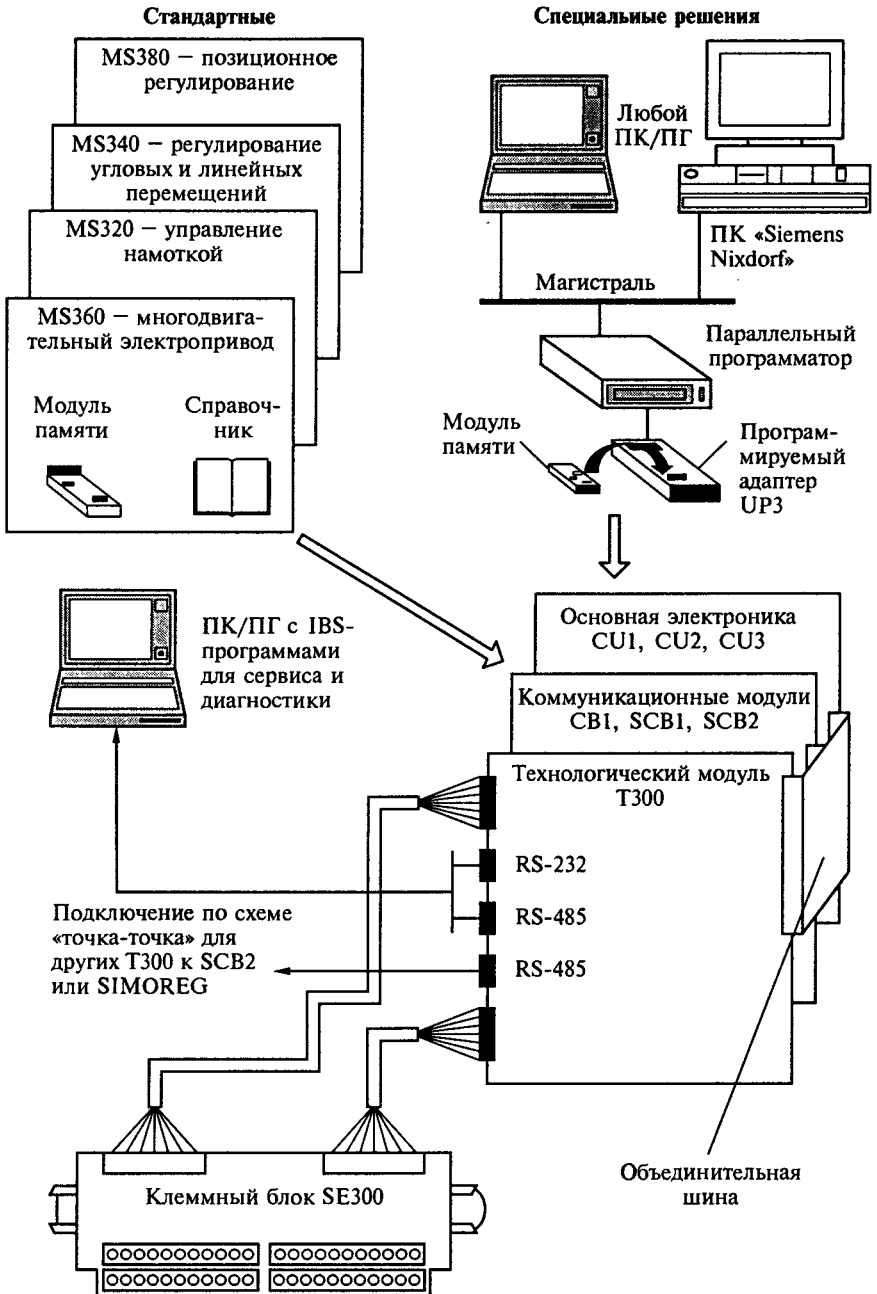


Рис. 2.12

быстрый обмен данными между Т300 и базовым модулем контроллера.

В частотно-регулируемых электроприводах фирмы АВВ используется технология прямого управления моментами (технология DTC). Она позволяет управлять двигателем без импульсного датчика скорости. В результате применения мощного цифрового сигнального процессора система быстро реагирует на изменения нагрузки, меняя момент на валу двигателя, чем повышается качество управления.

На рис. 2.13 показана функциональная схема системы управления электроприводом.

Основные модули схемы:

1 — регулирования в скользящем режиме вектора потокосцепления статора  $\Psi_s$  и момента  $M$  двигателя по значениям, вводимым в него заданных и действительных величин;

2 — модель АД, в которой через каждые 25 мкс осуществляется вычисление потока статора и момента по введенной в нее информации: токам двух фаз статора АД, напряжению цепи постоянного тока и положению ключей АИН; производится вычисление скорости АД и частоты выходного тока АИН. Таким образом, модель АД осуществляет организацию обратных связей

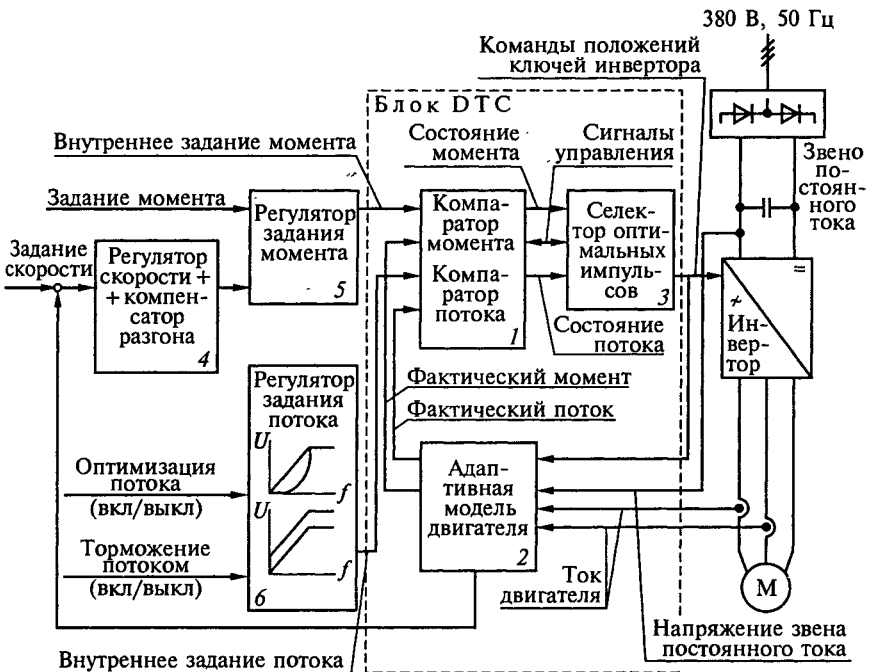


Рис. 2.13

по регулируемым переменным в системе автоматического регулирования;

3 — быстродействующего логического автомата, переключающего ключи автономного инвертора в зависимости от оптимизации вектора выходного напряжения АИН по предельным отклонениям момента и потока статора. Таким образом, организация ШИМ-управления осуществляется как функция заданных переменных электромагнитного состояния АД. Отметим также объединение задач ШИМ-управления и регулирование момента, при котором отсутствует программное ШИМ-управление;

4 — регулятора скорости;

5 — задания и ограничения момента;

6 — задания потока статора.

Электромагнитный момент АД

$$M = p_n \frac{1 - \sigma}{\sigma L_m} \bar{\Psi}_r \bar{\Psi}_s, \quad (2.1)$$

где  $p_n$  — число пар полюсов АД;  $\sigma$  — коэффициент рассеяния;  $L_m$  — индуктивность намагничивания;  $\bar{\Psi}_r$ ,  $\bar{\Psi}_s$  — векторы потока соответственно ротора и статора.

Асинхронный двигатель представляет собой динамическую систему, фазовое состояние которой характеризуется вектором потокосцепления ротора. Поэтому оптимальное управление АД осуществляется при  $\bar{\Psi}_r = \text{const}$  изменением угла между векторами  $\bar{\Psi}_r$  и  $\bar{\Psi}_s$  или изменением  $\bar{\Psi}_s$  (в специальных режимах работы АД с целью минимизации потерь либо работы с ослаблением поля). Постоянная времени ротора АД, как правило, больше 100 мс, поэтому быстрые процессы регулирования мало влияют на значение потока ротора. Модель двигателя является важнейшим элементом системы ДТС; ее точность определяет выходные характеристики электропривода. Идентичность параметров АД и модели достигается идентификационными режимами работы в процессе ввода электропривода в промышленную эксплуатацию. Основными параметрами, идентифицируемыми в этом режиме, являются: индуктивности статора  $L_s$  и цепи намагничивания  $L_m$ , сопротивление статора  $R_s$ . Учитывается и насыщение магнитной цепи. Расчетная модель АД также учитывает нагревание машины и падение напряжения (омическое и коммутационное) в АИН при определении потока статора. В течение каждого цикла управления (25 мкс) определяется вектор  $\bar{\Psi}_s$  потока статора:

$$\bar{\Psi}_s = \int (\bar{U}_s - R_s \bar{i}_s) dt, \quad (2.2)$$

где  $\bar{U}_s$ ,  $\bar{i}_s$  — векторы соответственно напряжения и тока статора.



Вектор напряжения  $\bar{U}_s$  определяется на основе действительно-го (измеренного) напряжения звена постоянного напряжения ПЧ и реального положения ключей АИН.

Точность расчета вектора  $\bar{\Psi}_s$  корректируется на основе действительных (измеренных) значений токов:

$$\bar{\Psi}_s = L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r, \quad (2.3)$$

где  $L_s$  — индуктивность статора;  $L_m$  — индуктивность намагничивания;  $\bar{i}_s$ ,  $\bar{i}_r$  — векторы токов соответственно статора и ротора.

При этом вектор тока статора определяется по токам двух фаз, а вектор тока ротора рассчитывается.

С учетом динамических характеристик звена регулирования момента ДТС регулятор скорости синтезируется как ПИД-регулятор, чем достигается высокое быстродействие по контуру скорости и статическая точность регулирования. Выход регулятора скорости включен каскадно с устройством задания и ограничения момента. Это устройство обеспечивает: ограничение момента двигателя, защиту АИН от токовых перегрузок (эта защита имеет временно-токовую характеристику), поддержание напряжения в звене постоянного напряжения. Оно имеет также вход для задания независимой (от регулятора скорости) уставки момента. Функционально регулятор скорости включает (кроме ПИД-регулятора) модуль ускорения для задания темпа разгона и торможения. В процессе ввода электропривода в эксплуатацию в режиме идентификации осуществляется настройка регулятора на электромеханическую постоянную времени. При реализации обратной связи по скорости с выхода модуля 2 (см. рис. 2.13) статическая точность достигается на уровне 0,1... 0,5 %. Для получения более высокого значения этой характеристики электропривода организуется обратная связь с помощью датчика скорости. В этом случае достигается точность до 0,01 %. Система регулирования снабжена устройством независимого задания потока статора АД. Это позволяет реализовать САР с ослаблением потока или заданием потока как функции минимизации потерь и увеличения общего КПД электропривода. Так, при снижении потока статора в режиме малых нагрузок потери могут быть снижены более чем на 60 %. Таким образом, устройство позволяет учитывать характер нагрузки (например вентиляторная характеристика) при настройке САР. Имеется также блок задания частоты переключения ключей АИН. Этот параметр может регулироваться (в зависимости от типа полупроводникового прибора АИН) от 0,8 кГц (для запираемых тиристоров) до 3,5 кГц (для силовых транзисторов разного типа).

Фазное напряжение асинхронного двигателя формируется переключением трех IGBT-транзисторов между положительным и отрицательным полюсами постоянного напряжения. Система ДТС

отдельно определяет момент каждого переключения в зависимости от текущих значений потока и момента. Текущие значения потока и момента каждые 25 мкс вычисляются на основе информации о токе и напряжении двигателя в адаптивной модели двигателя. Затем они сравниваются со значениями тока и момента, задаваемыми контроллером, что служит информацией для подачи системой управления переключающих импульсов. Таким образом, не существует фиксированной частоты переключений, в результате чего шумовой спектр не содержит пиков высокой частоты и двигатель имеет низкий уровень шума.

Для распределенного управления большими системами электроприводов используются контроллеры управления приводами APC2. Один контроллер APC2 может управлять восемью приводами. Объединение APC2 в таких системах производится с помощью шины Fieldbus 100. Возможны также платы связи с системами управления верхнего уровня. Небольшие системы электроприводов могут содержать только одну плату APC2.

Аналогичная идеология построения частотно-регулируемых электроприводов заложена в изделия отечественной фирмы «Триол» [38].

## **2.4. Настройка и диагностирование параметров автоматизированных электроприводов**

В комплектных электроприводах реализуется гибкая система настройки и диагностирования для конкретного объекта и технологического процесса при наладке и работе на производственном объекте. Эта система предусматривает следующее.

1. Настройку привода в полном объеме с местного, дистанционного пульта или с ПК с помощью коррекции соответствующих параметров, сведенных в функциональные группы.

2. Постоянное отслеживание приводом до  $n$  различных заданий (задание ручного режима с пульта, задание автоматического режима с пульта и т.д.), только одно из которых может быть текущим (активным). При этом гибко реализуется система выбора одного из заданий в качестве активного с соответствующим изменением режима (ручной или автоматический) с местного или дистанционного пульта с помощью специальной процедуры или коррекции параметров, обеспечивающих выбор режима или задания. Выбор режима работы электропривода возможен по сети с ПК путем управления состоянием логических коммутаторов (ЛК), назначенных при настройке привода на управление функциями переключения режима или выбора задатчика без коррекции параметров. Один ЛК может быть настроен на выполнение нескольких функций одновременно. Задание режима возможно также с помо-

шью изменения состояния дискретных входов, назначенных при настройке привода на управление функциями переключения режима или выбора задатчика. Один вход может быть настроен на выполнение нескольких функций одновременно.

3. Гибкую систему установки значения задания, в том числе выбор в качестве задания функции.

4. Гибкую систему выбора одного из двух источников технологического параметра (обратной связи) или режима вычисления значения обратной связи как математической функции значений двух источников.

5. Гибкую систему управления значением обратной связи (источник рассогласования для ПИД-регулятора в автоматическом режиме). Значение обратной связи может быть функцией двух источников.

6. Динамическое изменение темпа разгона и торможения прямым выбором одного из двух заданных при настройке темпов или режима переключения темпов по граничной частоте.

7. Управление выходными реле: функциональное (как функция текущего состояния привода или объекта) с местного, дистанционного пультов или ПК с помощью коррекции соответствующих параметров; безусловное прямое управление свободными от функционального управления реле по сети от ПК занесением позиционного кода (определяющего требуемое состояние всех реле) с маской (определяющей реле, могущие изменить состояние) в назначенный регистр или занесением кодов включения и выключения в регистры, отведенные для каждого реле отдельно.

8. Управление аналоговыми выходами аналогично п. 7 с занесением числового кода в назначенный при коррекции параметров регистр.

9. Управление функцией «Пуск»: аппаратно; по сети от ПК путем управления состоянием специального регистра; местно с помощью изменения состояния дискретного входа, назначенного при настройке привода на управление этой функцией; нажатием кнопки на местном или дистанционном пульте.

10. Управление функцией «Стоп» (см. п. 9).

11. Управление функцией «Реверс» (см. п. 9).

12. Доступность информации о текущих действующих авариях и предупреждениях, об авариях, возникших после последнего пуска (кроме автоматических повторных перезапусков). При использовании местного и дистанционного пультов для этого применяются специальные процедуры (путем просмотра специально введенных информационных параметров). Если применяются сетевые средства, то просматривается информационная группа параметров.

13. Доступность для пользователя полной информации о номере привода (сетевой адрес), состоянии выбранного привода (задание «вперед/назад», текущее состояние «вперед/назад», режим

«ручной/автоматический», готовность, заряд емкости фильтра, ускорение, торможение, установившийся режим, работа ШИМ, торможение постоянным током, норма, предупреждение, авария, допускающая автоматический перезапуск, авария, не допускающая автоматический перезапуск, информация об источнике задания, информация о коррекции параметра). При этом используется статусная строка местного (доступна информация только об одном приводе) или дистанционного пульта (доступна информация о всех приводах, включенных в сеть). При использовании сетевых средств ПК информация доступна постоянно (по умолчанию, без выделения специальной команды) при обмене информацией по сети.

14. Доступность информации о состоянии дискретных и аналоговых входов и выходов. ПК получает информацию о «занятости» соответствующих входов или выходов внутренними функциями привода. Последняя возможность в совокупности с возможностью дистанционно изменять состояние входов или выходов позволяет использовать незадействованные под внутренние функции входы или выходы привода как удаленные, рассредоточенные по производственной территории устройства ввода технологической информации и устройства управления исполнительными механизмами с выходом на сетевой интерфейс по распространенным в промышленности протоколам. ПК имеет возможность построить отдельные контуры регулирования, связанные или не связанные с управлением приводами, подключенными к этой локальной сети.

Реализация пп. 3...6 возможна: с местного или дистанционного пульта с помощью специальной процедуры, позволяющей корректировать значения заданий для ручного режима с пульта или задание для автоматического режима с пульта; по сети с ПК занесением числовых кодов в предусмотренные для этого кодовые регистры, назначенные при настройке привода в качестве соответствующих источников задания; изменением состояния дискретных или аналоговых входов, назначенных при настройке привода в качестве соответствующих источников задания.

Для предупреждения конфликтных и аварийных ситуаций при управлении приводом из двух мест одновременно (например с местного и дистанционного пультов) в комплектном электроприводе предусмотрена группа параметров «Управление», доступ к которой осуществляется по паролю (для каждого пульта или ПК).

**Параметры настройки электропривода.** Для удобства пользователя программируемые (или просматриваемые) параметры настройки электропривода сведены в функциональные группы, например: 0\* — отображаемые величины (например, 00 — характеристика процесса, 01 — напряжение, 02 — токи, мощности и др.); 1\* — уставки, генераторы темпа (например, 10 — задатчик скорости, 12 — первый генератор темпа, 16 — первый комплект

фиксированных уставок и др.); 2\* — характеристики частот (например, 20 —  $U/f$ -характеристика 1 (ступенчатая), 22 —  $U/f$ -характеристика 3 (плавная), 23 — пропуск частотного окна, 25 — выбор  $U/f$ -характеристики и др.); 3\* — параметры двигателя (например, 32 — ручная настройка 1, 34 — ручная настройка 2, 35 — выбор комплекта параметров и др.); 4\* — контрольные сигналы (например, 40 — значение первой опорной частоты, 43 — сравнение заданного и действительного значений и др.); 5\* — функции мониторинга (например, 50 — мониторинг торможения, 51 — мониторинг скорости в двигательном режиме, 53 — мониторинг напряжения сети, 54 — мониторинг двигателя и др.); 6\* — назначение выводов (например, 60 — двоичные выходы; 62 — аналоговые выходы и др.); 7\* — управляющие функции (например, 71 — функция подъемника, 72 — функция быстрого пуска, 73 — торможение постоянным током, 76 — синхронный режим, 77 — регулирование скорости и др.); 8\* — специальные функции (например, 80 — меню параметров, 81 — информация по обслуживанию, 82 — копирование параметров, 85 — замена языка, 87 — ручное управление, 88 — режим «ведущий-ведомый» и др.).

Условия коррекции параметров приведены в виде пиктограмм, индицируемых в статусной строке пульта управления:  $i$  — только индицируемый параметр;  $\diamond$  — корректируемый параметр;  $\times \diamond$  — параметр доступен для коррекции при выключенном преобразователе (при включенном ШИМ индицируется  $i$ , при выключенном  $\diamond$ );  $i \diamond$  — параметр предназначен для просмотра множественных значений в режиме коррекции.

Работа в ручном режиме предполагает прямое задание выходной частоты привода.

Масштабирование аналоговых входов позволяет пользователю настроить привод на необходимый диапазон изменения технологического параметра. Рабочий диапазон датчика калибруется в процентах по желанию пользователя. Единицы измерения технологических параметров не индицируются и имеют по умолчанию размерность %. При управлении технологическими параметрами по протоколу дистанционного управления данные должны передаваться в том же масштабе (приведенные к масштабированным показаниям датчика).

При масштабировании датчиков в параметрах, определяющих критерии их неисправности, за 100 % принимается диапазон изменения значений от 0 мА до максимального значения, а не рабочий диапазон (например, 0 мА = 0 %, 20 мА = 100 %). Такие параметры при индикации выражаются в процентах.

На рис. 2.14 приведена часть меню управления и настройки параметров преобразователя частоты MOVITRAC®31С. Параметры преобразователя MOVITRAC®31С могут быть установлены с по-

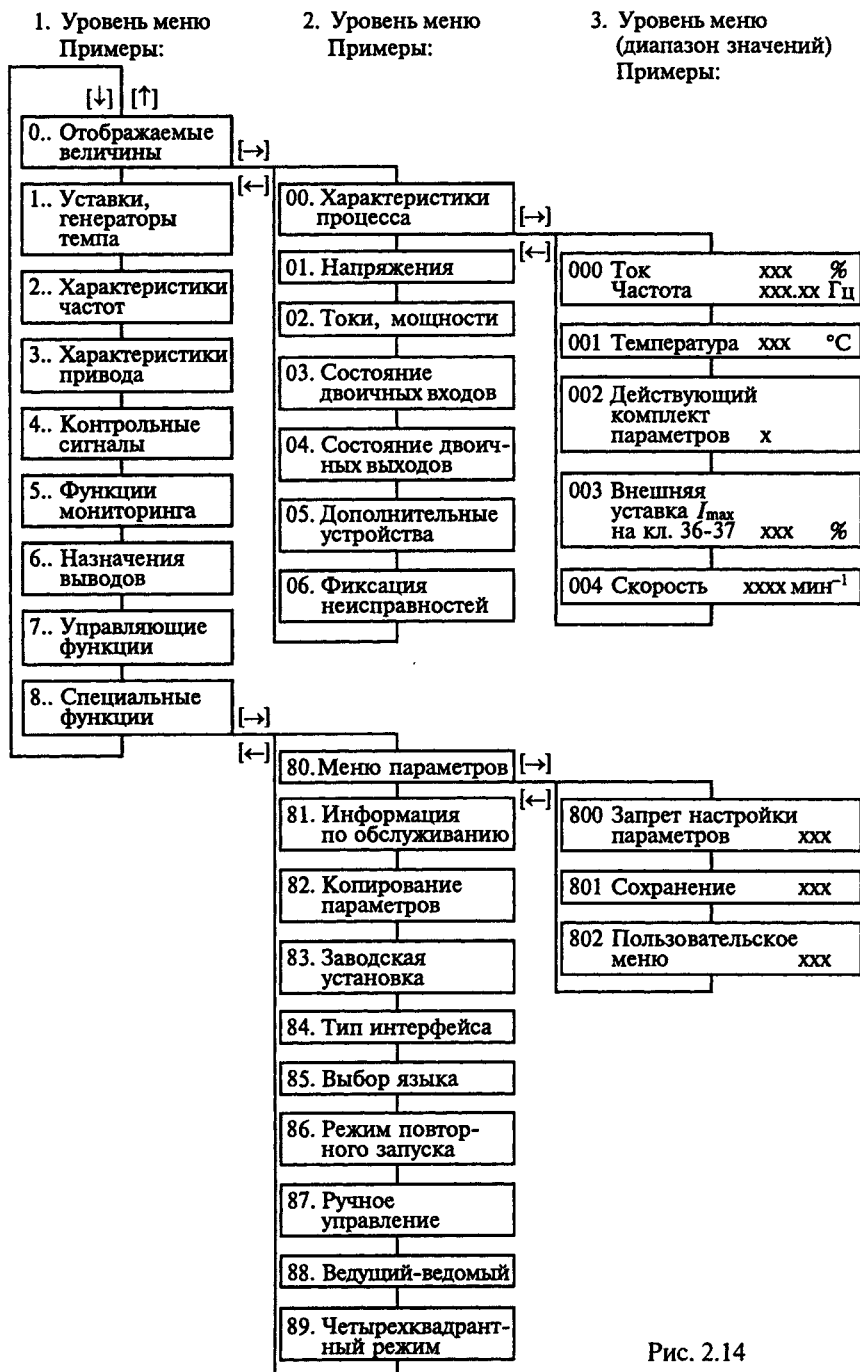


Рис. 2.14

мощью клавишной панели FBG 31С, ПК и программного обеспечения MCSHELL.

**Работа оператора с пультом (местным или дистанционным).** Пульт применяется при наладке привода и оперативном управлении и реализует следующие функции:

- поиск нужного параметра или группы параметров по названию;
- коррекцию выбранного параметра (с индикацией пределов изменения параметра);

- индикацию числовых параметров с единицами измерения, а фиксированных кодов в виде буквенно-цифровых аббревиатур;

- постоянную индикацию текущего состояния привода и признака выбранного режима работы;

- возможность одновременного наблюдения на экране значения параметров (в том числе относящихся к разным приводам, объединенным локальной сетью);

- возможность пользователю создавать и корректировать собственный список параметров из разных групп в нужной последовательности (в том числе относящихся к разным приводам, объединенным локальной сетью), процедура доступа к которым максимально упрощена;

- по желанию пользователя коррекцию параметров, не вошедших в группу пользователя; коррекция состава этой группы может быть защищена паролем;

- поддержание специальной процедуры управления заданием, позволяющей сравнить значения возможных альтернативных заданий и выбрать нужное или начать коррекцию выбранного задания с текущего значения задания;

- поддержание специальной процедуры просмотра наличия текущих и запомненных аварий (с одновременной индикацией до *n* аварий на одном экране);

- в режиме обслуживания нескольких приводов по локальной сети
- поддержание режима мониторинга приводов, объединенных сетью, в соответствии со списком пользователя.

При мониторинге пользователь может одновременно наблюдать за состоянием *n* приводов (наличие связи, аварий, привод остановлен или в работе, готов или не готов, в какую сторону вращается) на одном экране;

- обеспечение коррекции списка приводов для мониторинга, которая может быть защищена паролем по желанию пользователя;

- поддержание процедуры изменения сетевого адреса привода и скорости обмена данными по сети;

- поддержание процедуры установки пароля пользователя и возврат к паролю изготовителя;

- подачу звуковой сигнализации (фиксация нажатия кнопок, наличие аварий), которая может быть выключена по желанию пользователя;

обеспечение программного регулирования яркости экрана. Индикация аварий дублируется светодиодом (для контроля оператором издали).

В современных комплектных электроприводах реализуется функция технического диагностирования на стадиях настройки и рабочего функционирования. Анализ принципов функционирования диагностических систем позволяет выделить основные функциональные блоки большинства таких систем [4]. Типовая структурная схема процесса диагностирования приведена на рис. 2.15.

Обычно в качестве детерминированных моделей тестовых (испытательных) сигналов используются следующие математические представления: импульс  $\delta$ ; функция включения (скачок)  $\sigma(t) = 1(t)$ ; треугольный импульс; последовательность прямоугольных импульсов, гармонические функции  $\sin \omega t$ ,  $\cos \omega t$ ; экспоненциальная функция  $e^{\alpha t}$  и др. Наличие блока формирования тестовых сигналов определяется возможностью проводить диагностирование объекта в режиме периодического регламентного контроля, когда допускается подача на объект специально сформированных испытательных сигналов заданной формы и значения. Однако, когда диагностирование объекта проводится в режиме его нормального функционирования, подача тестовых сигналов на вход объекта исключена или существенно ограничена.

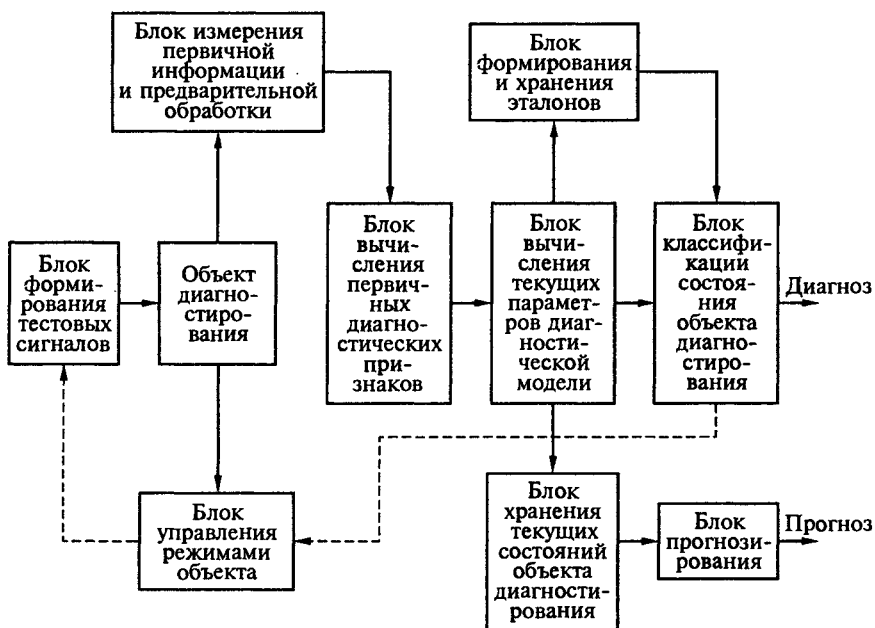


Рис. 2.15



Временные сигналы, снимаемые с первичных преобразователей (датчиков), мало пригодны для диагностирования, во-первых, из-за большого уровня помех, сопровождающих функционирование большинства объектов и, во-вторых, из-за наличия в этих сигналах избыточной информации, характеризующей работу отдельных узлов объекта диагностирования и их взаимодействия. Поэтому в первую очередь выделяют полезный сигнал, как правило, традиционными методами фильтрации, детектирования. При этом возможна дополнительная предварительная обработка сигнала с применением методов частотной и временной селекции, с использованием априорной и апостериорной статистики и других достаточно известных способов извлечения информации [4].

Блок вычисления диагностических признаков состояния исследуемого объекта в соответствии с алгоритмами преобразования информации, используемыми в конкретной системе диагностирования, выполняет роль формирователя компонентов вектора диагностических признаков. Такими компонентами могут быть, например, определенные составляющие частотного спектра сигнала. Во многих случаях подобных диагностических признаков оказывается достаточно для принятия решения о состоянии объекта. Но иногда эти первичные признаки оказываются малочувствительными к небольшим вариациям состояния объекта и, следовательно, не могут быть использованы для выявления дефектов объекта на стадии их зарождения. В этих случаях возникает необходимость дополнительных вычислений с целью получения вторичных диагностических признаков, которые являются информативными параметрами диагностической модели, характеризующими текущее состояние диагностируемого объекта.

На основании сравнения текущих и эталонных значений параметров диагностической модели в блоке классификации состояния объекта диагностирования осуществляется процедура принятия решения о принадлежности к заранее определенному классу состояний. При этом первым этапом распознавания состояний, осуществляемым в этом блоке, как правило, является сравнение текущих параметров диагностической модели с их пороговыми значениями для определения предаварийных (а также недопустимых по технологическим или иным причинам) состояний объекта. Результаты проведенного диагноза используются для управления исследуемым объектом: переключения на другой режим с целью проведения дополнительного (уточняющего) исследования, аварийного останова и т. д.

Анализ трендовых характеристик параметров диагностической модели дает возможность провести оценку тенденции изменения состояния диагностируемого объекта и тем самым осуществить прогнозирование его остаточного ресурса. Нахождение этих трендовых характеристик предопределяет наличие в системе диагнос-

тирования блока хранения текущих состояний объекта диагностирования.

Любая процедура диагностирования содержит операцию сравнения текущих значений диагностических признаков с их эталонными значениями, полученными во время предварительного изучения объекта. Набор эталонных параметров диагностических моделей, соответствующих его нормальному и различным дефектным состояниям, формируется на этапе «обучения» системы диагностирования. С этой целью анализируются свойства физических процессов (вибраций, тепловых полей и т.д.), являющихся источником первичной информации при нормальном состоянии объекта и при наличии дефектов, на основе чего и определяются информативные признаки исправного и неисправного состояний, служащие основой для выбора диагностической модели. На этом же этапе в признаковом пространстве формируются области, соответствующие особым состояниям объекта: предельно допустимому значению параметра технического состояния, предаварийной ситуации, прекращению нормального функционирования.

## **2.5. Сетевые средства систем управления электроприводами**

Контроллеры комплектных электроприводов содержат набор серийных интерфейсов для организации связи со средствами управления, инжиниринговыми средствами и средствами контроля.

Интерфейсы связи разделяются на интерфейсы базового модуля и коммуникационные интерфейсы, использующие различные протоколы обмена (рис. 2.16) [59].

Интерфейсы базового модуля SST1 и SST2, в основе которых используются стандартные интерфейсы RS-485 и RS-232C, предназначены для связи с пультом управления приводом и пультом дистанционного управления.

Соединение между пультом оператора и обслуживаемым портом X300 происходит через последовательный интерфейс RS-485 с USS-протоколом (см. рис. 2.6). При таком соединении пульт оператора OP1S принимает функции ведущего. Подключенные устройства работают как ведомые. Блок OP1S можно задействовать со скоростями передачи от 9,6 до 19,2 кбод. Он может иметь связь с 31 ведомым устройством, поэтому может быть использован при соединении приводов «точка-точка» (поддержка одного устройства) и при их соединении с помощью шины (поддержка нескольких устройств).

Оба интерфейса базового модуля работают с USS-протоколом, который может обеспечивать обмен данными с 31 внешним уст-

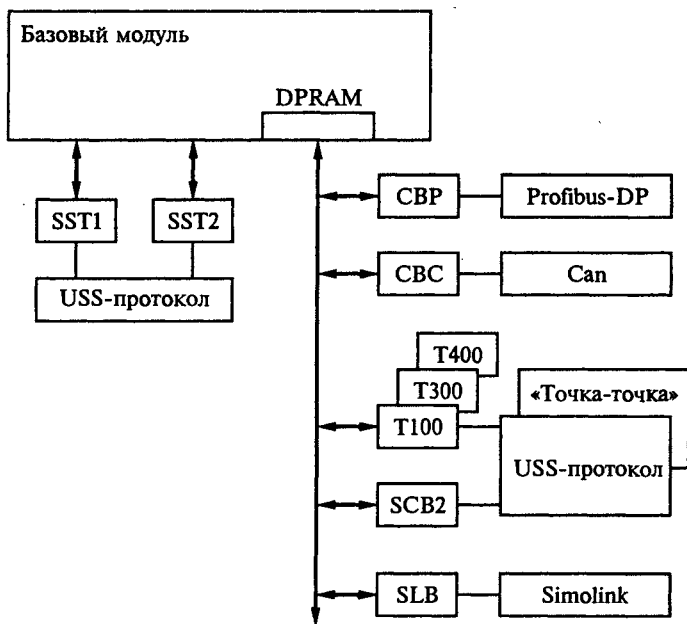


Рис. 2.16

ройством и с максимально возможной скоростью передачи данных до 38,4 кбод.

Имеется набор коммуникационных и интерфейсных модулей, обеспечивающих связь контроллера с сетями технологического уровня управления.

Связь с сетью Profibus-DP осуществляется через модуль CBP (Communication Board Profibus), а с сетью Can — через модуль CBC (Communication Board Can). Модули SLB (Simolink Board) и SCB2 (Serial Communication Board) обеспечивают связь с другими приводами с использованием протоколов: USS, Simolink, Peet-to-peet («точка-точка»).

В соответствии с задачами управления все коммуникационные и интерфейсные модули подключаются в электронном блоке к слотам (установочным разъемам для плат) А, С, D, E, F, G.

USS-протокол является специальным протоколом фирмы «Siemens», базой которого является интерфейс RS-485. Он обеспечивает связь 32 устройств по технологии «ведущий-ведомый»; USS-протокол поддерживает только одно ведущее устройство и 31 ведомое устройство. Ведущим устройством является устройство вышестоящей системы (технологические контроллеры, персональные компьютеры, совместимые распределенные системы управления других фирм). Комплектные приводы в таких системах связи являются ведомыми устройствами.



Рис. 2.17

Связь системы комплектных электроприводов с инжиниринговыми средствами и средствами автоматизации распределенной системы управления технологическим процессом показана на функциональной схеме (рис. 2.17).

Используя описанные сетевые средства, можно обеспечивать управление приводами с различными вариантами их подключения. На рис. 2.18 показаны варианты включения приводов по схемам: последовательного (рис. 2.18, а) и параллельного включения «точка-точка» (рис. 2.18, б); шинного включения с USS-протоколом при управлении от ведущего устройства (рис. 2.18, в).

Рассмотренная система является универсальной. Аналогичные системы выпускаются многими электротехническими корпорациями. Выпускаются и специализированные компьютерные системы, ориентированные на применение в больших группах типовых технологических комплексов, например система PPS 200 фирмы АВВ (рис. 2.19), которая разработана для комплексов целлюлозно-бумажной промышленности и легко адаптируется к другим комплексам непрерывно-поточных производств [56].

Система PPS 200 содержит электродвигатели, управляемые преобразователи, контроллеры локальных приводов 1 и контроллеры управления группами приводов APC2 2, панели оператора 8, магистрали панелей, платы местного и дистанционного ввода и вывода 9, быстродействующую последовательную магистраль 7, контроллер магистрали 3, ПК 6. Для подключения к распределенной системе управления технологическим процессом 4 используется межсетевой преобразователь 5. Система поставляется комплектно с программным обеспечением, адаптированным к конкретному АТК.

Один технологический контроллер может управлять максимально восемью приводами по волоконно-оптической линии связи с быстродействием 1,5 Мбод. Между собой технологические кон-

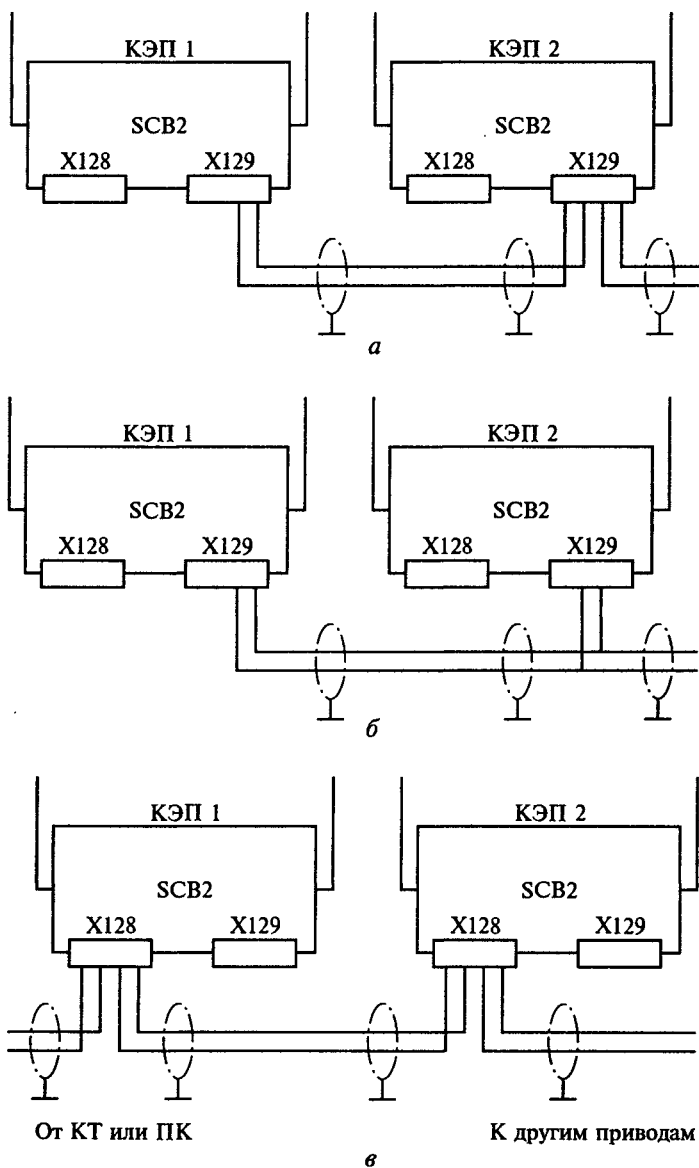


Рис. 2.18

троллеры связаны через магистраль (коаксиальный кабель) с быстродействием 1,5 Мбод.

Предусматривается возможность включения в магистраль до 80 активных абонентов (контроллеров, станций оператора, ПК). Связь

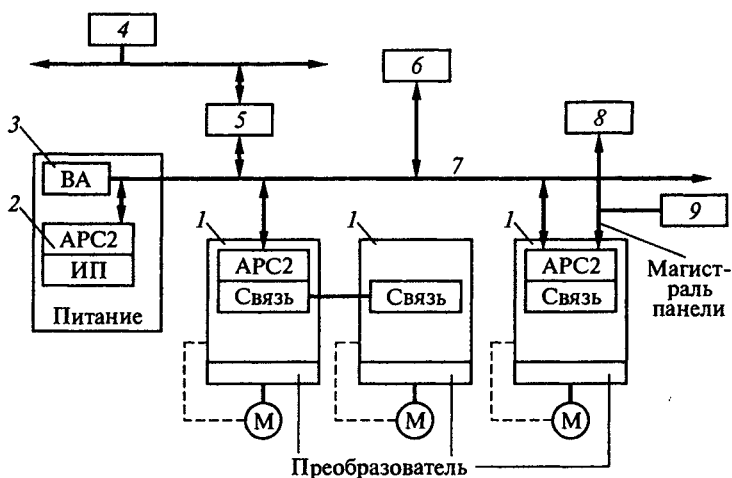


Рис. 2.19

между контроллерами в магистрали управляется контроллером 3. Производительность вычислений увеличивается дополнением системы необходимым количеством контроллеров. Система гибко приспосабливается к количеству приводных секций агрегатов и структуре электропривода.

# УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МЕХАНИЗМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТИПОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

### 3.1. Свойства и конструкция основных узлов систем управления движением механизмов

Основные узлы систем управления движением механизмов могут иметь различную конструктивную компоновку, определяемую требованиями к точности и быстродействию движения исполнительного органа (ИО). На рис. 3.1 и 3.2 приведены типовые схемы систем управления линейными движениями ИО [32]. Для угловых движений ИО схемы аналогичны, но в них отсутствуют передаточные механизмы (ПМ), преобразующие угловые движения в линейные. В соответствии с заданием  $s_s(t)$  во всех случаях системами управления реализуются стабилизирующие, следящие или программные движения ИО —  $s(t)$ .

Для того чтобы получить высокую точность, а это, как правило, связано с высокой добротностью или полосой пропускания системы, необходимо устанавливать датчик положения ДП в непосредственной близости к ИО. Однако это не всегда возможно, так как на полосу пропускания системы будут влиять люфты и упругие деформации в передаточных механизмах, которые входят в контур управления положением ИО; к ним предъявляются повышенные требования по динамическим характеристикам. В этом случае повышаются требования к точности и уровню помех ДП и датчика скорости ДС. Рассмотрим различные варианты схем компоновки ИО, ПМ, ДП, ДС в составе системы управления.

В схеме рис. 3.1, *a* между электродвигателем М и ПМ типа винт 3 — гайка 4 установлен ПМ вращательных движений (редуктор) 2. Датчик скорости ДС установлен непосредственно на валу М, а ДП присоединен к валу М непосредственно или через понижающую зубчатую передачу 1. В качестве первичного преобразователя ДС используется тахогенератор постоянного или переменного тока, а в качестве ДП — вращающийся трансформатор. Блок управления БУ, через который происходит замыкание системы, состоит из управляемого преобразователя, регуляторов положения, скорости и электромагнитных переменных (тока, напряжения). Наиболее часто система управления выполняется трехконтурной в соответствии со схемой, показанной на рис. 3.3, *a*. В об-

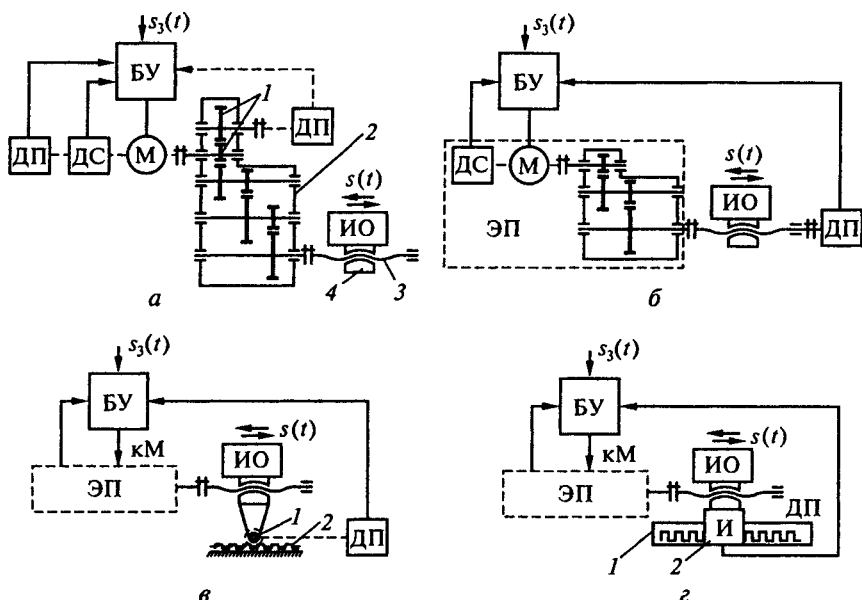


Рис. 3.1

шем случае ИО присоединен к М через силовой передаточный механизм ПМС, а ДП — через приборный передаточный механизм ПМП. Ошибка рассогласования по положению выявляется в системе измерителем рассогласования ИР.

При высокой жесткости ПМС и ПМП измеряемое перемещение  $s'(t)$  и реальное перемещение ИО  $s(t)$  одинаковы, т.е.  $s'(t) = s(t)$ . Структурная схема контура положения для этого случая показана на рис. 3.3, б. При наличии упругих связей  $s'(t)$  и  $s(t)$  не равны и взаимно связаны передаточной функцией  $W_2(p)$  (рис. 3.3, в). Соответственно скорость двигателя  $\omega(t)$  и измеряемое положение  $s'(t)$  связаны передаточной функцией  $W_1(p)$ .

Более точный контроль движений ИО можно осуществить, если ДП установить на винт (см. рис. 3.1, б). Редуктор в этом случае выполняется с минимальным числом ступеней. В качестве ДП используется вращающийся трансформатор (ВТ), редуктосин (ВТ с электрической редукцией) или фотоэлектрический датчик.

Следующим этапом в повышении точности и быстродействия системы управления движением ИО является установка ДП на гайке или непосредственно на ИО. В схеме рис. 3.1, в ДП используется в сочетании с передачей шестерня 1 — рейка 2. Шестерню устанавливают на ИО, а измерительную рейку — на основании, относительно которого перемещается ИО. Подобный прием в установке ДП применяется при длине перемещения ИО свыше 2...3 м. В этом случае используют такие же варианты установки датчиков,



что и в схеме рис. 3.1, б. При использовании линейного индуктосина (или фотоэлектрического датчика) можно осуществить непосредственное измерение перемещения ИО (см. рис. 3.1, г). Неподвижная линейка 1 датчика закрепляется на основании, а подвижный ползунок 2 — на ИО. При большой длине хода ИО осуществляет стыковку отдельных линеек датчика между собой.

Повысить качество систем управления можно, используя высокомоментные электродвигатели и исключив из кинематических схем ПМ круговых движений. В таких электроприводах ротор электродвигателя непосредственно или через муфту присоединяется к винту (см. рис. 3.2). Схемы рис. 3.2, а, в аналогичны схемам рис. 3.1, а, б, г. В схеме рис. 3.2, б ДС и ДП присоединены к ротору двигателя через точный приборный передаточный механизм. В качестве ДП используется ВТ.

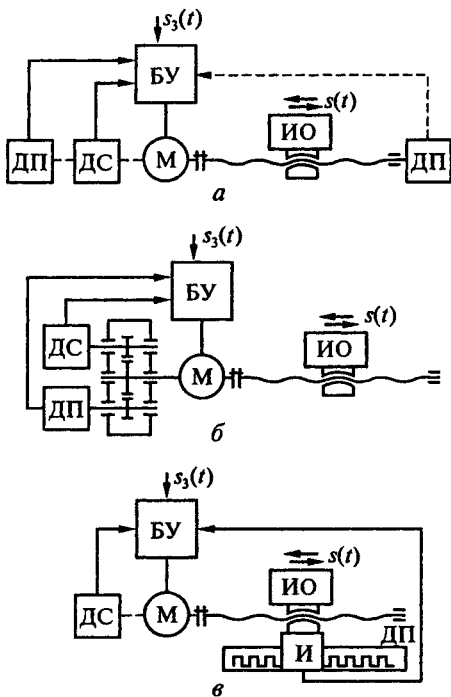


Рис. 3.2

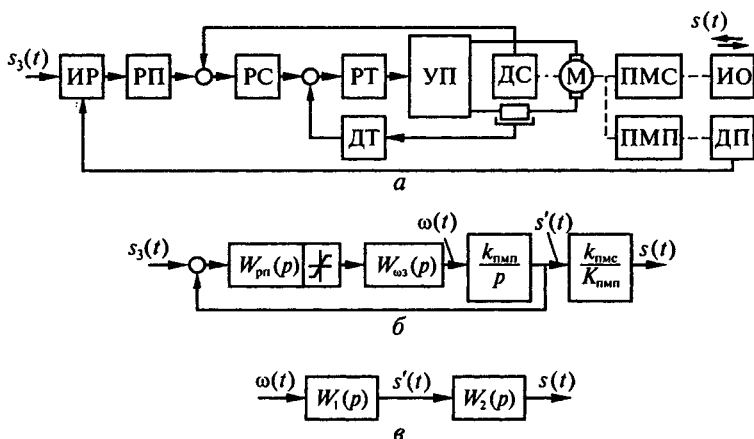


Рис. 3.3

Выбор схемы компоновки ИО, ПМ, ДП, ДС и М определяется динамическими возможностями комплектных электроприводов, точностью датчиков, динамическими характеристиками и люфтами ПМ. Комплектные электроприводы имеют полосу частот пропускания по задающему каналу 25... 50 Гц при установке ДС и ДП на одном валу с ротором М. При наличии в приводе ПМ эта полоса ограничивается меньшими значениями. Для ее повышения необходимо повысить жесткость звеньев ПМ или исключить их из привода. В последнем случае повышается установленная мощность и стоимость электрооборудования. Компромисс устанавливается по результатам анализа возможных альтернатив выбора схем компоновки из условия обеспечения заданных значений точности и быстродействия при ограничениях на установленную мощность, стоимость и размеры электрооборудования. Это делается методами анализа, изложенными в работе [5].

### **3.2. Особенности передаточных механизмов, используемых в системах управления движением исполнительных органов**

Передаточные механизмы, обеспечивающие передачу движения от М к ИО, разделяются на ПМ линейных и круговых движений. Наиболее характерными ПМ линейных движений являются винтовые, реечные, тросовые, цепные; ПМ круговых движений — зубчатые цилиндрические и конические, червячные, планетарные, волновые. Тип ПМ выбирают, исходя из сложности его конструкции, КПД, люфта, размеров и массы, свойств самоторможения, жесткости, удобства компоновки, технологичности, долговечности, стоимости. Рассмотрим устройство и особенности применения ПМ, наиболее распространенных в системах управления движением механизмов.

**Передаточные механизмы линейных движений.** Передача «винт — гайка скольжения» (рис. 3.4, а) служит для преобразования вращательного движения в поступательное, а в отдельных случаях для преобразования поступательного движения во вращательное. Достоинствами передачи являются: простота конструкции, компактность, высокая надежность, плавность, бесшумность, обеспечение медленных перемещений с большой точностью, большой выигрыш в силе. Недостатки — повышенный износ резьбы вследствие большого трения, низкий КПД, наличие люфтов.

Преобразование вращательного движения винта 1 в поступательное перемещение  $s$  гайки 2 определяется формулой

$$s = \varphi p_p k / (2\pi), \quad (3.1)$$

где  $\varphi$  — угол поворота винта;  $p_p$  — шаг резьбы;  $k$  — число заходов резьбы.

## Скорость гайки

$$v = \omega p_p k / (2\pi), \quad (3.2)$$

где  $\omega$  — угловая скорость винта.

## КПД винтовой пары

$$\eta_{\text{вп}} = \text{tg } \psi / \text{tg } (\psi + \rho_c), \quad (3.3)$$

где  $\psi$  — угол подъема винтовой линии,  $\psi = \text{arctg } [p_z / (\pi d_{\text{ср}})]$  ( $p_z = p_p k$  — ход резьбы,  $d_{\text{ср}}$  — средний диаметр резьбы);  $\rho_c$  — приведенный угол трения скольжения,  $\rho_c = \text{arctg } [f_c / \cos(\alpha/2)]$  ( $f_c$  — коэффициент трения скольжения,  $\alpha$  — угол профиля резьбы).

С учетом дополнительных потерь в резьбе из-за ошибок изготовления и потерь в опорах КПД передачи

$$\eta_{\text{вп}} = (0,9 \dots 0,95) \text{tg } \psi / \text{tg } (\psi + \rho_c). \quad (3.4)$$

Обычно  $\eta_{\text{вп}} = 0,25 \dots 0,70$ .

Условие самоторможения (условие, при котором передача движения невозможна) определяется неравенством  $\psi \leq \rho_c$ . Преобразование поступательного движения во вращательное возможно при  $\psi \geq 2\rho_c$ . В этом случае угол поворота и скорость винта соответственно  $\varphi = 2\pi s / (p_p k)$ ,  $\omega = 2\pi v / (p_p k)$ . Вращающий момент, приложенный к ведущему вращательному звену 1,

$$M = F_c (d_{\text{ср}}/2) \text{tg } (\psi + \rho_c), \quad (3.5)$$

где  $F_c$  — осевая сила, приложенная к поступательно движущемуся ведомому звену 2.

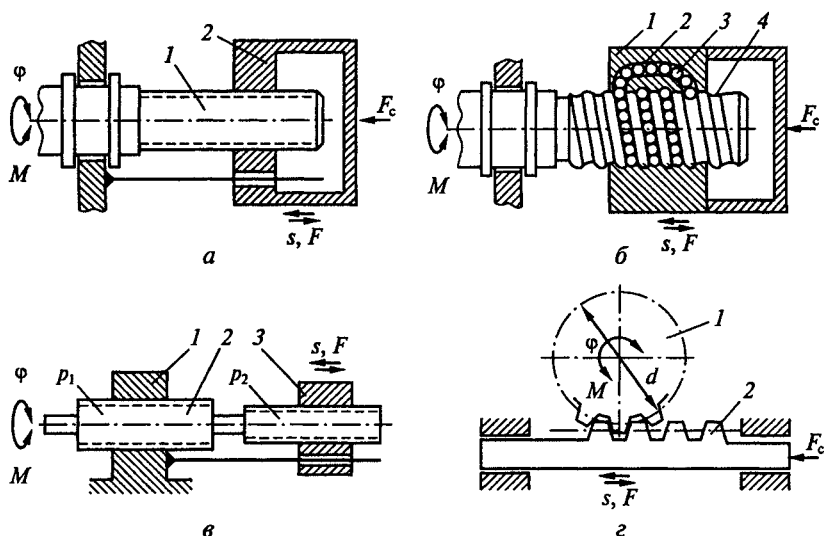


Рис. 3.4

## Мощность на ведущем звене

$$P = F_c v / \eta_{\text{вп}}, \quad (3.6)$$

где  $v$  — линейная скорость ведомого звена.

Передача «винт — гайка качения» (рис. 3.4, б) предназначена для преобразования вращательного движения в поступательное и, наоборот, поступательного движения во вращательное. По сравнению с предыдущей передачей она характеризуется значительно бóльшим КПД, меньшим износом, бóльшей точностью хода, повышенной долговечностью. Между рабочими поверхностями гайки 1 и винта 4 передачи помещены стальные шарики 3. Скорость перемещения шариков отличается от скорости ведущего и ведомого звеньев, поэтому для обеспечения непрерывной циркуляции шариков концы рабочей части резьбы соединены возвратным каналом 2.

Формулы, используемые для расчета режимов преобразования вращательного движения в поступательное и наоборот, аналогичны формулам для передачи «винт — гайка скольжения». Однако при расчете КПД вместо угла  $\rho_c$  применяется приведенный угол трения качения  $\rho_k = \text{arctg} [f_k / (0,5d_{\text{ш}})]$  ( $d_{\text{ш}}$  — диаметр шарика,  $f_k$  — приведенный коэффициент трения качения).

Коэффициент  $f_k$  имеет малые значения, поэтому КПД передачи имеет высокие значения:  $\eta_{\text{вп}} \approx 0,8 \dots 0,9$ . Эффект самоторможения в такой передаче отсутствует.

Дифференциальная винтовая передача (рис. 3.4, в) состоит из винта 2 с двумя участками резьбы разных шагов ( $p_1$  и  $p_2$ ), но одного направления (правого или левого), гайки 3 и стойки 1. При вращении винта 2 гайка 3 совершает два поступательных движения: относительно винта 2 и вместе с винтом относительно стойки 1. Полное поступательное перемещение гайки 3 относительно стойки 2

$$s = \varphi (p_1 - p_2) / (2\pi), \quad (3.7)$$

где  $\varphi$  — угол поворота винта.

Аналогично скорость  $v_2 = \omega (p_1 - p_2) / (2\pi)$ . Достоинство этой передачи — возможность получения малых линейных перемещений.

Реечная передача (рис. 3.4, г) предназначена для преобразования вращательного движения шестерни 1 в поступательное перемещение (зубчатой) рейки 2 и наоборот.

Перемещение рейки

$$s = \pi d \varphi / 36, \text{ или } s = d \varphi / 2, \quad (3.8)$$

где  $d$  — делительный диаметр шестерни;  $\varphi$  — угол поворота шестерни.

В первом случае угол  $\varphi$  измеряется в градусах, во втором — в радианах.

Во всех случаях, когда требуемые перемещения исполнительного органа (ИО) машины по вертикальным и наклонным траекториям достаточно велики (десятки, сотни и даже тысячи метров) наиболее простым и универсальным механизмом перемещения является подъемная или тяговая лебедка, предназначенная для передачи усилий от привода к ИО с помощью подъемного или тягового каната соответствующей длины [21]. По принципу работы лебедки подразделяются на одно- и двухконцевые, а по конструкции органа навивки каната — на барабанные и лебедки с канатоведущими шкивами.

Одноконцевые лебедки являются неуравновешенными подъемными механизмами.

На рис. 3.5 представлена кинематическая схема крановой крюковой подъемной лебедки, где Т — механический тормоз; Р — редуктор; П — полиспаст; КП — крюковая подвеска; Б — барабан. Если не учитывать потери на трение, приведенный к валу двигателя момент, обусловленный весом груза,

$$M_{гр} = \frac{(G_0 + G) D_б}{2i_p i_n}, \quad (3.9)$$

где  $G = mg$  — вес груза, имеющего массу  $m$ ;  $G_0 = m_0g$  — вес грузозахватывающего устройства (или подъемного сосуда), масса которого  $m_0$ ;  $i_p$ ,  $i_n$  — соответственно передаточные числа редуктора и полиспаста;  $D_б$  — диаметр барабана.

Момент  $M_{гр}$  — активный, направлен в сторону спуска, меняется при изменении веса поднимаемого груза, но не зависит от направления движения.

Поэтому при отсутствии потерь на трение двигатель рассматриваемой лебедки в статическом режиме при подъеме работал бы в двигательном режиме, а при спуске — в тормозном. В реальном механизме имеются потери трения, обуславливающие наличие реактивного момента  $M_{тр}$ , который всегда препятствует движению, изменяя свое направление (знак) при изменении направления движения. Суммарный приведенный к валу двигателя статический момент является алгебраической суммой момента  $M_{гр}$ , обусловленного весом перемещаемого груза, и момента потерь  $M_{тр}$ .

В случае перемещения достаточно тяжелых грузов моменты потерь при расчетах статических нагрузок могут быть учтены с помощью соответствующих значений общего КПД механизма.

При подъеме номинального груза ( $G = G_{ном}$ ) статический момент

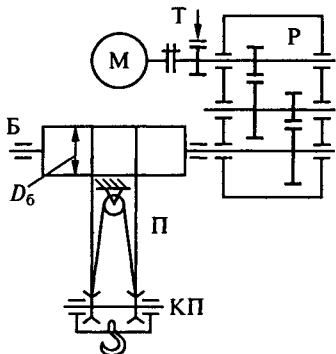


Рис. 3.5

$$M'_{ст1} = M_{гр.ном} + M_{тр.ном} = M_{гр.ном} / \eta_{л.ном}, \quad (3.10)$$

где

$$M_{гр.ном} = (G_0 + G_{ном})D_6/2i_p i_p; \quad (3.11)$$

$$\eta_{л.ном} = \eta_{1ном} \eta_{2ном} \eta_{3ном} \dots \quad (3.12)$$

общий КПД лебедки при подъеме номинального груза, учитывающий КПД всех звеньев кинематической цепи установки  $\eta_{1ном}$ ,  $\eta_{2ном}$ ,  $\eta_{3ном}$ , ...

Полагая КПД не зависящим от направления движения, для режима спуска номинального груза получаем

$$M'_{ст1} = M_{гр.ном} - M_{тр.ном} = M_{гр.ном} \eta_{л.ном}. \quad (3.13)$$

Номинальные значения КПД находятся по справочным данным [21].

При подъеме пустого грузозахватывающего устройства ( $G = 0$ )

$$M_{ст2} = M_{гр0} + M_{тр0}, \quad (3.14)$$

где  $M_{гр0} = G_0 D_6 / 2i_p i_p$ ;  $M_{тр0} = M_{гр0}(1 - \eta_{л0}) / \eta_{л0}$ .

При тяжелом грузозахватывающем устройстве [ $G_0 / (G_0 + G_{ном}) \geq 0,1$ ] значение  $M_{ст2}$  может быть найдено по общему КПД лебедки  $\eta_{л0}$  при подъеме пустого грузозахватывающего устройства, что можно записать в виде

$$M_{ст2} = M_{гр0} / \eta_{л0}. \quad (3.15)$$

При легком грузозахватывающем устройстве [ $G_0 / (G_0 + G_{ном}) < 0,1$ ] определить достаточно точно значение  $\eta_{л0}$  невозможно. В этом случае  $M_{ст2}$  целесообразно рассчитывать по формуле (3.14), определив предварительно значение  $M_{тр0}$ .

Момент трения в общем случае является сложной функцией скорости и момента подъема груза  $M_n$ , передаваемого звеньями кинематической цепи подъемной установки. Однако с приемлемой точностью можно принять  $M_{тр}$  линейно зависящим от передаваемого момента:

$$M_{тр} = M_{xx} + bM_n, \quad (3.16)$$

где  $M_{xx}$  — момент, создаваемый потерями холостого хода;  $b$  — постоянный коэффициент потерь, пропорциональных передаваемой кинематической цепью нагрузке.

Для режима подъема груза  $M_n = M_{гр}$ , поэтому

$$M_{ст} = (1 + b)M_{гр} + M_{xx} = M_{гр} / \eta_{л}. \quad (3.17)$$

Если задаться значениями  $M_{гр1}$  и  $M_{гр2}$  и найти соответствующие им значения  $\eta_{л1}$  и  $\eta_{л2}$  [21], то

$$M_{xx} = \frac{M_{гр1} M_{гр2}}{M_{гр1} - M_{гр2}} \left( \frac{1}{\eta_{л2}} - \frac{1}{\eta_{л1}} \right); \quad (3.18)$$

$$b = \frac{1}{M_{гр1} - M_{гр2}} \left( \frac{M_{гр1}}{\eta_{л1}} - \frac{M_{гр2}}{\eta_{л2}} \right) - 1. \quad (3.19)$$

Полученные таким образом выражения для  $M_{xx}$  и  $b$  могут быть использованы для расчета значения  $M_{тр}$  при любой нагрузке, в том числе для определения  $M_{тр0}$  в формуле (3.14).

Статический момент при спуске пустого грузозахватывающего устройства

$$M'_{ст2} = M'_{гр0} - M'_{тр0}, \quad (3.20)$$

где  $M'_{тр0}$  — момент потерь при спуске пустого грузозахватывающего устройства.

В этом случае момент нагрузки двигателя в зависимости от веса грузозахватывающего устройства может быть движущим или тормозным. При тяжелом грузозахватывающем устройстве  $M_{гр0} > M'_{тр0}$ , момент  $M'_{ст2}$  является движущим (тормозной спуск) и его значение, полагая  $M'_{тр0} = M_{тр0}$ , можно найти по формуле

$$M'_{ст2} = M_{гр0} (2 - 1/\eta_{л0}). \quad (3.21)$$

При легком грузозахватывающем устройстве возможно соотношение  $M_{гр0} < M'_{тр0}$ , при котором потери трения в механизме преодолеваются совместно моментом от веса грузозахватывающего устройства и движущим моментом двигателя (силовой спуск). В этом случае понятие КПД не имеет физического смысла, и расчет значения  $M'_{ст2}$  необходимо вести по формуле (3.20), учитывая при этом, что  $M_{п} = 0$  и поэтому  $M'_{тр0} = M_{xx}$ .

Соотношения (3.10)... (3.15, 3.21) определяют пределы изменения нагрузки двигателя в различных режимах работы одноконцевой лебедки. Для каждого направления пределы изменения статической нагрузки тем больше, чем относительно легче грузозахватывающее устройство. Это положение иллюстрируется представленными на рис. 3.6, а зависимостями  $M_{ст}/M_{ст1} = f(G/G_{ном})$  для двух случаев. Зависимости, показанные сплошными линиями, соответствуют подъемной лебедке с легкой крюковой подвеской [ $G_0/(G_0 + G_{ном}) \approx 0,02$ ], штриховыми — лебедке экскаватора с ковшом [ $G_0/(G_0 + G_{ном}) \approx 0,4$ ].

На рис. 3.6, б в координатах  $\omega, M$  показаны линейные механические характеристики двигателя  $M = f(\omega)$  при работе на подъем и спуск и заштрихованы области возможных нагрузок электропривода для лебедки с легким захватывающим устройством. Характер статической нагрузки двигателя несимметричен при разных направлениях его вращения.

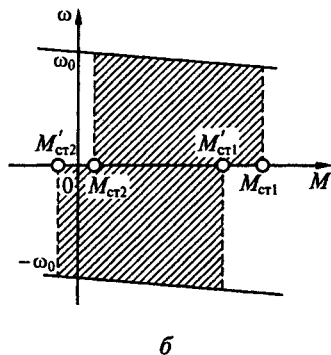
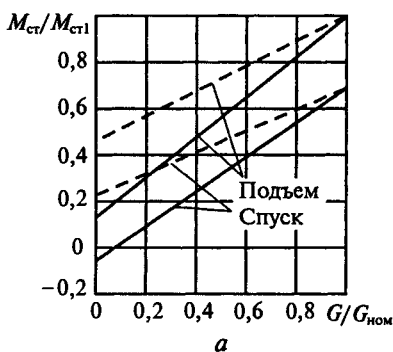


Рис. 3.6

Полученные соотношения могут быть использованы для расчета статических нагрузок одноконцевых наклонных подъемных лебедок. При этом вместо веса поднимаемых частей  $G_0 + G$  необходимо подставлять соответствующие значения натяжения подъемного каната лебедки  $F$ . Усилие в канате уравнивает составляющую силы тяжести  $F_{гр}$  и силу сопротивления движению, обусловленную трением,  $F_{тр}$  (рис. 3.7):

$$F = F_{гр} \pm F_{тр} = (G + G_0) \sin \beta \pm k_{тр} (G + G_0) \cos \beta. \quad (3.22)$$

Знак плюс соответствует подъему, минус — спуску груза;  $k_{тр} = F_{тр}/F_N$  — отношение силы трения к силе нормального давления. В ориентировочных расчетах можно принимать  $k_{тр} = 0,08 \dots 0,15$ .

Экскаваторные подъемные и тяговые лебедки при копании нагружаются не только весом поднимаемого оборудования и грунта, но также и силами сопротивления, возникающими при резании грунта. Поэтому усилие в канате должно определяться с учетом усилия резания, которое может быть вычислено с помощью методов, описанных в специальной литературе.

Определение статических нагрузок является важным этапом проектирования электропривода. Оно необходимо для построения нагрузочной диаграммы, выбора мощности двигателя и проверки его по нагреванию. Характер нагрузок и пределы их изменения в значительной степени определяют режимы работы и выбор схемы электропривода.

Динамические нагрузки электропривода одноконцевой подъемной лебедки связаны с необходимостью пусков, реверсов и торможений. При

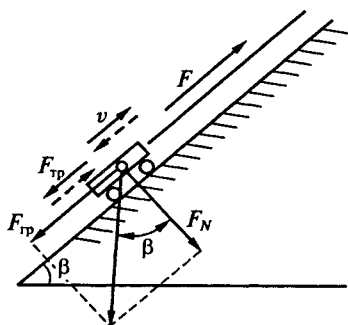


Рис. 3.7



заданном ускорении  $\epsilon_{\text{доп}}$ , которое обычно ограничено технологическими условиями, динамический момент двигателя

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = J_{\Sigma} \epsilon_{\text{доп}}, \quad (3.23)$$

где  $J_{\Sigma}$  — суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции, включающий в себя момент инерции ротора двигателя и приведенный момент инерции всех вращательно и поступательно движущихся частей установки.

При рабочей скорости лебедки  $v_p < 2$  м/с основную долю в моменте  $J_{\Sigma}$  составляет момент инерции двигателя:  $J_{\Sigma} = (1,2 \dots 1,6) J_{\text{дв}}$ . Для более быстроходных установок влияние приведенных масс механизма более значительно.

Рассмотренные одноконцевые лебедки являются неуравновешенными механизмами, нагрузка привода которых определяется суммой весов всех поднимаемых частей — каната, захватывающего приспособления и полезного груза. Такие механизмы постоянно совершают дополнительную работу по подъему захватывающего устройства. При спуске двигатель должен тормозить не только опускающийся полезный груз, но и балластный груз  $G_0$ . Эти факторы приводят к завышению мощности электродвигателя тем более значительному, чем больше вес грузозахватывающего устройства, а также к соответствующему увеличению расхода энергии на единицу полезного груза.

В стационарных подъемных установках этот недостаток устраняется использованием двухконцевых подъемных лебедок. Если установка обслуживает только два уровня, вес подъемного сосуда уравновешивается весом второго такого же подъемного сосуда. При этом достигается также увеличение производительности установки примерно вдвое, так как операция подъема груза совмещается со спуском пустого подъемного сосуда.

Если установка должна обслуживать несколько уровней, например этажей многоэтажного здания, подобное совмещение невозможно. В этих случаях вместо второго подъемного сосуда наве-

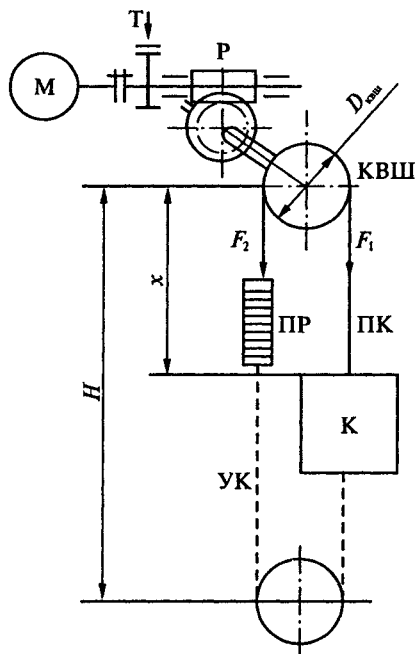


Рис. 3.8

шивается балластный контргруз — противовес. Вес противовеса  $G_{\text{пр}}$  с целью дополнительного снижения требуемой мощности двигателя выбирают больше веса подъемного сосуда  $G_0$ . При этом уравновешивается и часть полезного груза:

$$G_{\text{пр}} = G_0 + \alpha G_{\text{ном}}, \quad (3.24)$$

где  $\alpha$  — коэффициент уравновешивания.

На рис. 3.8 представлена кинематическая схема двухконцевой лифтовой лебедки с червячным редуктором и канатоведущим шкивом, где Т — тормоз; Р — редуктор; КВШ — канатоведущий шкив; К — кабина; ПР — противовес; УК — уравновешивающий канат.

Результирующее усилие на канатоведущем шкиве определяется разностью натяжений ветвей подъемного каната:

$$F = F_1 - F_2. \quad (3.25)$$

С учетом сил трения в направляющих кабины  $F'_{\text{тр}}$  и противовеса  $F''_{\text{тр}}$  а также веса  $l$  м подъемного каната  $q_k$  натяжения  $F_1$  и  $F_2$  определяются следующим образом:

$$F_1 = G + G_0 + q_k x \pm F'_{\text{тр}}; \quad (3.26)$$

$$F_2 = G_{\text{пр}} + q_k (H - x) \mp F''_{\text{тр}}. \quad (3.27)$$

Отсюда результирующее усилие

$$F = G - \alpha G_{\text{ном}} + q_k (2x - H) \pm (F'_{\text{тр}} + F''_{\text{тр}}). \quad (3.28)$$

Знак плюс соответствует подъему кабины, а минус — спуску.

Результирующее усилие  $F$  удобно представить в виде алгебраической суммы активного усилия  $F_{\text{гр}}$  и реактивного, обусловленного трением усилия  $F_{\text{тр}}$ . Эти составляющие определяют соответственно активную  $M_{\text{гр}}$  и реактивную  $M_{\text{тр}}$  составляющие приведенного к валу двигателя статического момента  $M_{\text{ст}}$ . Составляющая  $M_{\text{тр}}$  должна учитывать, кроме трения в направляющих, все потери на трение в подъемной лебедке.

Тогда

$$M_{\text{ст}} = M_{\text{гр}} + M_{\text{тр}} = \frac{[G + q_k (2x - H) - \alpha G_{\text{ном}}] D_{\text{квш}}}{2i_p} + M_{\text{тр}}. \quad (3.29)$$

Из формулы (3.29) следует, что статический момент зависит от загрузки кабины и от коэффициента уравновешивания  $\alpha$ . При большой высоте подъема  $H$  на статический момент может существенно влиять вес ветвей каната. При этом в соответствии с формулой (3.29) и рис. 3.8 момент  $M_{\text{ст}}$  является функцией пути.

Если высота подъема невелика, составляющая  $q_k (2x - H) \approx 0$ . Тогда при подъеме номинального груза ( $G = G_{\text{ном}}$ ) и пустой каби-

ны ( $G = 0$ ) статический момент можно определить с помощью соотношений

$$\begin{aligned} M_{\text{ст1}} &= M_{\text{гр}} + M_{\text{тр}} = \frac{(1 - \alpha) G_{\text{ном}} D_{\text{квш}}}{2i_{\text{р}} \eta_{\text{л.ном}}}; \\ M_{\text{ст2}} &= -M_{\text{гр}} + M_{\text{тр}} = \frac{-\alpha G_{\text{ном}} D_{\text{квш}}}{2i_{\text{р}}} M \eta_{\text{л.ном}}, \end{aligned} \quad (3.30)$$

где  $\eta_{\text{л.ном}}$  — КПД подъемной установки с учетом трения в направляющих, соответствующий номинальной нагрузке.

Статический момент при спуске

$$\begin{aligned} M'_{\text{ст1}} &= M_{\text{гр}} - M_{\text{тр}} = \frac{(1 - \alpha) G_{\text{ном}} D_{\text{квш}}}{2i_{\text{р}}} \eta_{\text{л.ном}}; \\ M'_{\text{ст2}} &= -M_{\text{гр}} - M_{\text{тр}} = \frac{-\alpha G_{\text{ном}} D_{\text{квш}}}{2i_{\text{р}} \eta_{\text{л.ном}}} \end{aligned} \quad (3.31)$$

Влияние коэффициента уравновешивания  $\alpha$  на требуемую мощность двигателя можно оценить с помощью среднего квадратического момента нагрузки  $M_{\text{ск}}$ , задавшись определенным циклом работы. Примем, например, что цикл состоит из подъема номинального груза и спуска пустой кабины.

Полагая  $t_{\text{п}} = t_{\text{с}} = t_{\text{р}}$ , с помощью выражений (3.30) и (3.31) получим

$$M_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{M_{\text{ст1}}^2 + M_{\text{ст2}}^2}{2}} = \frac{G_{\text{ном}} D_{\text{квш}}}{2i_{\text{р}} \eta_{\text{л.ном}}} \sqrt{\frac{(1 - \alpha)^2 + \alpha^2}{2}}. \quad (3.32)$$

Значение  $\alpha = \alpha_{\text{опт}}$ , при котором имеет место минимальное значение  $M_{\text{ск}}$ , можно определить, приравняв нулю производную подкоренного выражения в формуле (3.32):

$$\frac{d}{d\alpha} (1 - 2\alpha + 2\alpha^2) = 0; \quad \alpha_{\text{опт}} = 0,5. \quad (3.33)$$

Из формулы (3.32) следует, что при  $\alpha = 0$  момент  $M_{\text{ск}}$  больше, чем при  $\alpha = 0,5$ , в 1,41 раза. Требуемая мощность двигателя при одинаковом среднем значении момента минимальна при равномерной (постоянной) нагрузке. Оптимальное значение  $\alpha$  зависит от параметров цикла работы и потерь на трение в установке. С учетом этого принимаемый при проектировании коэффициент уравновешивания для разных установок  $\alpha = 0,4 \dots 0,6$ .

При большой высоте подъема  $H$  на статический момент в соответствии с формулой (3.29) оказывает значительное влияние неуравновешенный вес подъемного каната, который изменяется

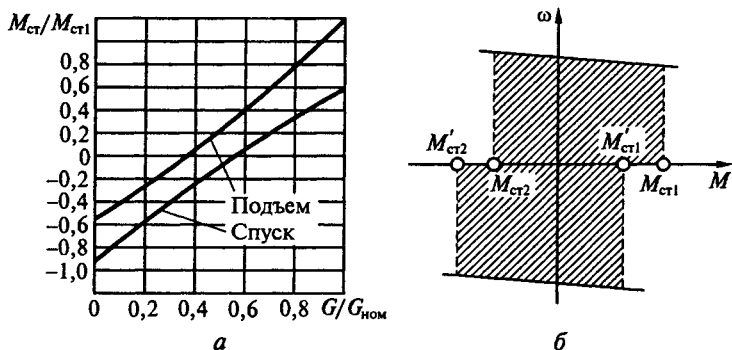


Рис. 3.9

в функции координаты  $x$  (см. рис. 3.8) и нарушает достигаемую выбором  $\alpha = \alpha_{опт}$  равномерность нагрузки. В результате требуемая мощность двигателя увеличивается. Поэтому при большой высоте подъема обычно применяют уравнивание веса подъемного каната с помощью компенсационного (уравнивающего) каната УК, показанного на рис. 3.8 штриховой линией. Для таких установок формулы (3.30) и (3.31) применимы при любой высоте подъема.

Из формул (3.30) и (3.31) видно, что при  $\alpha = 0,5$  максимальные и минимальные нагрузки по значению и характеру одинаковы при любом направлении движения. Об этом можно судить по представленным на рис. 3.9, а примерным зависимостям  $M_{ст}/M_{ст1} = f(G/G_{ном})$  при  $\alpha = 0,5$ . Возможные пределы изменения нагрузок двухконцевой подъемной лебедки при  $\alpha = 0,5$  и достаточно высоком КПД представлены в координатах  $\omega, M$  на рис. 3.9, б. Сравнивая соответствующие графики (см. рис. 3.6 и 3.9), можно заключить, что нагрузки двухконцевых подъемных лебедок изменяются в более широких пределах и симметричны при разных направлениях движения механизма. Соответственно при проектировании таких установок используются симметричные схемы электропривода.

При расчете двухконцевых подъемных лебедок, в которых вместо противовеса используется второй подъемный сосуд, можно пользоваться полученными выше соотношениями, полагая  $\alpha = 0$ .

Динамические нагрузки двухконцевых подъемных установок определяются суммарным приведенным моментом инерции установки и допустимым ускорением. Следует иметь в виду, что суммарный момент инерции зависит от суммы массы всех движущихся элементов:

$$J_{\Sigma} = J_{дв} + J_{вр} + (m_{пр} + m_{пс} + m_{тр} + m_k) \frac{v^2}{\omega^2}, \quad (3.34)$$

где  $J_{вр}$  — приведенный момент инерции всех вращающихся элементов лебедки;  $m_{пр}$ ,  $m_{пс}$ ,  $m_{гр}$ ,  $m_k$  — массы соответственно противовеса, подъемного сосуда, груза, подъемного и компенсационного канатов.

Так как мощность двигателя определяется разностью конечных нагрузок, а момент инерции связан с суммой их масс, особенностью двухконцевых подъемных лебедок является большой момент инерции механизма, превышающий в 2...5 раз момент инерции двигателя.

Кинематическая схема механизма передвижения по рельсам представлена на рис. 3.10, где Т — тормоз; Р — редуктор. Для механизмов передвижения, работающих на горизонтальном пути в производственном помещении, приведенный к валу двигателя статический момент, обусловленный силами трения,

$$M_{ст} = \frac{k_p(G + G'_0) \left( \mu \frac{d_{ц}}{2} + f \right)}{i_p \eta_m}, \quad (3.35)$$

где  $G'_0$  — общий вес незагруженного механизма;  $\mu$  — коэффициент трения в опорах ходовых колес;  $f$  — коэффициент трения качения ходовых колес;  $\eta_m$  — КПД передач механизма;  $d_{ц}$  — диаметр цапф (подшипников) колес;  $k_p$  — коэффициент, учитывающий трение реборд колес о рельсы, возникающее вследствие возможного перекоса конструкции.

Как следует из формулы (3.35), изменения  $M_{ст}$  вызываются изменениями веса  $G$  перемещаемого полезного груза, а также изменениями условий трения в кинематических звеньях механизма. Если общий вес механизма  $G'_0$  невелик по сравнению с номинальным весом номинального полезного груза  $G_{ном}$ , что имеет место для механизмов передвижения тележек мостовых, козловых кранов и подобных им установок, то определяющее влияние

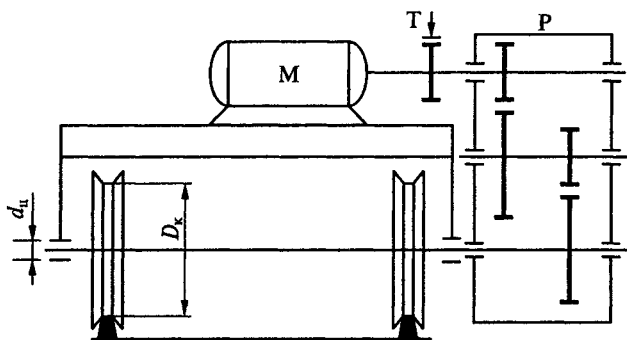


Рис. 3.10

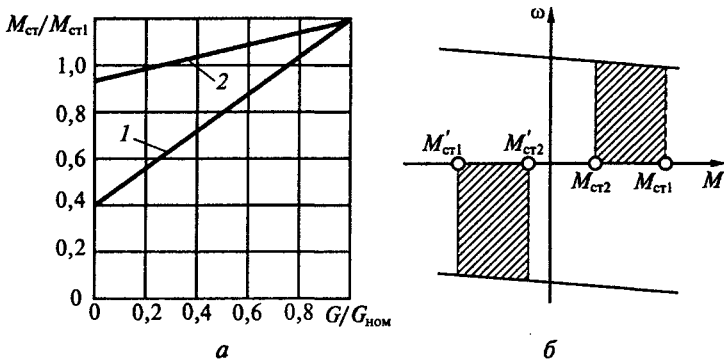


Рис. 3.11

оказывают изменение веса полезного груза (прямая 1 на рис. 3.11, а). Пределы изменения нагрузок электроприводов механизмов передвижения и поворота без учета ветровой нагрузки и уклона в координатах  $M_{ст}/M_{ст1}$ ,  $G/G_{ном}$  показаны на рис. 3.11, а, а в координатах  $\omega$ ,  $M$  — на рис. 3.11, б [21]). Для механизмов передвижения более тяжелых конструкций, например мостовых кранов, влияние полезного груза на статические нагрузки привода невелико (прямая 2 на рис. 3.11, а). Поэтому при проектировании электроприводов таких механизмов следует иметь в виду изменения и других факторов, в частности трения в передачах и реборд колес о рельсы. Точным расчетом эти изменения не определяются. Их влияние можно учитывать ориентировочно, снижая расчетные минимальные нагрузки на 20...30 %.

**Передаточные механизмы круговых движений.** Цилиндрическая и коническая зубчатые передачи (рис. 3.12, а, б) применяются как двусторонние передачи, различающиеся направлениями размещения осей шестерен. В одноступенчатом варианте они обеспечивают малые значения коэффициентов редукции (до 5...8).

Червячная передача (рис. 3.12, в) применяется как силовая передача, обеспечивающая коэффициенты редукции до 300 и более. Она обладает свойством самоторможения. Недостатком передачи является невысокий КПД.

Планетарная передача (рис. 3.12, г) применяется как двусторонняя зубчатая передача, имеющая малые размеры и массу и большие значения коэффициентов редукции. Особенностью передачи является наличие колес с перемещающимися геометрическими осями (сателлитами), которые обкатываются вокруг центрального колеса.

Волновая зубчатая передача (рис. 3.13, а, б) состоит из генератора волн 1 (два ролика, установленные на водиле), гибкого колеса 2 (тонкостенная цилиндрическая оболочка с наре-

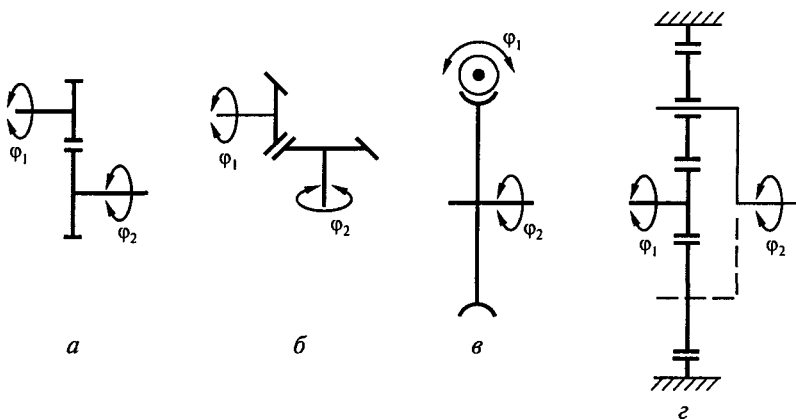


Рис. 3.12

занным зубчатым венцом с числом зубьев  $z_1$ ), жесткого, фиксированного относительно корпуса колеса  $3$ , внутри которого нарезан зубчатый венец с числом зубьев  $z_2$ . При вращении роликов происходит деформация гибкого колеса, сравнимая с размерами зуба, и осуществляется зацепление и передача движения от одного колеса к другому. На рис. 3.13, *в* показано торцевое сечение, на котором *I* — контур жесткого колеса, *II* — контур гибкого колеса до деформации, *III* — контур гибкого деформированного колеса;  $\Delta_0$  — радиальная деформация гибкого колеса.

После полного оборота генератора волн ( $\varphi_1 = 2\pi$ ) вал гибкого колеса поворачивается в противоположном генератору направлении на угол  $\varphi_2 = 2\pi (z_1 - z_2)/z_1$ . Коэффициент редукции передачи  $i_B = \varphi_1/\varphi_2 = z_1/(z_1 - z_2)$ .

Если гибкое колесо связать с корпусом, а жесткое — с выходным валом, то после поворота генератора волн на угол  $\varphi_1 = 2\pi$  жесткое колесо повернется в том же направлении, что и генератор волн, на угол  $\varphi_3 = 2\pi(z_3 - z_1)/z_2$ . Коэффициент редукции от генератора волн к жесткому колесу  $i'_B = \varphi_1/\varphi_3 = z_2/(z_2 - z_1)$ .

Особенностями волновой передачи являются: большие значения коэффициентов редукции (до

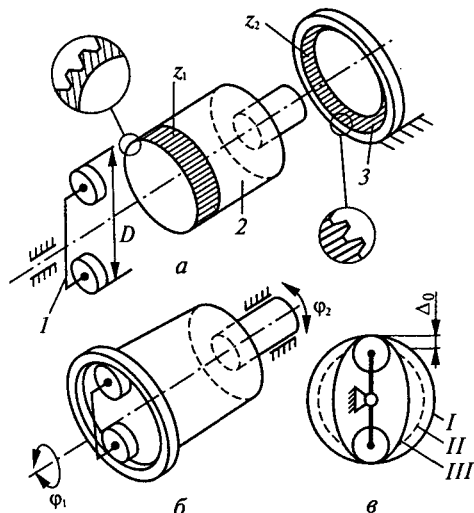


Рис. 3.13

50...300 в одной ступени), одновременное зацепление большого числа пар зубьев колес (что дает возможность передавать большие крутящие моменты при относительно малых размерах и массе), высокая кинематическая точность и малый люфт, высокий КПД (0,6...0,85).

Для круговых перемещений (поворотов) больших масс применяют поворотные платформы ПП (рис. 3.14). Зубчатый венец ЗВ большого диаметра связан с неподвижным основанием. Ведущие шестерни ВШ, приводимые в движение от электродвигателей М через редукторы Р, поворачивают платформу вокруг центральной оси. Платформы выполняются с роликовыми опорами качения РОК и центральной цапфой ЦЦ оси вращения. Для фиксирования заданного положения платформы используется механический тормоз Т с электромагнитным приводом. При горизонтальном положении поворотной платформы статический момент механизма поворота

$$M_{ст} = k_p \frac{2f(G + G'_0)D_{кр}}{d_p i \eta}, \quad (3.36)$$

где  $k_p$  — коэффициент, учитывающий трение роликов опорного роликового круга о направляющие, а также трение в центральной цапфе оси вращения платформы;  $D_{кр}$  — диаметр роликового круга;  $d_p$  — диаметр роликов;  $f$  — коэффициент трения качения роликов или ходовых колес;  $i$  — передаточное число редуктора.

Статический момент электропривода поворота мало зависит от веса полезного груза  $G$ , так как для подавляющего большинства машин вес поворотной платформы с оборудованием значительно больше веса полезного груза. Важнейшей особенностью механизмов передвижения и поворота является большая механи-

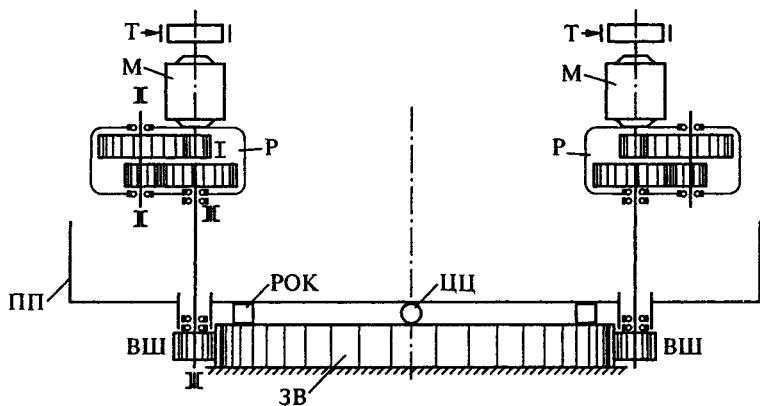


Рис. 3.14



ческая инерция, влияние которой тем больше, чем тяжелее движущееся сооружение и чем выше скорость движения.

При небольшом моменте инерции механизма динамический момент в основном обусловлен ускорением ротора двигателя и нагружает передачи механизма незначительно. Иные условия складываются в электроприводах инерционных механизмов. Здесь основной нагрузкой передач является динамическая нагрузка, обусловленная массой элементов поворотной платформы, движущихся с ускорением. Передача динамических усилий вызывает дополнительные потери в редукторе, которые в расчетах желательно учитывать, если динамические нагрузки передач соизмеримы со статическими или превышают их.

Приведенный динамический момент для пуска

$$M_{\text{дин}} = J_{\text{дв}} \epsilon_{\text{доп}} + J_{\text{м}} \frac{\epsilon_{\text{доп}}}{\eta_{\text{м}}}, \quad (3.37)$$

а для торможения

$$M_{\text{дин}} = J_{\text{дв}} \epsilon_{\text{доп}} + J_{\text{м}} \epsilon_{\text{доп}} \eta_{\text{м}}, \quad (3.38)$$

где  $J_{\text{м}} = J_{\Sigma} - J_{\text{дв}}$  — приведенный к валу двигателя момент инерции всех поступательно и вращательно движущихся элементов механизма.

**Статические нагрузки механизмов, работающих на открытом воздухе.** Эти нагрузки могут существенно изменяться при наличии уклона или воздействия ветра. В общем случае сила сопротивления движению для механизма передвижения может быть представлена в виде алгебраической суммы (влияние уклона показано на рис. 3.7):

$$\begin{aligned} F_c &= F_{\text{тр}} + F_{\text{тр}} + F_{\text{в}} = \\ &= (G'_0 + G) \sin \beta + k_{\text{тр}} (G'_0 + G) \cos \beta + p_{\text{в}} S_{\text{в}}; \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$k_{\text{тр}} = 2k_{\text{р}} \left( \mu \frac{d_{\text{н}}}{2} + f \right) / D_{\text{к}}, \quad (3.40)$$

где  $D_{\text{к}}$  — диаметр ходового колеса;  $\beta$  — угол уклона;  $p_{\text{в}}$  — ветровое давление, принимаемое обычно при выборе мощности электродвигателя 150...250 Па;  $S_{\text{в}}$  — площадь парусности сооружения.

Площадь парусности сооружения

$$S_{\text{в}} = k_{\text{сп}} S_{\text{вк}} + S_{\text{вг}}, \quad (3.41)$$

где  $k_{\text{сп}}$  — коэффициент однородности (сплошности) конструкции, численно равный 0,3...0,6 для ферм и 0,7...0,8 для механизмов;  $S_{\text{вк}}$ ,  $S_{\text{вг}}$  — площадь, ограниченная соответственно контуром конструкции и груза.

Статический момент в случае, когда результирующая сила направлена против движения, т. е. является тормозной,

$$M_{\text{ст}} = F_c D_{\text{к}} / 2i \eta_{\text{м}}, \quad (3.42)$$

а если по движению, то

$$M_{ст} = F_c D_k \eta_m / 2i. \quad (3.43)$$

Уклон и ветровая нагрузка в значительной степени расширяют пределы изменения нагрузок и изменяют их характер. При наличии уклона нагрузка становится несимметричной (см. рис. 3.6, б). Ветровая нагрузка может иметь любое направление, и при большой парусности пределы изменения статической нагрузки могут охватывать как двигательный, так и тормозной режимы. Для механизмов поворота статический момент, обусловленный ветром, при постоянной силе ветра зависит от угла поворота платформы.

### 3.3. Динамические модели механизмов

Рассматривая динамические модели механизмов в виде систем дифференциальных уравнений и передаточных матриц, будем считать, что люфты исключены с помощью устройств выборки люфтов и динамические процессы определяются в основном упругой податливостью валов, зубчатых зацеплений, муфтовых соединений, опор и других звеньев.

Выборка люфтов может быть выполнена, в частности, с помощью замыкающей кинематической цепи в одноступенчатой передаче, содержащей колеса 1, 2 и предварительно закрученный торсион Т (рис. 3.15). Момент закрутки торсиона выбирается большим максимально возможным моментом в основной кинематической цепи. Коэффициент редукции замкнутого контура, состоящего из колес 2, 1 и 1', 2', принимается равным 1, т. е.  $i_{зк} = i_{21} i_{1'2'} = (z_1'/z_2')(z_2/z_1) = 1$ , где  $z_1'$ ,  $z_2'$ ,  $z_2$ ,  $z_1$  — число зубьев колес 1', 2' и 2, 1. Аналогичные функции имеют и другие устройства выборки люфтов.

Математические описания динамических процессов в механизмах локальных и взаимосвязанных электроприводов рассмотрены в гл. 1. В электроприводах возможны различные варианты компоновок основных узлов (см. п. 3.1). Механическая часть электропривода может представляться многомассовой системой, математическое описание которой выполняется методами, описанными выше.

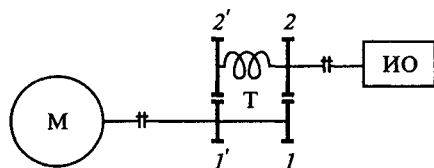


Рис. 3.15

### 3.4. Динамические модели направляющих и опор механизмов

Для линейных и круговых перемещений механизмов используются направляющие и опоры скольжения и качения. Направляющие скольжения разделяются на: треугольные симметричные (рис. 3.16, а), треугольные несимметричные (рис. 3.16, б), прямоугольные (рис. 3.16, в) и остроугольные (рис. 3.16, г). Для уменьшения трения в подвижных узлах направляющих применяют пластмассовые накладки, например из фторопласта. Коэффициенты трения в направляющих и опорах скольжения оказываются большими и зависящими от скорости перемещения механизма, вида и состояния смазочного материала. Для снижения коэффициента трения и обеспечения его независимости от скорости применяют направляющие и опоры качения (рис. 3.16, д, е, ж). В качестве тел качения используют шарики (см. рис. 3.16, д) и ролики (см. рис. 3.16, е, ж), изготовляемые с допуском примерно 1 мкм. Направляющие качения разделяются на незамкнутые (см. рис. 3.16, д, е) и замкнутые (см. рис. 3.16, ж).

Для крупногабаритных механизмов применяют плоские и цилиндрические гидростатические направляющие. При этом достигаются низкие коэффициенты трения, плавность и точность перемещений, малый износ и нечувствительность к деформациям станины.

Для механизмов с малой нагрузкой применяют аэростатические направляющие. Вместо масляной подушки создается воздуш-

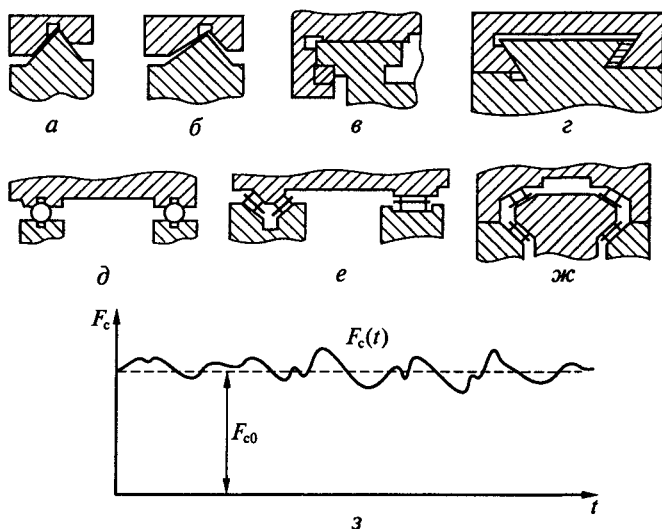


Рис. 3.16

ная. Делается очень маленький зазор в направляющих (10... 15 мкм) и устанавливаются уплотнители. Вместо аэростатических можно применять электромагнитные направляющие.

Трение, возникающее при движении механизмов, проявляется в системах управления движением как возмущающее воздействие в виде сил или моментов сопротивлений. Оно содержит постоянную и переменные составляющие. Примерный вид изменения силы сопротивлений в зависимости от времени  $F_c(t)$  для равномерного линейного движения показан на рис. 3.16, з. Аналитически можно записать:

$$F_c(t) = F_{c0} + \rho_c; \quad \rho_c = \rho_{c,сл} + \sum_{i=1}^m A_i \sin \omega_i t, \quad (3.44)$$

где  $F_{c0}$ ,  $\rho_c$  — соответственно постоянная и переменная составляющие;  $\rho_{c,сл}$  — случайная составляющая;  $A_i$ ,  $\omega_i$  — соответственно амплитуда и частота регулярной переменной составляющей силы сопротивления при ее разложении в ряд Фурье.

Случайная составляющая может быть выражена через спектральную плотность  $S_{\rho}(\omega)$ , которая в свою очередь может быть выражена через интенсивность белого шума  $N$  и квадрат модуля передаточной частотной функции формирующего фильтра  $W_{\phi}(j\omega)$  в следующем виде:

$$S_{\rho}(\omega) = N |W_{\phi}(j\omega)|^2. \quad (3.45)$$

Сопоставляя различные виды опор, следует отметить, что наименьшие значения возмущений от трения и соответственно наиболее высокая динамическая точность движения механизмов получаются при использовании электромагнитных и аэростатических направляющих, так как трение в этом случае практически отсутствует. Малые значения возмущений имеют место при использовании гидростатических направляющих. Наибольшие возмущения возникают при использовании опор скольжения, которые применяются в системах управления сравнительно невысокой динамической точности. Опоры качения занимают промежуточное положение и наиболее распространены.

### 3.5. Информационные преобразователи скоростей и перемещений механизмов

В состав информационных преобразователей скоростей и перемещений входят: первичные преобразователи (датчики скоростей и положений); вторичные преобразователи (осуществляющие преобразования сигналов датчиков в форму, удобную для систем управления); измерители рассогласования задающих сигналов и сигналов, несущих информацию о фактических значениях перемещений.

**Информационные преобразователи скоростей.** Точность регулирования скорости непосредственно зависит от способов задания, измерения скорости и формирования сигнала об отклонении скорости от заданного значения. Устройства задания и измерения скорости, а также формирования сигнала об отклонении скорости совместно образуют систему обработки информации о скорости движения электропривода.

Наиболее простыми системами обработки информации являются аналоговые. Скорость задается в виде напряжения постоянного тока, поступающего в систему управления от стабилизированных источников напряжения. Скорость измеряют с помощью тахогенераторов Тг постоянного или переменного тока. В последнем случае напряжение переменного тока преобразуется, как правило, в напряжение постоянного тока с помощью выпрямителей и фильтров.

Измерение отклонения скорости от заданных значений производится с помощью модулей контроллера привода.

Для сглаживания пульсаций напряжений Тг применяются фильтры  $RC$  и  $RLC$ . В Тг постоянного тока наблюдаются обратные и коллекторные пульсации напряжений, связанные с такими явлениями, как магнитная анизотропия якоря, коммутационные явления в щеточно-коллекторном узле, неточные сочленения Тг с двигателем и др. Периодические пульсации выходных напряжений имеют место и при использовании асинхронных и синхронных Тг. Наличие довольно большого уровня помех и связанная с этим необходимость фильтрации выходных напряжений являются недостатками Тг постоянного и переменного тока.

Минимальная погрешность лучших образцов аналоговых систем обработки информации о скорости электроприводов составляет примерно 0,1 %. При необходимости получения большей точности необходимо использовать системы обработки информации с импульсными датчиками скорости. При повороте на некоторый угол импульсного датчика на его выходе формируется определенное число импульсов, соответствующее углу поворота. Импульсные датчики можно использовать для контроля линейных и угловых перемещений. При непрерывном движении датчика образуется непрерывная последовательность импульсов, мгновенная частота которых пропорциональна мгновенной скорости датчика.

В современных системах электропривода используются в основном индукционные и фотоэлектрические импульсные датчики. Они обладают минимальными погрешностями, которые наиболее полно характеризуются спектральными плотностями  $S(\omega)$  или корреляционными функциями  $R(\tau)$ . В таких датчиках имеются регулярные (систематические) составляющие погрешностей — обратные, шаговые и др. Погрешности в импульсных датчиках значительно ниже, чем в Тг.

При использовании импульсных датчиков задание скорости и формирование сигнала об отклонении скорости производится в цифровой форме.

Измерение действительной скорости электропривода в цифровой системе обработки информации можно выполнять двумя способами в зависимости от скорости, диапазона регулирования и требуемой динамической точности. Первый способ основан на подсчете импульсов, поступающих от импульсного датчика скорости (ИДС) за фиксированный интервал времени  $T_0$ , определяемый частотой дискретизации  $f_0$ , цифровой системы ( $T_0 = 1/f_0$ ). Частота  $f_0$  задается через делитель от генератора эталонной частоты.

Значение текущей скорости электропривода в момент  $t = iT_0$  пропорционально числу подсчитанных импульсов:

$$\omega[iT_0] = n \frac{2\pi}{zT_0}, \quad (3.46)$$

где  $n$  — число импульсов датчика за интервал времени  $[(i-1)T_0, iT_0]$ ;  $z$  — число импульсов, приходящихся на один оборот датчика.

Этот способ реализуется на специализированной интегральной микросхеме, выходной сигнал которой может быть использован для цифрового управления электроприводом или преобразован цифро-аналоговым преобразователем в аналоговую величину  $u_d$  для аналогового управления электроприводом.

Второй способ измерения действительной скорости связан с измерением временного интервала между  $i$ -м и  $(i+k)$ -м импульсами ИДС и осуществляется подсчетом числа импульсов, поступающих за этот временной интервал в информационную систему от генератора эталонной частоты.

Период дискретизации системы будет в этом случае переменным:

$$T_n = \sum_{i=1}^k T_{дси}, \quad (3.47)$$

где  $k$  — число импульсов ИДС на интервале измерения;  $T_{дси}$  — длительность текущего временного интервала между двумя соседними импульсами ИДС.

Если временному интервалу  $T_n$  соответствуют  $m$  импульсов эталонной частоты  $f_0$ , то  $T_n = mT_0$ . Тогда значение текущей скорости электропривода в момент  $t = iT_0$  обратно пропорционально  $m$ :

$$\omega[iT_n] = \frac{1}{m} \frac{2\pi}{zT_0}. \quad (3.48)$$

Обратно пропорциональная зависимость скорости от числа  $m$  является недостатком этого способа измерения скорости. Для получения прямо пропорциональной зависимости применяют спе-

циальные цифровые устройства преобразования. Достоинством этого способа является его большая информативность, определяемая возможностью получения более высокой частоты дискретизации системы. Временной интервал  $T_n$  может быть сведен в пределе к временному интервалу  $T_{дсi}$  ИДС. Точность стабилизации скорости электропривода при втором способе измерения может быть более высокой, чем при первом.

Дальнейшее повышение точности измерения скорости может быть достигнуто, если измерять временные интервалы не между двумя соседними импульсами ИДС, а между импульсами задающей эталонной частоты  $f_3$  и соответствующими импульсами ИДС частоты  $f_{дс}$  при абсолютном равенстве усредненной частоты  $f_{дс}$  и частоты  $f_3$ .

Такой способ соответствует измерению отклонения текущего углового или линейного перемещения относительно заданного значения за временной интервал  $T_3 = 1/f_3$ . Формирование последовательности импульсов задающей частоты  $f_3$  можно рассматривать в этом случае как способ задания линейно-изменяющегося во времени перемещения, что является эквивалентным заданию постоянства скорости. Измерение текущего отклонения временного интервала  $T_{дсi}$  от временного интервала  $T_3 = \text{const}$  выполняют с помощью фазовых дискриминаторов.

Временной интервал  $T_{дсi}$  между импульсами цепи обратной связи зависит от мгновенной скорости электропривода, а временной интервал импульсов задания  $T_3$  считается постоянной величиной. Временной интервал между задающими импульсами и импульсами обратной связи пропорционален мгновенному значению разности фаз  $\Delta\varphi$  импульсов в момент времени  $t = iT_3$ :

$$\tau[iT_3] = \frac{1}{2\pi f_3} \Delta\varphi[iT_3]. \quad (3.49)$$

После окончания цикла счета формируется код числа, пропорционального  $\Delta\varphi[iT_3]$ :

$$N[iT_3] = \frac{f_0}{2\pi f_3} \Delta\varphi[iT_3]. \quad (3.50)$$

**Информационные преобразователи перемещений.** Такие преобразователи показаны в составе систем управления движением механизмов на функциональных схемах (рис. 3.17). К основным видам информационных преобразователей относятся фазовые, амплитудные, импульсные и кодовые преобразователи. Название преобразователя используют также и для названия системы управления, его содержащей.

На рис. 3.17, а показана функциональная схема фазовой системы. Последовательность импульсов  $n$  преобразуется в фазовом преобразователе ФП в сдвиг фазы  $\alpha$  сигнала задания  $u_3 = U_m \sin(\omega t + \alpha)$  относительно опорного напряжения  $u_0 = U_m \sin \omega t$ , где  $U_m$  — амплитуда сигнала.

литуда опорного напряжения;  $\alpha = 360^\circ n/z$ ,  $n$  — число поступивших импульсов,  $z$  — коэффициент деления ФП (число импульсов, сдвигающих фазу на  $360^\circ$ ).

Если импульсы следуют непрерывно с частотой  $f$ , то  $n = ft$  и, следовательно,  $\alpha = 360(f/z)t = \Omega t$ , где  $\Omega = 360f/z$ . На выходе ФП получается не частота  $\omega$ , а  $\omega + \Omega$  или  $\omega - \Omega$  в зависимости от направления движения. Отклонение частоты пропорционально скорости движения механизма.

В качестве датчика положения ДП в системе можно использовать вращающийся трансформатор или индуктосин, работающий в режиме фазовращателя. На первичные (статорные) обмотки датчика подаются два синусоидальных напряжения с постоянной амплитудой, но сдвинутые по фазе на  $\pi/2$ ,  $u_1 = U_m \sin \omega t$ ,  $u_2 = U_m \cos \omega t$ . На выходе ДП получается сигнал переменного тока  $u_{oc} = U_m \cos(\omega t + \beta)$ , сдвиг фазы  $\beta$  которого равен углу поворота его ротора и связан с линейным перемещением  $s$  механизма Мх выражением  $s = \beta L/360^\circ$ , где  $L$  — шаг измерительной системы. Связь угла  $\beta$  с перемещением  $s$  выполняется приборным передаточным механизмом ПМП. В частном случае ПМП может отсутствовать.

В качестве сравнивающего устройства в системе применен фазовый дискриминатор ФД, выполняющий функцию множительного устройства. В результате перемножения сигналов  $u_3$  и  $u_{oc}$  получается сигнал ошибки  $\varepsilon = U_m^2 \sin(\omega t + \alpha) \cos(\omega t + \beta) = 0,5 U_m^2 \sin(\alpha - \beta) + 0,5 U_m^2 \sin(2\omega t + \alpha + \beta)$ . Вторая часть сигнала ошибки отфильтровывается инерционной частью привода. В итоге  $\varepsilon \approx 0,5 U_m^2 \sin(\alpha - \beta)$ . Сигнал ошибки далее преобразуется блоком управления движением механизма БУДМ в линейное  $s$  или угловое  $\varphi$  перемещение механизма Мх.

В любых режимах работы системы управления должно выполняться неравенство  $(\alpha - \beta) < \pm 90^\circ$ , иначе механизм дискретно сместится на расстояние, равное половине шага системы. При использовании триггерных ФД диапазон допустимых изменений разности углов расширяется:  $(\alpha - \beta) < \pm 180^\circ$ . В этом случае при нарушении неравенства дискретное смещение происходит на шаг  $L$  системы.

В амплитудной системе (см. рис. 3.17, б) последовательность импульсов  $n$  преобразуется в амплитудном преобразователе АП в два переменных напряжения  $u_1$  и  $u_2$  одинаковой фазы, амплитуды которых меняются в соответствии с функциями  $\sin \alpha$  и  $\cos \alpha$ :

$$u_1 = U'_m \sin \omega t = U_m \sin \alpha \sin \omega t; \quad (3.51)$$

$$u_2 = U''_m \sin \omega t = U_m \cos \alpha \sin \omega t. \quad (3.52)$$

Как и в фазовой системе,  $u_0 = U_m \sin \omega t$ . Напряжения  $u_1$  и  $u_2$  подаются на два входа статорных обмоток вращающегося трансформатора (или индуктосина), чем обеспечивается амплитудный (трансформаторный) режим работы датчика. В результате в статоре обра-



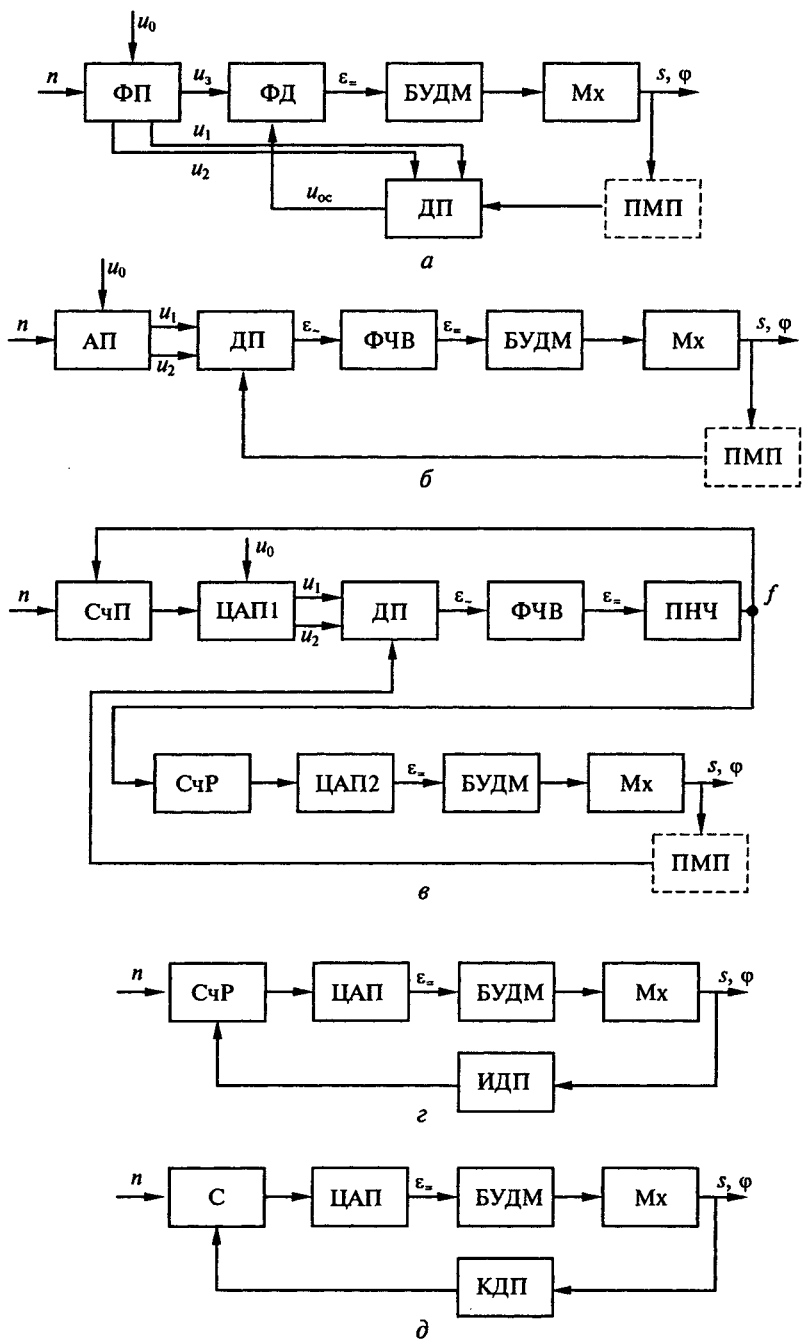


Рис. 3.17

зуется переменное магнитное поле, направление вектора индукции которого определяется углом  $\alpha$ . При непрерывном поступлении импульсов  $n$  вектор индукции вращается с угловой скоростью, пропорциональной частоте импульсов. Датчик положения в амплитудной схеме выполняет одновременно функции измерителя рассогласования. При механическом перемещении ротора датчика на угол  $\beta$  на выходной обмотке датчика наводится переменная ЭДС  $\epsilon_- = U_m \sin(\alpha - \beta) \sin \omega t$ , являющаяся сигналом ошибки. Если входом БУДМ является сигнал постоянного тока, то  $\epsilon_-$  преобразуется с помощью фазочувствительного выпрямителя ФЧВ. С учетом отфильтровывания высокочастотной составляющей сигнала  $\epsilon_- \approx U_m \sin(\alpha - \beta)$ . Как и в фазовой системе,  $(\alpha - \beta) < \pm 90^\circ$ . Амплитудные системы используются чаще для реализации позиционных режимов, в которых требуется получить высокую точность измерений.

Так как фазовые и амплитудные системы обладают малым диапазоном допустимых рассогласований углов  $\alpha$  и  $\beta$ , то для его расширения в сравнивающих устройствах применяют компенсационные контуры в виде быстродействующих электронных следящих систем. Рассмотрим такой контур на примере амплитудной системы (см. рис. 3.17, в), в которой в качестве ДП используется вращающийся трансформатор (ВТ).

На вычитающий вход реверсивного счетчика положения СчП поступают импульсы частоты  $f$ , а на суммирующий вход — импульсы задания  $n$ , число которых пропорционально заданному перемещению. Цифро-аналоговый преобразователь ЦАП1 формирует напряжения  $u_1$  и  $u_2$ , вид которых аналогичен напряжениям в системе, показанной на рис. 3.17, б. Сигнал  $\epsilon_-$  преобразуется преобразователем «напряжение — частота» ПНЧ в сигнал частоты  $f$ . Число импульсов частоты  $f$  подсчитывается счетчиком рассогласования СчР и в ЦАП2 преобразуется в сигнал  $\epsilon'_-$ , управляющий приводом.

Если разомкнуть обе обратные связи (главную по  $s$  и компенсационную по  $f$ ), то при подаче некоторого числа импульсов  $n$  вектор магнитной индукции в ДП (ВТ) поворачивается с помощью СчП и ЦАП1 на угол  $\alpha$ . При этом угол  $\beta$  имеет произвольное положение. Появившиеся сигналы рассогласования  $\epsilon_-$  и  $\epsilon_+$  преобразуются в импульсы частоты  $f$ . Если замкнуть компенсационную обратную связь, то эти импульсы через СчП и ЦАП1 скомпенсируют разность  $\alpha - \beta$ , и сигналы  $\epsilon_-$  и  $\epsilon_+$  станут равны нулю. Выдача импульсов с ПНЧ прекратится. Счетчик СчР подсчитает число импульсов компенсаций, и ЦАП2 выполнит преобразование этого числа в напряжение  $\epsilon'_-$ . Если замкнуть главную обратную связь, то угол  $\beta$  начнет изменяться, возникнет ошибка  $\epsilon_-$  обратного знака, СчР будет уменьшать свою информацию до нуля, привод остановится при  $\alpha = \beta$ . Таким образом, при больших задающих воздействиях происходит динамическое уменьшение рассогласования благодаря быстродействующему компенсационному контуру и обеспечивается воз-

возможность работы системы управления в пределах заданных значений разности углов во вращающемся трансформаторе.

В импульсной системе (см. рис. 3.17, *з*) измерителем рассогласования является реверсивный счетчик СЧР, на суммирующий вход которого поступают импульсы задания  $n$ , а на вычитающий — импульсы с импульсного датчика положения ИДП. Цифровой сигнал, пропорциональный текущей разности импульсов, преобразуется ЦАП в сигнал ошибки  $\epsilon_{\pm}$ . Диапазон допустимых рассогласований определяется объемом СЧР. Если в фазовых и амплитудных системах этот диапазон, пересчитанный на линейные перемещения, не превышает нескольких миллиметров, то в импульсных системах он может быть доведен до десятков и сотен миллиметров. Опасность дискретных смещений приводов в таких системах отсутствует.

В качестве ИДП могут использоваться индуктосины, фотоэлектрические датчики и лазерные интерферометры. Последние имеют высокую разрешающую способность благодаря использованию в качестве измерительной шкалы электромагнитных колебаний в оптическом диапазоне длин волн примерно  $0,5 \dots 0,6$  мкм. Особенно эффективны такие датчики для контроля малых прецизионных перемещений механизмов и перемещений на большие расстояния (10...20 м и более) при сравнительно невысокой точности. Применение иных датчиков (индуктивных, фотоэлектрических) на больших расстояниях осложнено из-за необходимости стыковки нескольких измерительных линеек.

В кодовой системе (см. рис. 3.17, *д*) используется кодовый датчик положения КДП, преобразующий перемещение механизма в многозначное число, которое подается на вход измерителя рассогласования. Таким измерителем является сумматор С, содержащий реверсивный счетчик, в котором накапливаются импульсы задания, и сумматор кодов. Разность кодов задания и фактического перемещения преобразуется с помощью ЦАП в сигнал ошибки  $\epsilon$ .

Достоинством кодовой системы является возможность абсолютного измерения координат механизма. После внезапного кратковременного отключения питания в такой системе обеспечивается продолжение работы механизма с того места, на котором она была прервана. При отсутствии системы абсолютного отсчета после отключения питания необходимо установить механизм в некоторую фиксированную позицию, начиная с которой происходит управление движением механизма. От нее начинается относительный отсчет координаты механизма. В связи с возрастанием быстродействия и скоростей следящих систем чаще применяют одноотсчетные информационные преобразователи вместо преобразователей абсолютного отсчета, которые являются, как правило, более сложными, дорогими и менее быстродействующими.

## 3.6. Типовые режимы управления механизмами

### 3.6.1. Стабилизация, слежение, позиционирование

**Стабилизация.** Системы стабилизации скорости (ССС) электроприводов применяются в тех случаях, когда с заданной точностью необходимо поддерживать скорость движения исполнительных органов машин. Режимы работы ССС могут быть разнообразными в зависимости от режимов работы промышленных установок в технологическом процессе. Наиболее характерным является режим длительной работы электроприводов в установках с непрерывным технологическим процессом. К таким установкам относятся: непрерывные прокатные станы, бумагоделательные машины, установки для производства полимерных материалов, кордных тканей и др. Как правило, такие промышленные установки являются многодвигательными и содержат до нескольких десятков электроприводов.

Режимы работы ССС могут быть кратковременными при программном управлении скоростью в широких пределах. Стабилизация скорости в этих случаях является частным режимом на небольших временных интервалах. Это характерно для электроприводов ряда металлообрабатывающих станков, реверсивных прокатных станов.

При длительно-непрерывных режимах работы ССС особых требований к режиму пуска электроприводов нет. Режим пуска является вспомогательным. Систему стабилизации скорости проектируют, исходя в основном из условий обеспечения заданной точности стабилизации скорости в установившемся режиме. При этом важно исключить долговременные дрейфы в информационно-измерительных частях ССС, которые вызываются, главным образом, тепловыми процессами. В системах с кратковременным режимом работы требование к точности стабилизации скорости на одних интервалах времени может находиться в противоречии с требованием максимального быстродействия при изменении скорости на других интервалах.

Наиболее важным показателем ССС является *точность стабилизации*, о которой можно судить, например, по отклонению скорости  $\Delta\omega_{ст}$  в установившемся режиме после завершения переходного процесса при изменении статического момента или напряжения сети. Отношение отклонения  $\Delta\omega_{ст}$  к заданной скорости  $\omega_z$  определяет показатель статической точности ССС  $\Delta\omega_{ст}/\omega_z$ , который может быть также выражен в процентах. Показатель статической точности применяется в основном для оценки сравнительно «грубых» ССС. В современных системах управления электроприводами в качестве регуляторов используются модули контроллеров приводов, и не представляет особой сложности получать сколь

угодно малые статические ошибки по скорости, если регулятор скорости выполнять с интегральной составляющей. В связи с этим более важным показателем, характеризующим точность ССС, является показатель динамической точности, связанный с оценкой мгновенных отклонений скорости на различных временных интервалах.

Мгновенные отклонения скорости зависят от ряда факторов: динамических изменений момента сопротивления и напряжения сети; параметрических возмущений в электродвигателях, полупроводниковых преобразователях и кинематических передачах; погрешности измерения текущих значений скорости; помех в каналах управления. Если один из названных факторов более значим по сравнению с другими, то точность может быть оценена с учетом только этого фактора. В противном случае необходимо оценивать точность с учетом всех основных факторов, приводящих к нестабильности системы управления.

Динамическая точность может оцениваться по отношению мгновенного максимального отклонения  $\Delta\omega_{\text{мг}}$  или среднего квадратического отклонения  $\Delta\omega_{\text{срк}}$  к заданному значению скорости  $\omega_3$ . Вторая оценка полнее характеризует точность системы, так как она основана на статистических данных отклонений. По динамической точности ССС могут быть разделены на следующие группы: малой точности (больше 1... 5 %); средней (0,1... 1 %); точные (0,01... 0,1 %); высокоточные (менее 0,01 %).

В зависимости от требований к точности системы электропривода выполняют с различными информационными и управляющими устройствами. Применяются аналого-цифровые и цифровые устройства, в которых различным образом осуществляются ввод задания, измерение скорости и формирование алгоритмов управления. Имеется различие и в выполнении силовой части электроприводов — выборе полупроводникового преобразователя, электродвигателя, кинематической передачи. Например, для точных и высокоточных систем целесообразно выполнять электроприводы безредукторными с управлением от ШИМ-преобразователей. Для электроприводов малой и средней точности применимы редукторные электроприводы с управлением от иных преобразователей.

Существенным фактором в проектировании ССС является диапазон регулирования уровня скорости  $d = \omega_{\text{max}}/\omega_{\text{min}}$ , где  $\omega_{\text{max}}$ ,  $\omega_{\text{min}}$  — максимальная и минимальная скорости электропривода. По этому показателю системы электропривода разделяются на системы малого ( $d < 3$ ), среднего ( $3 < d < 50$ ) и широкого ( $d > 50$ ) диапазонов регулирования. В современных АСУ ЭП можно обеспечить диапазоны регулирования скорости до 100 000 и более.

При изменении скорости в широком диапазоне могут существенно меняться динамические характеристики возмущающих

воздействий и погрешности информационных устройств. В этих условиях ССС можно выполнять с перенастройкой структуры информационной и управляющей частей системы.

**Слежение и позиционирование.** Следящие и позиционные системы используются в электроприводах: промышленных манипуляторов и роботов, механизмов подач металлообрабатывающих станков, нажимных устройств прокатных станков, механизмов оборудования мониторинга и др. Характерным для таких приводов является наличие модулей измерения и регулирования положения. Общие принципы построения и расчета следящих и позиционных систем электроприводов изложены в работе [5]. В современных комплектных электроприводах реализация режимов слежения и позиционирования выполняется с помощью интеллектуальных модулей расширения контроллеров приводов.

Имеются и специализированные исполнения следящих и позиционных электроприводов, называемых *сервоприводами*.

Как известно, следящие режимы реализуются без ограничений выходных сигналов регуляторов положения и скорости, а позиционные — с ограничением этих сигналов. Программная реализация регуляторов предусматривает также анализ уровней сигналов задания и ошибок систем и их производных, границ допустимых значений переменных, коррекцию ограничений и другие дополнительные функции, обеспечивающие заданные или предельно-достижимые динамические свойства систем.

Позиционные режимы с прямоугольными временными диаграммами ускорений обеспечивают наибольшее быстроедействие, но не оптимальны по электропотреблению [22]. Они являются возбудителями полигармонических колебаний механизмов и источниками дополнительных погрешностей движения исполнительных органов. В связи с этим используют алгоритмы формирования треугольных, трапецеидальных или гармонических временных диаграмм ускорений при обработке заданных перемещений. Ухудшение быстрогодействия систем принципиального значения не имеет.

Применительно к линейным перемещениям на рис. 3.18, *а, б* показаны прямоугольные временные диаграммы ускорений  $a(t)$ , а также временные диаграммы скоростей  $v(t)$  и перемещений  $s(t)$  для режимов малых и больших позиционирований механизмов, на рис. 3.18, *в, г* — треугольные временные диаграммы ускорений для тех же режимов при допущении, что усилие сопротивлений равно 0.

При реализации систем с дискретными датчиками положения (например оптикоэлектронными) позиционирование выполняется с точностью до одной дискреты датчика. При этом в контроллере привода в соответствии с объемом задания и ограничениями на производные ускорения рассчитывается оптимальная траектория

движения механизма. Погрешность позиционирования в таких системах может быть сколь угодно малой. При использовании в качестве датчиков положения лазерных интерферометров эта погрешность может измеряться микромиллиметрами.

Наряду с этим имеются простые позиционные системы с большими перемещениями (метры и десятки метров), в которых в качестве датчиков положения используются путевые датчики (ПД), по сигналам которых устанавливаются заданные значения скоростей — нулевое, минимальное («ползучая» скорость), максимальное (номинальная скорость). Такие системы используются в транспортном и подъемно-транспортном оборудовании. Анализ всех составляющих суммарной погрешности позиционирования в такой системе дан в работе [21]. Остановимся на главных моментах этого анализа.

Установка ИО в требуемое фиксированное положение может обеспечиваться при нулевом значении напряжения на двигателе и включении механического тормоза. Команда на отключение двигателя поступает от ПД, установленного на некотором расстоянии от точки остановки. Так как положение ПД при работе остается неизменным, точность позиционирования полностью определяется условиями движения электропривода с момента поступ-

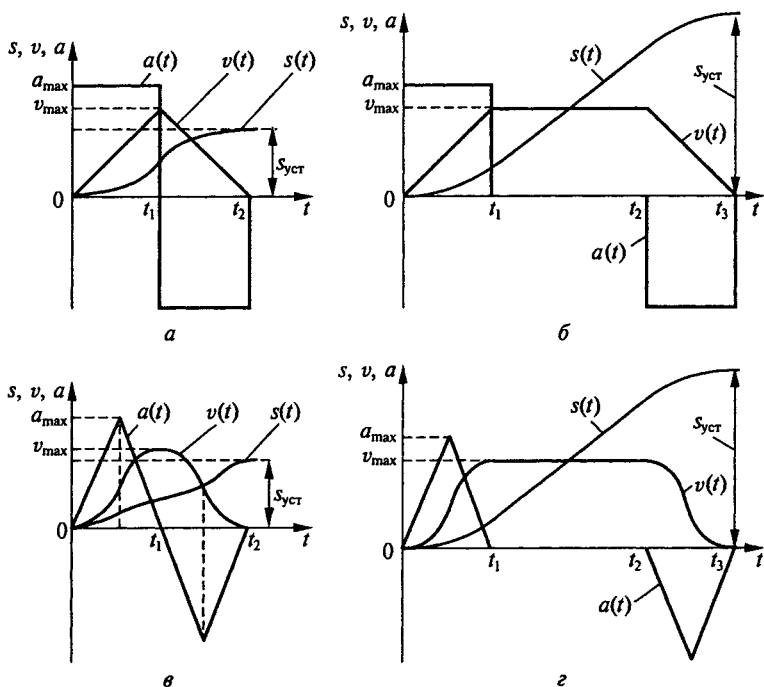


Рис. 3.18

ления в схему сигнала на отключение двигателя до момента полной остановки.

Если принять, что отключение двигателя и включение механического тормоза происходят одновременно и усилие тормоза возрастает до установленного значения скачком, то процесс остановки можно разделить на два этапа.

Первый этап обусловлен наличием собственного времени срабатывания ПД и аппаратуры  $t_a$  в схеме управления электроприводом. В течение времени  $t_a$  ИО механизма продолжает движение со скоростью  $v_n$ , с которой он подошел к ПД, и проходит путь

$$s' = v_n t_a. \quad (3.53)$$

По истечении времени срабатывания аппаратуры  $t_a$  двигатель отключается от сети и включается механический тормоз. Наступает второй этап процесса остановки, во время которого запасенная во всех поступательно и вращательно движущихся частях установки кинетическая энергия расходуется на совершение работы по преодолению сил статического сопротивления движению на проходимом при этом пути

$$s'' = v_n^2 / 2a, \quad (3.54)$$

где  $a$  — ускорение системы в процессе остановки.

Ускорение  $a = (F_T + F_{ст}) / m_\Sigma$ , где  $F_T + F_{ст}$  — суммарное усилие сопротивления движению, обусловленное моментом механического тормоза  $M_T$  и моментом статической нагрузки  $M_{ст}$ , приведенное к поступательному движению рабочего органа;  $m_\Sigma = J_\Sigma / \rho^2$  — суммарная масса движущихся частей установки, приведенная к поступательному движению ИО;  $J_\Sigma$  — приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции электропривода;  $\rho = v / \omega$  — радиус приведения;  $\omega$  — угловая скорость двигателя, соответствующая линейной скорости движения рабочего органа  $v$ .

Полный путь, пройденный рабочим органом механизма с момента поступления в схему импульса датчика до полной остановки,

$$s = v_n t_a + v_n^2 / 2a. \quad (3.55)$$

Величины  $t_a$ ,  $v_n$ ,  $J_\Sigma$ ,  $F_T$ ,  $F_{ст}$ , определяющие полный путь  $S$ , при работе механизма могут изменяться по различным причинам, поэтому остановка электропривода будет происходить с определенной погрешностью.

Параметр  $t_a$  представляет собой суммарное среднее значение времени срабатывания всех последовательно действующих в схеме управления аппаратов. Среднее время срабатывания для каждого аппарата указывается в справочной литературе, где оговаривается возможный разброс конкретных значений времени срабатывания. Для большинства аппаратов в среднем возможный разброс времени срабатывания составляет  $\pm (15 \dots 20) \%$  среднего времени срабатывания, поэтому относительное значение  $\Delta t / t_a = 0,15$



может быть с достаточной точностью принято в большинстве расчетов. Для уменьшения неточности останковки при проектировании схем автоматического управления подъемно-транспортными механизмами следует стремиться к уменьшению времени срабатывания аппаратуры  $t_a$ , для чего использовать быстродействующие аппараты и сокращать число последовательно действующих элементов схемы. При выполнении этого общего требования суммарное среднее время срабатывания аппаратуры в процессе проектирования задается.

Возможные значения статического усилия и приведенной массы установки полностью определяются конструктивными особенностями и режимом работы механизма. Для большинства подъемно-транспортных механизмов статические нагрузки изменяются в широких пределах, что является важнейшей причиной разброса значений пути торможения и соответствующей неточности останковки.

Тормозное усилие  $F_T$  при проектировании для повышения точности останковки выбирают возможно большим. Увеличение тормозного усилия увеличивает среднее ускорение при торможении и при прочих равных условиях уменьшает его относительные отклонения, так как тормозное усилие является более стабильным, чем другие параметры. Если для механизма характерны значительные пределы изменения статической нагрузки, усилие тормоза в расчетах можно полагать постоянным, принимая  $\Delta F_T = 0$ . Для механизмов с относительно мало меняющейся статической нагрузкой необходимо учитывать возможность изменения усилия тормоза на  $\pm(10 \dots 20)\%$  из-за ряда факторов, не поддающихся строгому учету (случайные изменения коэффициента трения, настройки тормоза и т. п.).

Возможности снижения неточности останковки за счет повышения усилия тормоза невелики вследствие необходимости ограничения максимального ускорения допустимым значением. Если принять, что при включении тормоза максимальное ускорение должно быть равно допустимому  $a_{\text{доп}}$ , то можно определить максимально допустимое усилие тормоза, которое в дальнейших расчетах является заданным:

$$F_{T\text{доп}} = m_{\Sigma} a_{\text{доп}} - F_{\text{стmax}}$$

С учетом перечисленных факторов реальные значения относительных отклонений ускорения  $\Delta a/a$  находятся в пределах  $0,1 \dots 0,5$  и являются существенными возмущениями, вызывающими неточность останковки.

Влияние средней остановочной скорости  $v_{\text{по}}$  и ее относительных отклонений на точность останковки зависят от пределов изменения нагрузки на валу двигателя и жесткости механической характеристики. Средняя остановочная скорость  $v_{\text{по}}$  наиболее значительно вли-

яет на максимальную неточность остановки. Из формулы (3.55) следует, что от средней остановочной скорости зависят среднее значение пути на первом этапе процесса остановки  $s'$  и путь торможения  $s''$ . Путь торможения  $s'$  зависит от квадрата остановочной скорости, поэтому уменьшение средней остановочной скорости эффективно снижает и максимальную неточность остановки.

Относительное отклонение остановочной скорости от среднего значения  $\Delta v/v_{n0}$  при данном значении  $v_{n0}$  также существенно влияет на точность остановки. Чем выше жесткость механической характеристики двигателя перед остановкой, чем более стабильна начальная скорость привода  $v_n$ , тем точность остановки выше. Для замкнутых систем с ПИ-регулятором скорости  $\Delta v/v_{n0} = 0$ .

При рассматриваемом способе остановки подбор необходимых значений  $v_{n0}$  и  $\Delta v/v_{n0}$  обеспечивает получение заданной точности остановки. В соответствии с этим остановка электропривода выполняется с использованием двух путевых датчиков. После срабатывания первого датчика привод переходит с номинальной скорости на минимальную. После срабатывания второго осуществляется остановка привода. Задачей проектирования точной остановки является определение требуемой средней остановочной скорости и жесткости механической характеристики при «дотягивании» к датчику точной остановки, исходя из заданной допустимой неточности остановки  $\Delta S_{\text{доп}}$ , которая для различных механизмов приведена ниже (мм):

Лифты скоростные, больничные и грузовые, загружаемые посредством напольного транспорта .....	10 ... 20
Лифты остальные .....	35 ... 50
Грузовые подъемники с вагонетками на рельсовом ходу .....	5 ... 10
Клетевые шахтные подъемники с качающимися площадками ...	50 ... 200
То же, с посадкой на кулаки .....	50 ... 100
Скиповые шахтные подъемники и маятниковые канатные дороги .....	200 ... 300
Механизмы передвижения мостовых кранов с автоматической установкой по заданным координатам при дистанционном управлении в специальных случаях .....	10

### 3.6.2. Программное управление

Управление сложными движениями ИО, включающими в себя цикловые, позиционные, контурные движения, выполняется устройством числового программного управления (ЧПУ). В состав современных устройств ЧПУ входят: модули связи с пользователем, средства чтения и трансляции управляющей программы, расшифровки кадров управляющих программ, интерполяции, расчета скоростей разгона и торможения, управления исполнительными механизмами.

В состав программного обеспечения (Про) ЧПУ входят прикладные и системные программные средства реального времени, объединенные проблемно-ориентированной базой данных.

В прикладное Про входят: программы обработки деталей и управления технологией, объединенные в библиотеку со своим каталогом; различные таблицы смещений, коррекций и инструментов; модули технологических расчетов, контроля, диагностирования и структурного программирования производственной среды. Прикладное Про направлено на решение конкретных задач, возложенных на систему ЧПУ, в пределах определенного технологического процесса. Программы обработки деталей и управления технологией объединяются в технологические управляющие программы (УП), составляющие основу прикладного Про. Эти программы, описывающие алгоритм функционирования оборудования при выполнении заданий пользователя, образованы упорядоченным множеством блоков — кадров, каждый из которых содержит данные, соответствующие выполнению одного технологического перехода или движению по одному из участков аппроксимации между опорными точками. В кадре содержится вся информация, необходимая для работы: длина обрабатываемого сегмента, скорость движения и его характер, команды на включение и выключение различных устройств.

Системное Про хранится в памяти устройства ЧПУ и организует взаимодействие прикладных программ с пользователем, устройством ЧПУ и технологическим оборудованием. Оно включает в себя операционную систему реального времени и пакет обрабатываемых программ — утилит, в которые входят программы, решающие задачи обработки прерываний и фоновые задачи обработки соответствующих массивов базы данных. Системное Про направлено на решение общих задач программного управления, не относящихся к конкретному технологическому процессу.

Выделяются четыре уровня программного управления:

уровень звена, на котором задаются параметры положения каждого звена в отдельности;

уровень оборудования, на котором движения описываются контуром изображающей точки в системе;

уровень объектов, на котором задание описывается в терминах перемещений и позиционирования объектов, находящихся в рабочем пространстве оборудования. Предполагается наличие модели технологической среды, предоставляющей информацию для определения нужных положений изображающей точки;

уровень целей, на котором задание описывается в обобщенной форме. Предполагается наличие не только модели технологической среды, но и сведений о технологических приемах.

Для интерпретации описанных заданий требуются адаптивные или интеллектуальные алгоритмы, использующие хранящу-

юся в базах данных информацию для построения оптимальной программы.

Наиболее часто применяется подготовка программ на входном языке системы с использованием клавиатуры пульта оператора. При этом текст УП заранее составляется пользователем на основании чертежей или схемы работ, а для ввода и отладки программы требуется определенное время. Технологическое оборудование в это время или не функционирует, или выполняет другую, ранее подготовленную и отлаженную программу.

Применяется также программирование обучением с использованием пульта-приставки специальной конструкции, или командное обучение, а также обучение «проводкой», или регенеративное обучение.

Важную роль в системах ЧПУ играет обработка исключительных ситуаций, т.е. ситуаций ошибки или сбоя, в которых дальнейшее выполнение программного управления недопустимо или нецелесообразно, например: арифметическое переполнение или ссылка на несуществующий элемент массива при выполнении вычислений, сбой в контроллере внешнего устройства или адаптере одной из магистралей, внешнее отключение от датчиков аварийных ситуаций.

В зависимости от категории исключительной ситуации возникновение ее должно приводить к аварийному останову исполнительных механизмов или предупредительному сообщению на пульт оператора. Программа обработки исключительных ситуаций после выполнения восстановительных операций восстанавливает управление или передает его пользователю. Принцип построения систем программного управления подробно рассмотрен далее (см. пп. 4.4.2 и 4.4.3).

### **3.6.3. Синхронизация скоростей и положений**

Синхронизация скоростей необходима в системах многодвигательных механизмов взаимосвязанных гибким материалом. На рис. 3.19 показаны три электропривода, но их может быть намного больше. Блоки управления скоростью БУС включают в себя необходимый набор силовых модулей и модулей управления, входящих в состав комплектного электропривода (см. гл. 2).

Общая скорость электроприводов задается сигналом  $v_{30}$ , поступающим на входы БУС через устройства задания соотношений скоростей УЗСС.

Можно включать УЗСС так, чтобы обеспечить следующие способы управления локальными электроприводами:

с последовательным (каскадным) управлением, когда с изменением скорости предыдущего электропривода изменяются в оп-

ределенном соотношении скорости последующих электроприводов (см. рис. 3.19, а);

параллельным (независимым) управлением (см. рис. 3.19, б);

комбинированным управлением, сочетающим в себе способы параллельного и последовательного управления.

Реализация этих способов выполняется с помощью специальных модулей контроллеров приводов. При этом один из приводов (в рассматриваемом случае первый) является ведущим, остальные — ведомыми. Устройство УЗС может входить в состав технологического модуля контроллера первого привода. В случае управления всеми электроприводами от технологического контроллера возможна реализация последовательного и параллельного управления средствами этого контроллера (см. п. 2.5).

Соотношения скоростей локальных электроприводов в общем виде определяются равенством

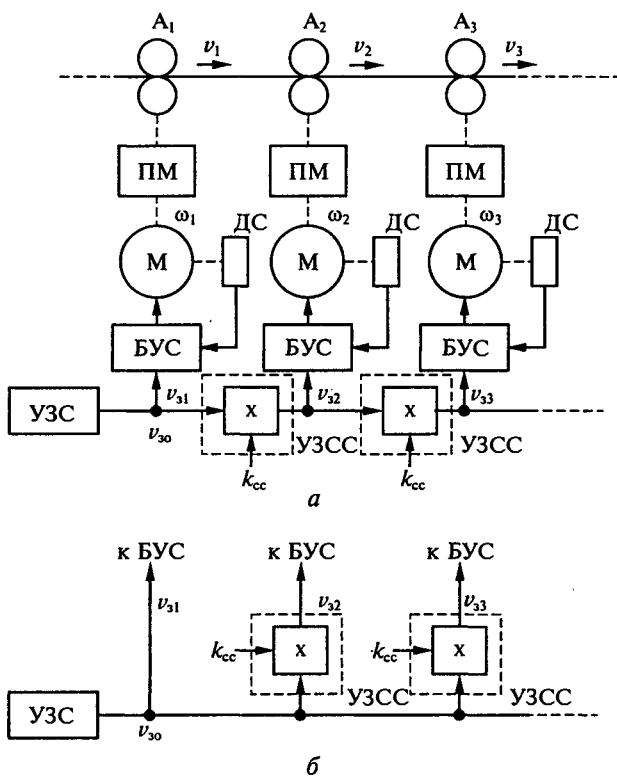


Рис. 3.19

$$\frac{\omega_{i+1}}{\omega_i} = \frac{v_{zi+1}}{v_{zi}} = k_{cci+1}, \quad (3.56)$$

где  $k_{cci+1}$  — коэффициент устройства задания соотношения скоростей, принимающий значения больше или меньше 1.

Требуемое значение коэффициента  $k_{cc}$  устанавливается. При изменении сигнала  $v_{30}$  (см. рис. 3.19, а) соответственно изменяются сигналы  $v_{32}$  и  $v_{33}$ :

$$v_{32} = k_{cc2}v_{30}; \quad (3.57)$$

$$v_{33} = k_{cc3}v_{32} = k_{cc3}k_{cc2}v_{30}. \quad (3.58)$$

В результате изменяются скорости всех локальных электроприводов, а соотношения скоростей остаются прежними. Если  $v_{30} = \text{const}$ , а  $v_{32}$  изменится путем изменения коэффициента соотношения скоростей  $k_{cc2}$ , то изменятся и все последующие сигналы задания  $v_{33}$ ,  $v_{34}$  и т. д., а следовательно, и скорости соответствующих локальных электроприводов. Влияние изменения  $k_{cc2}$  на предыдущий сигнал задания отсутствует.

При параллельном управлении локальными электроприводами УЗСС включаются независимо друг от друга (см. рис. 3.19, б) и изменение одного из сигналов задания не приводит к изменению других сигналов заданий. В такой схеме соотношения скоростей локальных электроприводов устанавливаются в соответствии с равенством

$$\frac{\omega_{i+1}}{\omega_i} = \frac{v_{zi+1}}{v_{zi}} = \frac{k_{cci+1}}{k_{cci}}, \quad (3.59)$$

где  $k_{cci} = v_{zi}/v_{30}$ ;  $k_{cci+1} = v_{zi+1}/v_{30}$ .

При изменении коэффициента соотношения скоростей одного из локальных электроприводов изменяется скорость только этого электропривода и, следовательно, соотношение скоростей двух рядом расположенных электроприводов. Соотношения скоростей остальных электроприводов остаются неизменными. Регулирование общей скорости всех электроприводов происходит так же, как и при последовательном управлении.

**Синхронизация положений** осуществляется в результате формирования общего задания на следящие электроприводы механизмов и коррекции текущих значений положений при изменении режима нагрузки одного из приводов. Рассмотрим систему управления положением двухдвигательного привода нажимно-устройства с синхронизацией движений нажимных винтов.

Функциональная схема системы автоматической синхронизации нажимных винтов показана на рис. 3.20. Электродвигатели М1, М2 через зубчатую передачу 2, 3 приводят во вращение нажимные винты 4, проходящие через неподвижно закрепленные на станине гайки 5. В зависимости от направления движения нажим-

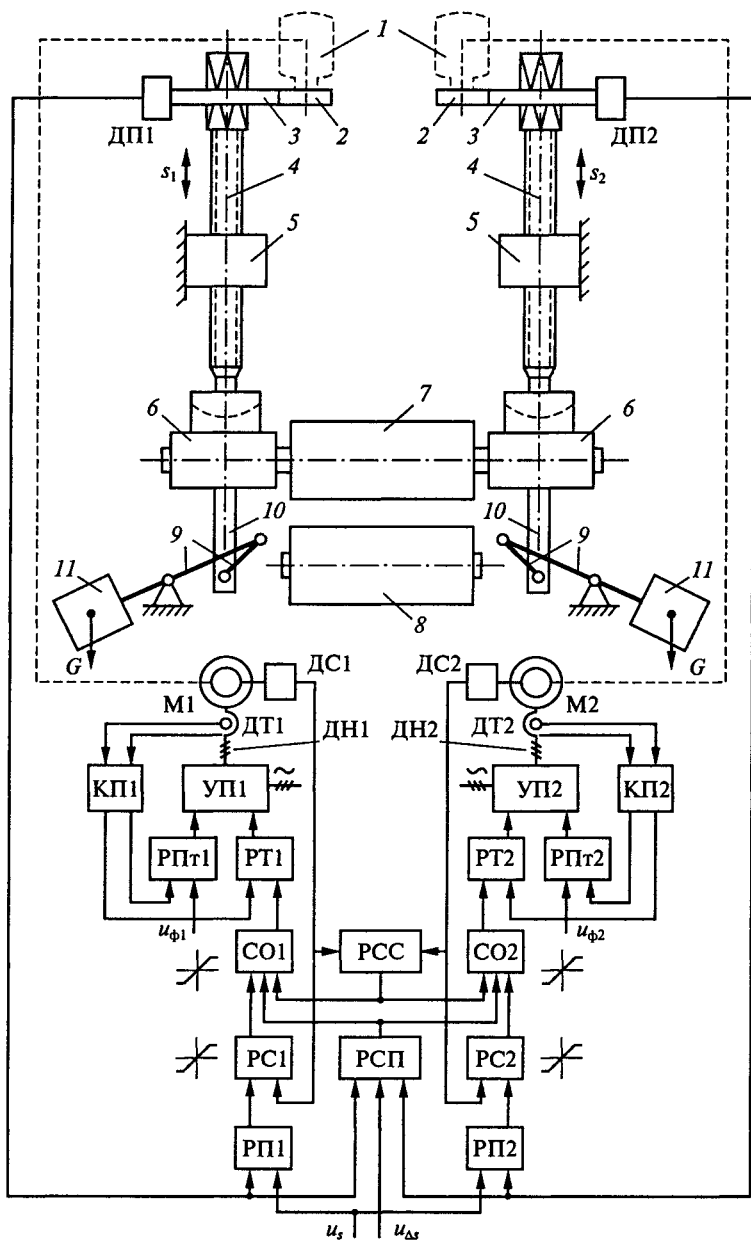


Рис. 3.20

ные винты поднимаются или опускаются, перемещая верхний валок 7 относительно нижнего валка 8. Подушки 6 постоянно прижаты к нажимным винтам, а винты — к гайкам с помощью уравновешивающих устройств. Уравновешивание достигается с помощью контргрузов 11, передающих через систему рычагов 9 и штанг 10 уравновешивающее усилие  $G$  на нижние подвески подушек верхнего валка. Электродвигатели конструктивно размещены в местах 1.

В системе синхронизации применены частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с векторным управлением. По информации, поступающей на координатные преобразователи КП1, КП2 от датчиков напряжения ДН1, ДН2 и тока ДТ1, ДТ2, вырабатываются сигналы, обеспечивающие управление потоками и активными составляющими токов с помощью регуляторов потока РПт1, РПт2 и тока РТ1, РТ2.

Движения нажимных винтов синхронизированы по положению и скорости. Система построена так, что управлению приводами по каналу электрической синхронизации отдается предпочтение перед управлением по каналу совместного перемещения. Совместное перемещение определяется задающим воздействием  $u_s$ , поступающим на входы регуляторов положения РП1, РП2. Сигнал ошибки синхронизации положений  $u_{\Delta s}$  подается на регулятор РСП, а от него на устройства сравнения и ограничения СО1 и СО2 с коэффициентом  $k_c$ . При ограниченном сигнале на выходе регуляторов скорости РС1, РС2 и достаточно большом  $k_c$  ограниченные сигналы значительно меньше приведенных сигналов по контуру синхронизации.

В случае ограничения выходных сигналов РС1, РС2 обратные связи по скорости оказываются разомкнутыми, поэтому для оптимальной отработки задания по каналу синхронизации вводится сигнал разности скоростей. Ограничения РС и СО выбираются равными, поэтому при ограничении сигнала РС сигнал ошибки по каналу синхронизации воздействует на скорость (снижает) опережающего двигателя.

Структурная схема системы автоматической синхронизации показана на рис. 3.21. Контур регулирования токов  $i_1$  и  $i_2$  представлены замкнутыми с передаточными функциями:

$$W_{3i1}(p) = \frac{i_1}{u_{co1}} \approx \frac{1/k_{дт1}}{T_{\mu\varepsilon1}p + 1}; \quad (3.60)$$

$$W_{3i2}(p) = \frac{i_2}{u_{co2}} \approx \frac{1/k_{дт2}}{T_{\mu\varepsilon2}p + 1}, \quad (3.61)$$

где  $T_{\mu\varepsilon1}$ ,  $T_{\mu\varepsilon2}$  — эквивалентные малые постоянные времени замкнутого контура тока.



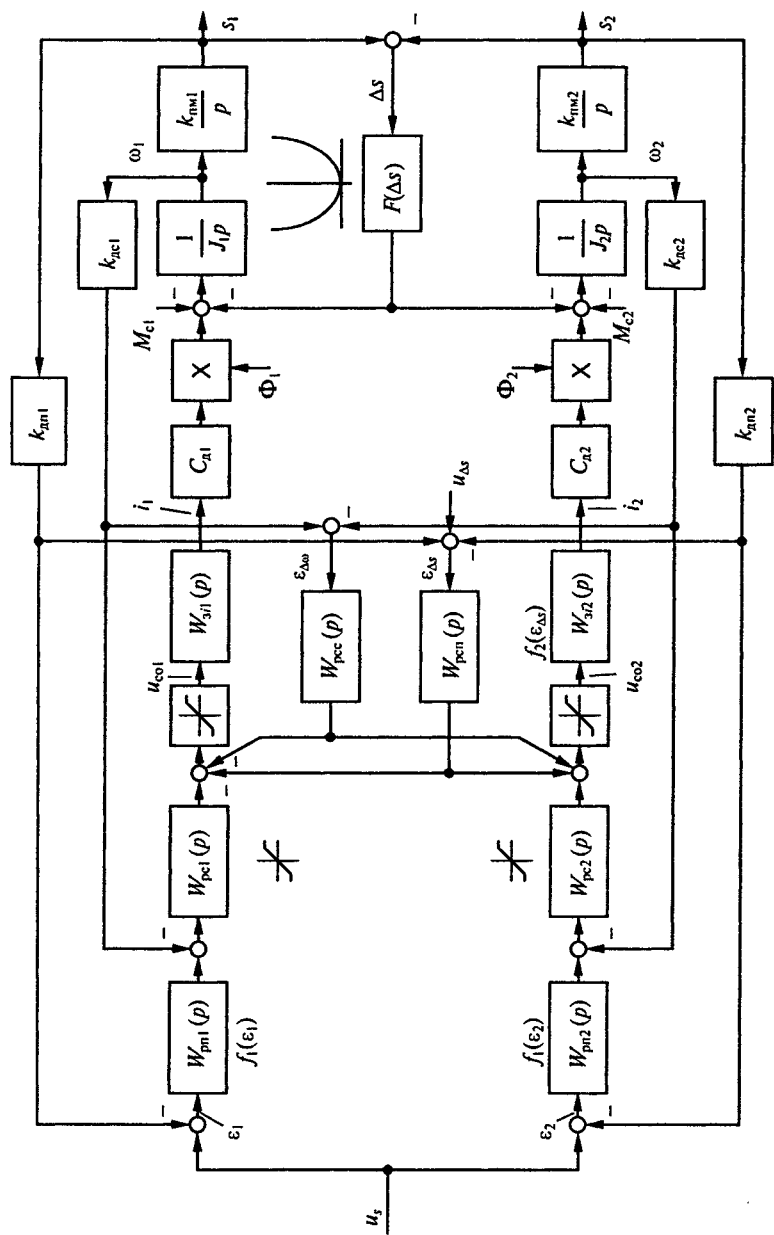


Рис. 3.21

Контуры регулирования потоков на схеме не показаны. Предполагается, что  $\Phi_1 = \Phi_2 = \text{const}$ . Начальное значение разности положений  $s_1, s_2$  может быть задано сигналом  $u_{\Delta}$ .

Упругие деформации в приводах и механизмах нажимных устройств не учитываются.

Техническая реализация системы синхронизации выполнена на базе комплектных электроприводов.

### 3.6.4. Управление нагрузкой электроприводов

**Управление нагрузкой многодвигательных электроприводов.** Для многодвигательных электроприводов механизмов, имеющих жесткие кинематические взаимосвязи, существует задача управления нагрузкой каждого электропривода при одинаковой скорости их движений. В длинных конвейерных линиях (рис. 3.22) три электропривода ЭП и одно или два натяжных устройства обеспечивают движение конвейерной линии со скоростью  $v$ . Электроприводы с учетом потерь в линии распределены так, чтобы равномерно создавать усилие в ленте. Приводы могут создавать разные усилия (моменты) в зависимости от топологии линии и значения потерь в ней.

Аналогична ситуация в прессовой части бумагоделательной машины, где несколько электроприводов связаны прессовыми валами и натянутой сеткой.

Функциональная схема системы управления нагрузкой электроприводов показана на рис. 3.23. Один из приводов выбирается ведущим и в нем реализуется типовая система регулирования скорости с блоком управления моментом БУМ и регулятором скорости РС с ограничением выходного сигнала. С учетом задания  $v_3$  привод обеспечивает скорость  $v$  движения ИО. Ведомые электроприводы с ИО, совершающие движения с той же скоростью  $v$ , управляются только по заданиям моментов  $M_{32}$  и  $M_{33}$ . Задания устанавливаются с помощью устройств заданий моментов УЗМ так, как это выполнялось в случае независимого управления соотношением скоростей. Устанавливая конкретные значения коэффициентов соотношения моментов  $k_{см}$ , обеспечивают соответствующие им нагрузки электроприводов.

При суммарной нагрузке электроприводов, превышающей допустимое значение, т.е. при перегрузке электропривода, происходит ограничение значения выходного сигнала РС и наступает режим стопорения механизмов. Каждый из приводов развивает

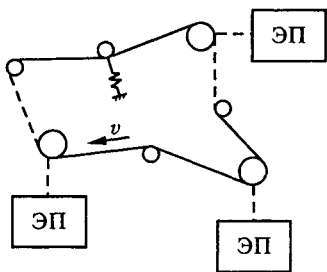


Рис. 3.22

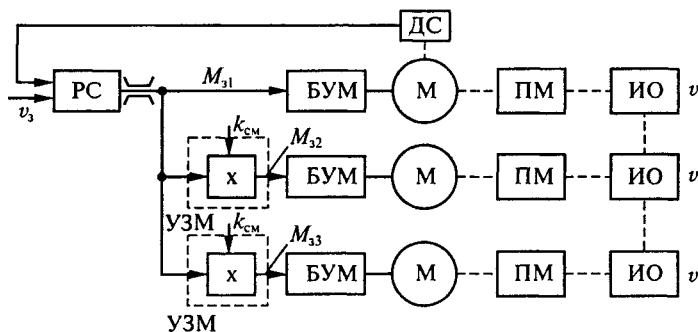


Рис. 3.23

предельный момент с учетом коэффициента  $k_{CM}$ , но механизмы останавливаются, т.е.  $v = 0$ .

**Ограничение механических перегрузок электроприводов [21].** Механические перегрузки являются важной особенностью рабочих режимов для большинства общепромышленных механизмов циклического действия. Для механизмов передвижения на рельсовом ходу они обусловлены перекасами при большом пролете крана или ветровой нагрузкой, если сооружение работает под открытым небом. Перегрузки крюковых подъемных лебедок могут возникать при подхвате примерзшего или заклиненного груза. Наиболее тяжелые и частые механические перегрузки возникают у тех механизмов, для которых при нормальном течении технологического процесса возможна работа на упор — механическое стопорение исполнительного органа (ИО).

Систематическими механическими перегрузками и механическими стопорениями сопровождается работа всех механизмов, участвующих в процессе черпания грунта или перемещения материала: напорных, подъемных и тяговых лебедок экскаваторов и грейферных кранов. При работе в мягких грунтах перегрузки могут достигать опасных значений, но нарастают постепенно. Такие режимы называют мягкими стопорениями. При черпании скальной породы экскаватором или смерзшегося транспортируемого грунта грейферным краном возможны внезапные заклинивания ИО — так называемые резкие стопорения.

Во всех случаях, когда возникающие по любой причине механические перегрузки превосходят перегрузочную способность привода и допустимую нагрузку механизма, должно обеспечиваться автоматическое ограничение момента, развиваемого двигателем, допустимым значением. Допустимый момент двигателя определяется максимально допустимой нагрузкой механизма по условиям его механической прочности. Его кратность относительно номинального момента не должна превышать перегрузочной способности двигателя. Выбранное из этих условий значение момента в

дальнейшем будем называть *допустимым стопорным моментом*  $M_{\text{стоп}}$ .

Требования к системе ограничения момента для разных механизмов различны. Если опасные перегрузки представляют собой несистематическое, редкое явление, система может действовать как защитное устройство, вызывающее отключение привода и перерыв в работе механизма. Примером может служить максимальная защита двигателя, отключающая его от сети с помощью контактора или автомата при токе, превышающем номинальный в 2...2,5 раза.

Однако подобные устройства неприменимы для механизмов, работа которых систематически сопровождается перегрузками и стопорениями. В таких случаях должно предусматриваться автоматическое ограничение момента, не вызывающее перерывов в работе механизма, которые недопустимо снизили бы его производительность. Непрерывное ограничение момента может быть осуществлено электрически или механически.

Электрическое непрерывное ограничение момента достигается использованием электропривода с экскаваторной механической характеристикой. Оно широко применяется не только для ограничения механических перегрузок, но и для формирования переходных процессов пуска, реверса и торможения. Качество ограничения момента обычно характеризуется заполнением экскаваторной характеристики, которое тем больше, чем жестче ее рабочий участок и чем круче падающий. Идеальная экскаваторная характеристика 1 и реальные экскаваторные характеристики 2 и 3 с разным заполнением показаны на рис. 3.24. При достаточно высокой жесткости рабочего участка реальных характеристик их заполнение может оцениваться так называемым коэффициентом отсечки

$$k_{\text{отс}} = M_{\text{отс}}/M_{\text{стоп}}. \quad (3.62)$$

Для выяснения основных физических особенностей режимов резких стопорений проанализируем переходный процесс электропривода подъема экскаватора-лопаты, вызванный внезапной остановкой ковша при столкновении с невзорванной скалой.

Примем, что момент  $M$  двигателя в переходном процессе изменяется в соответствии с механической характеристикой 2 на рис. 3.24 и единственным упругим элементом схемы является подъемный канат. В соответствии с расчетной схемой (рис. 3.25, а), пренебрегая имеющимися в механизме силами трения, можно записать:

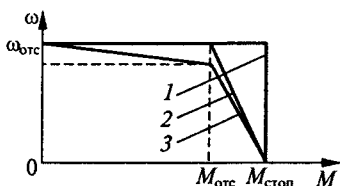


Рис. 3.24

$$M - M_{12} = J_1 \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.63)$$

Здесь  $M_{12} = c_{12}\varphi$  — приведенный к валу двигателя момент, создаваемый на барабане натяжением каната, где  $c_{12}$  — приведенная к валу двигателя жесткость каната,  $\varphi$  — приведенное к валу двигателя удлинение каната;  $J_1$  — приведенный к валу двигателя момент инерции электропривода.

Уравнение падающего участка экскаваторной характеристики

$$M = M_{\text{стоп}} - \frac{M_{\text{стоп}} - M_{\text{отс}}}{\omega_{\text{отс}}} \omega = M_{\text{стоп}} - \beta\omega, \quad (3.64)$$

где  $\beta = M_{\text{стоп}}(1 - k_{\text{отс}})/\omega_{\text{отс}}$  — модуль жесткости падающего участка механической характеристики.

Подставив выражения для  $M_{12}$  и  $M$  в формулу (3.63) и продифференцировав его, получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{\beta}{J_1} \frac{d\omega}{dt} + \frac{c_{12}}{J_1} \omega = 0. \quad (3.65)$$

Корни характеристического уравнения

$$p_{1,2} = -\frac{\beta}{2J_1} \pm \sqrt{\frac{\beta^2}{4J_1^2} - \frac{c_{12}}{J_1}} = -\alpha \pm j\Omega, \quad (3.66)$$

так как обычно  $\beta^2/4J_1^2 < c_{12}/J_1$ ;  $\Omega$  — частота упругих колебаний.

Решение уравнения относительно скорости двигателя необходимо искать в виде

$$\omega = e^{-\alpha t}(A \sin \Omega t + B \cos \Omega t), \quad (3.67)$$

где  $A$  и  $B$  — постоянные интегрирования.

Примем, что в момент начала стопорения инерционные массы привода движутся со скоростью  $\omega_{\text{нач}} = \omega_{\text{отс}}$  и  $M = M_{12} = M_{\text{отс}}$ . Подставляя начальные условия  $(\omega)_0 = \omega_{\text{нач}}$  и  $(d\omega/dt)_0 = 0$  при  $t = 0$ , определяем постоянные интегрирования:

$$A = \alpha\omega_{\text{нач}}/\Omega; \quad B = \omega_{\text{нач}}. \quad (3.68)$$

Решение уравнения после подстановки постоянных интегрирования и преобразований приобретает вид

$$\omega = \omega_{\text{нач}} \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{\Omega}\right)^2} e^{-\alpha t} \sin(\Omega t + \Psi_1), \quad (3.69)$$

где  $\Psi_1 = \text{arctg} \Omega/\alpha$ .

Решение исходного дифференциального уравнения относительно момента  $M_{12}$ , пропорционального натяжению каната и характеризующего нагрузку механической части привода, следует искать в виде

$$M_{12} = M_{\text{стоп}} + e^{-\alpha t}(C \sin \Omega t + D \cos \Omega t), \quad (3.70)$$

где  $C$  и  $D$  — постоянные интегрирования.

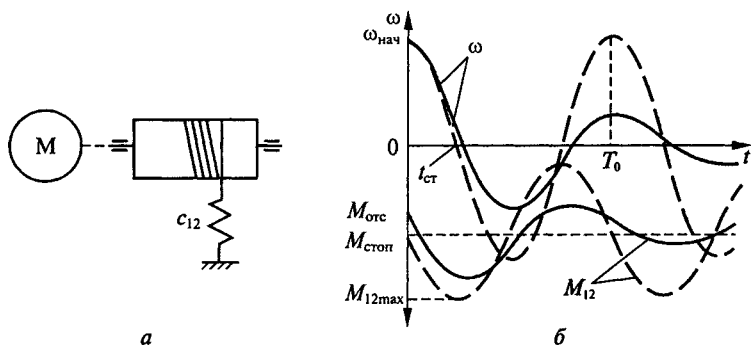


Рис. 3.25

С помощью начальных условий  $(M_{12})_0 = M_{отс}$ ,  $(dM_{12}/dt)_0 = c_{12}\omega_{нач}$  определяем постоянные

$$C = \frac{c_{12}\omega_{нач} - \alpha(M_{стоп} - M_{отс})}{\Omega}; \quad (3.71)$$

$$D = -(M_{стоп} - M_{отс}). \quad (3.72)$$

После преобразований с учетом, что

$$M_{стоп} - M_{отс} = \beta\omega_{отс} = \beta\omega_{нач}, \quad (3.73)$$

решение уравнения относительно  $M_{12}$  приобретает вид

$$M_{12} = M_{стоп} + \omega_{нач}\beta \sqrt{1 + \left(\frac{c_{12} - \alpha\beta}{\beta\Omega}\right)^2} e^{-\alpha t} \sin(\Omega t - \Psi_2), \quad (3.74)$$

$$\text{где } \Psi_2 = \text{arctg} \frac{\beta\Omega}{c_{12} - \alpha\beta}. \quad (3.75)$$

Полученным аналитическим зависимостям (3.69) и (3.70) соответствуют изображенные на рис. 3.25, б сплошными линиями кривые  $\omega$ ,  $M_{12} = f(t)$ . Штриховые линии соответствуют процессу стопорения при  $\beta = 0$ , т.е. при идеальной экскаваторной характеристике 1 (см. рис. 3.24). В этом случае процесс стопорения протекает при  $M = M_{стоп} = \text{const}$ , и уравнения (3.66), (3.69), (3.70) упрощаются:

$$\omega = \omega_{нач} \cos \Omega_0 t; \quad (3.76)$$

$$M_{12} = M_{стоп} + \frac{c_{12}\omega_{нач}}{\Omega_0} \sin \Omega_0 t, \quad (3.77)$$

где  $\Omega_0 = \sqrt{c_{12}/J_1}$  — частота свободных колебаний упругой механической системы.

Пропорциональный усилию в канате момент  $M_{12}$  возрастает (см. рис. 3.25, б) по мере снижения скорости, так как запасенная в останавливающихся инерционных массах кинетическая энергия, освобождаясь, переходит в потенциальную энергию упругого растяжения каната. Наличие избыточного запаса потенциальной энергии при  $\omega = 0$  является причиной, вызывающей разгон барабана и связанных с ним частей в противоположную сторону. Поэтому процесс стопорения имеет колебательный характер, причем при идеальной экскаваторной характеристике теоретически в соответствии с формулами (3.76) и (3.77) колебания являются незатухающими. Практически вследствие неучтенных потерь на трение энергия упругих колебаний в этом случае рассеивается в виде теплоты в трущихся элементах, но медленнее, чем при  $\beta \neq 0$ .

Полученные зависимости свидетельствуют о том, что при ограниченном экскаваторной характеристикой моменте двигателя  $M \leq M_{\text{стоп}}$  максимальные нагрузки элементов привода в процессе стопорения увеличиваются из-за динамической нагрузки и при неблагоприятных условиях могут достигать опасных значений. Без учета затухания максимальное значение момента  $M_{12}$  определяется из формулы (3.77):

$$M_{12\text{max}} = M_{\text{стоп}} + \omega_{\text{нач}} \sqrt{J_1 c_{12}}. \quad (3.78)$$

Отношение максимальной нагрузки к установившейся определяет динамический коэффициент

$$k_{\text{дин}} = \frac{M_{12\text{max}}}{M_{\text{стоп}}} = 1 + \omega_{\text{нач}} \frac{\sqrt{J_1 c_{12}}}{M_{\text{стоп}}}, \quad (3.79)$$

который характеризует перегрузки механической части электропривода при резких стопорениях по сравнению с установившимся режимом стопорения. Из формулы (3.79) следует, что перегрузки тем больше, чем больше начальная скорость  $\omega_{\text{нач}}$ , момент инерции  $J_1$  и жесткость рабочего оборудования  $c_{12}$ .

Сравнивая формулы (3.70) и (3.77), а также соответствующие характеристики (см. рис. 3.25), можно убедиться, что при уменьшении коэффициента отсечки (увеличение  $\beta$ ) затухание колебаний увеличивается. Как уже отмечалось, линейная связь момента двигателя со скоростью аналогична вязкому трению ( $M_{\text{тр}} = \beta\omega$ ) и оказывает демпфирующее действие, способствуя быстрому затуханию колебаний. Увеличение затухания влечет за собой некоторое уменьшение динамического коэффициента, поэтому для подъемных лебедок экскаваторов-лопат и грейферных кранов желательна характеристика с коэффициентом отсечки  $k_{\text{отс}} = 0,7 \dots 0,8$  (характеристика 3 на рис. 3.24). Такая форма экскаваторной характеристики одновременно уменьшает частоту стопорений, так как обеспечивает заблаговременное снижение скорости при механической перегрузке еще до достижения стопорной нагрузки. По снижению

скорости машинист оценивает нагрузку двигателя и своевременно предпринимает действия, направленные на уменьшение перегрузки, например уменьшает напорное усилие экскаватора-лопаты при перегрузке электропривода подъема.

Чем тяжелее условия стопорения, чем больше жесткость механического оборудования  $c_{12}$ , тем меньший коэффициент отсечки нужно иметь. В этом отношении наиболее характерен механизм напора экскаватора-лопаты с реечной передачей, которая дает весьма жесткое соединение рукояти с приводом. Из-за большой жесткости  $c_{12}$  в данном случае процессы резких стопорений носят характер тяжелых ударов с опасными значениями динамического коэффициента. Для этого механизма выбирают  $k_{отс} = 0,6 \dots 0,7$  и для защиты от поломок в его кинематическую цепь вводят муфту предельного момента, настроенную на срабатывание при  $M = (1,2 \dots 1,4)M_{стоп}$ .

Если экскаваторная характеристика предусматривается только для ограничения момента в переходных процессах, то для получения их равномерно ускоренного протекания нужно более высокое заполнение. Оптимальным является  $k_{отс} = 1$ , соответствующий характеристике  $I$  на рис. 3.24.

### 3.6.5. Технологические функции управления механизмами

Развитие микропроцессорных средств управления существенно расширило функциональные возможности контроллеров приводов. Интеллектуальные технологические модули контроллеров обеспечивают решение разнообразных технологических задач, включая задачи регулирования наиболее часто встречающихся технологических переменных: подачи, давления, уровня, натяжения, толщины и др. Технологические контроллеры, освобожденные от функций регулирования указанных переменных, только координируют работу сепаратных систем управления, что делает систему управления технологическими агрегатами более простой.

Рассмотрим технологические функции управления механизмами напускного устройства бумагоделательной машины (рис. 3.26). Напускное устройство обеспечивает равномерную и задаваемую по весу подачу бумажной массы из напорного ящика через выпускной клапан на движущуюся со скоростью  $v$  сетку машины. В соответствии с заданным весом  $1 \text{ м}^2$ , толщиной бумажного полотна на выходе машины и скоростью машины в напускном устройстве устанавливается заданный размер щели  $S$  выпускного клапана, а также давление  $p$  и уровень бумажной массы  $L$  внутри напорного ящика. Регулирование указанных переменных осуществляется средствами автоматизированных электроприводов.

Блоки управления скоростью (БУС) электроприводов включают в себя базовую часть силовых модулей и модулей управления



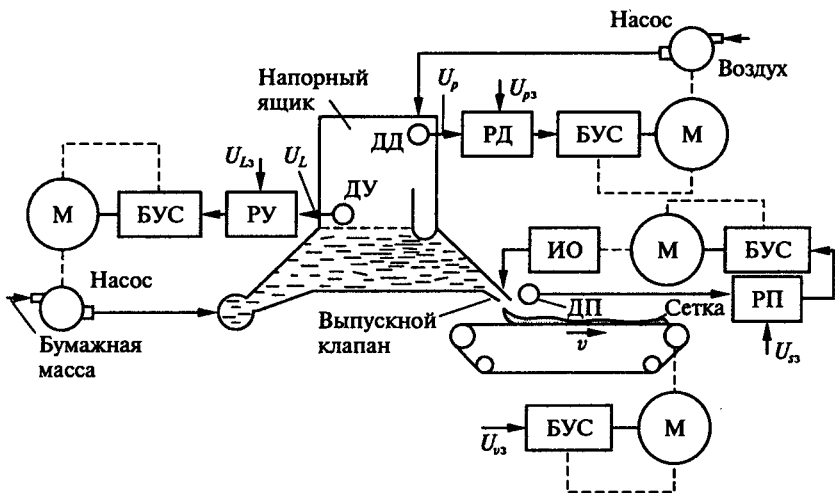


Рис. 3.26

комплектных электроприводов. Регуляторы уровня РУ, давления РД и положения клапана РП реализуются на технологических модулях контроллеров приводов. Измерение переменных осуществляется датчиками ДУ, ДД, ДП. Координацию значений задающих сигналов, подающихся на регуляторы,  $U_{L3}$ ,  $U_{p3}$ ,  $U_{с3}$ ,  $U_{v3}$  выполняет технологический контроллер. Подробно работа таких систем рассмотрена в гл. 4 и 5.

### 3.7. Механотронные модули в системах управления движением

В соответствии с тенденцией сокращения механических узлов в электроприводах машин и механизмов стремятся к объединению в единое целое электродвигателя и исполнительного органа машины. Этим повышают качество и производительность механизмов. Такие объединенные устройства называются *механотронными модулями*. Их использование целесообразно в широко распространенных механизмах, так как появляется возможность унификации модулей и создания их широкой номенклатуры для разнообразных областей применения. К таким модулям относятся: электрошпиндели металлообрабатывающих станков; мотор-колеса электротранспортных средств; приводные модули звеньев промышленных манипуляторов, статоры и роторы которых располагаются на смежных звеньях манипуляторов; мотор-барабаны тяговых лебедок; двигатели-ролики и двигатели-цилиндры, предназначенные для транспортирования материалов.

**Электрошпиндели** — вращающиеся устройства, предназначенные для закрепления режущих инструментов в металлообрабатывающих станках. Наиболее широко их применяют в шлифовальных станках, где режущим инструментом является шлифовальный круг. Мощности электрошпинделей от 0,3 до 25 кВт, частоты вращения — от 6 до 100 тыс. мин<sup>-1</sup> [48].

Применение высокоскоростных электрошпинделей в шлифовальных станках позволяет повысить качество обработки при малых размерах привода. Наибольший диапазон регулирования частоты вращения электрошпинделей 8:1, регулирование может осуществляться в режиме со снижающейся мощностью. Выбор мощности электрошпинделя при регулируемом приводе определяется диапазоном регулирования и технологическими особенностями станка. Номинальная мощность для длительного режима

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{шл}} D, \quad (3.80)$$

где  $P_{\text{шл}}$  — мощность шлифования;  $D$  — диапазон регулирования частоты вращения.

Технические характеристики электрошпинделей (регулируемые возможности и перегрузочная способность) в основном определяются жесткостью вала, опорами и механической прочностью ротора.

Одним из наиболее важных узлов электрошпинделей являются его опоры: шариковые, воздушные или гидравлические. Шариковые опоры наиболее просты, но при их использовании применяют специальные системы смазывания — установки масляного тумана. Воздух из пневмосети поступает в устройство очистки, регулируемый редуктор и установку масляного тумана. Создаваемая смесь минерального масла и воздуха передается шлангом к электрошпинделю на расстояние до 1 м. Применение масляного тумана обеспечивает проникновение смазочного материала, охлаждение всех элементов подшипников и исключает загрязнение опор электрошпинделя. Недостатком такого способа является загрязнение атмосферы цеха туманом, выходящим из электрошпинделя. При большом числе работающих станков это создает опасность значительной концентрации масляного тумана в цехе.

Большим недостатком шариковых опор является существование предельного значения произведения диаметра опоры (в миллиметрах) на частоту вращения (мин<sup>-1</sup>). Для лучших образцов оно не превышает 1 млн. Таким образом, с ростом частоты вращения снижается допустимый диаметр вала шпинделя и, следовательно, его жесткость, поэтому возникает ограничение мощности, которую может развить электрошпиндель при увеличении частоты вращения.

Применение подшипников с воздушной смазкой позволяет повысить жесткость шпинделя путем увеличения диаметра шеек вала.

Условием номинальной работы шпинделя с воздушными опорами является надежная очистка сжатого воздуха от пыли, воды и масла. Для этого используют пульт питания сжатым воздухом. Давление воздуха на входе опор 0,5... 0,6 МПа.

При мощности шпинделей до 10 кВт требуемое давление достигает 1,5 МПа. В этом случае применяют автономные компрессорные установки, так как в заводских пневматических сетях давление не превышает 0,6 МПа. Срок службы пневматических опор во много раз превышает срок службы шариковых опор, составляя 2000 ч и более.

Санитарные условия эксплуатации таких опор намного лучше, чем шариковых, так как из шпинделя выходит очищенный от пыли воздух.

При использовании гидравлических опор требуется специальная гидростанция высокого давления с большими радиаторами для охлаждения масла. Масло подается в опоры под давлением, достаточным для создания масляной пленки независимо от частоты вращения вала. Так как эти агрегаты должны находиться непосредственно у станка, то это существенно повышает уровень шума в цехе и ухудшает условия работы станочников.

Другой важной проблемой конструирования электрошпинделей является отвод тепла, выделяемого в опорах и в электродвигателе. Применяют воздушное и жидкостное охлаждения. Воздушное охлаждение используют при незначительной мощности электрошпинделя (до 1 кВт). Целесообразность выбора такого варианта определяется типом опор. Большинство электрошпинделей имеет рубашки охлаждения корпуса антикоррозионной жидкостью, подаваемой специальным насосом из гидробака. В электрошпинделях используются частотно-регулируемые электродвигатели переменного тока — асинхронные короткозамкнутые и вентильные.

**Мотор-колеса** применяются в автомобильных транспортных средствах, где имеется источник электроэнергии. Наиболее часто их применяют на большегрузных автосамосвалах. В качестве источника электроэнергии используется синхронный генератор, установленный на валу первичного двигателя — высокоскоростного дизеля или газовой турбины. В мотор-колесе применяется двигатель постоянного тока последовательного возбуждения или двигатель переменного тока — асинхронный короткозамкнутый или вентильный. Система «синхронный генератор — управляемые полупроводниковые преобразователи — двигатели мотор-колес» образует электромеханическую трансмиссию.

Например, для автосамосвала БелАЗ-75501 с колесной формулой 4×4, грузоподъемностью 280 т, мощностью 2317 кВт и максимальной скоростью 40 км/ч в электромеханической трансмиссии используются четыре мотор-колеса с реверсивными электро-

двигателями постоянного тока последовательного возбуждения номинальными мощностями по 575 кВт. Для торможения автосамосвала применяются электродинамическое и гидромеханическое торможения.

К мотор-колесам предъявляются жесткие требования по минимизации размеров и массы, а также по достижению высоких энергетических показателей, что важно в связи с соизмеримостью суммарной мощности мотор-колес с мощностью источника электропитания.

Для мотор-колес легких электрических транспортных средств (электровелосипеды, мотороллеры, легкие автомобили, инвалидные кресла) перспективно применение вентильно-индукторных электродвигателей [14]. Стоимость такого двигателя меньше стоимости вентильного двигателя почти в 3 раза при прочих одинаковых технических параметрах.

Функциональная схема вентильно-индукторного привода (ВИП) показана на рис. 3.27.

Вентильно-индукторный двигатель имеет статор с  $n$  полюсами, несущими сосредоточенные обмотки, и пассивный явнополюсный ротор с  $m$  полюсами ( $m \neq n$ ). Ротор может использоваться как основа мотор-колеса. Обмотки статора подсоединены к источнику питания (батарее) через коммутатор, построенный на силовых ключах, обычно управляемых от датчика положения ротора (ДПР). Для формирования импульсов тока используется микроконтроллерное управление.

Ключи периодически подключают фазные обмотки статора к батарее в последовательности  $Aa-Bb-Cc-Dd$ , что благодаря магнитному притяжению приводит к смещению соответствующих полюсов пассивного ротора в направлении ближайших возбужденных полюсов статора. В результате ротор вращается в направлении, противоположном направлению вращения магнитного поля статора, с частотой

$$\omega = 2\pi f_k / m N_R, \quad (3.81)$$

где  $f_k$  — частота импульсов;  $m$  — число фаз;  $N_R$  — число полюсов ротора.

Описанные конструкция и принцип действия определяют главные преимущества ВИП: простоту, низкую стоимость и высокую надежность двигателя. Эти свойства, а также благоприятные рабочие и энергетические характеристики могут быть реализованы только при соответствующем управлении углами коммутации при включении и отключении фаз и соответствующей форме импульсов тока. Неадекватное управление, даже в случае, когда используется датчик положения ротора, приводит к сильной вибрации, шуму и значительному ухудшению эксплуатационных характеристик привода.

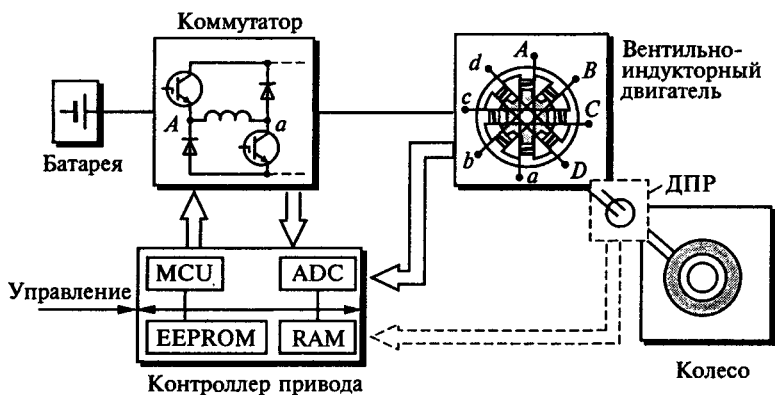


Рис. 3.27

Датчик положения ротора нежелательно использовать в ВИП массового применения, поскольку он значительно усложняет его конструкцию. Исключение датчика положения ротора и снижение шума благодаря соответствующему управлению являются необходимыми условиями для широкого использования привода.

Первая проблема решается применением специально разработанного оригинального способа управления коммутацией, когда текущая информация о значении токов используется для определения углов коммутации в любом режиме работы. Бездатчиковое управление сравнительно просто реализуется для приводов большой мощности (киловатты и более), когда удельное сопротивление обмотки относительно мало. Для приводов малой мощности (сотни ватт) происходит изменение сопротивления при повышении температуры, что учитывают при разработке алгоритма управления.

Снижения шума и вибраций добиваются путем управления формой импульсов токов.

**Мотор-барабаны, двигатели-ролики, двигатели-цилиндры**, применяющиеся для намотки и транспортирования гибких материалов, конструктивно могут выполняться в двух вариантах. В первом варианте вал барабана, ролика или цилиндра одновременно является валом ротора двигателя. Во втором варианте барабаны, цилиндры представляют собой массивные роторы обращенных асинхронных электродвигателей, статорные обмотки которых располагаются на неподвижных валах. Подвод питания статорных обмоток осуществляется через полые части неподвижных валов. Применяется частотное регулирование скорости роторов от преобразователей частоты. Выполняется это подобно регулированию скорости обычных асинхронных короткозамкнутых электродвигателей.

### 3.8. Расчет и выбор автоматизированных электроприводов механизмов

Расчет и выбор автоматизированных электроприводов механизмов является частью электротехнического инжиниринга, который в свою очередь является частью системного инжиниринга, связанного с созданием нового технологического оборудования.

Электротехнический инжиниринг, обеспечивающий разработку и внедрение электромеханического оборудования, включает в себя:

связь с разработчиками технологического оборудования;

разработку технической документации по комплектам электрооборудования, связь с поставщиками и консультантами унифицированных средств автоматизированных электроприводов и другого электрооборудования;

заказ и производство электрооборудования;

монтаж и наблюдение за монтажом электрооборудования на объекте заказчика;

обучение операторов технологического оборудования и обслуживающего персонала;

выполнение пуско-наладочных работ;

гарантийное и сервисное обслуживание.

**Расчет автоматизированного электропривода.** Этот расчет связан с расчетом мощности электродвигателя, который выполняется в соответствии с режимом работы механизмов технологического оборудования (см. п. 1.5) на основании нагрузочных и скоростных диаграмм. Методы расчета и выбора мощности двигателей для длительного, кратковременного, повторно-кратковременного режимов работы изложены в книгах по теории электропривода [например, 20, 22] и в справочниках [48, 49]. Особенности расчетов электроприводов механизмов конкретного технологического оборудования рассматриваются в гл. 4.

**Выбор системы электропривода.** Выбор производится на основании требований к регулированию скорости и показателям качества регулирования: диапазону регулирования, плавности, точности поддержания заданной скорости, а также динамическим показателям качества процесса регулирования (быстродействие, перерегулирование и др.).

На выбор системы электропривода могут влиять также условия пуска механизмов. Многие механизмы (например конвейеры) требуют обеспечения пуска под нагрузкой, другие обладают значительными инерционными массами (центробежные вентиляторы главного проветривания шахт, дробилки крупного дробления). В случае применения асинхронных короткозамкнутых двигателей или синхронных с асинхронным пуском может оказаться, что время пуска недопустимо велико и за это время двигатель перегревается. Завышение мощности и момента двигателя по услови-

ям пуска приводит к его недоиспользованию в режиме рабочего функционирования и ухудшению энергетических показателей. При пуске двигателя механическая часть может испытывать большие перегрузки, что будет неблагоприятно сказываться на долговечности механической части оборудования, особенно при наличии упругих элементов (канаты лебедок, конвейерные ленты и др.). Вследствие этого может оказаться необходимым применение регулируемого привода.

Возможно применение редукторного привода или безредукторного с тихоходным двигателем. Выбор рационального привода может быть выполнен на основании технико-экономического сравнения, которое должно учитывать не только различные стоимости тихоходного и быстроходного (с дополнительным редуктором) двигателей, но и их массу, занимаемую площадь, влияющие на размеры помещения, фундамента, затрат на несущие конструкции при размещении привода.

При номинальной скорости исполнительного органа не менее  $300 \dots 400 \text{ мин}^{-1}$  предпочтительным является безредукторный привод с прямым соединением вала двигателя с валом рабочей машины (насосы, вентиляторы). При меньшей скорости рабочего органа выбор не однозначен, хотя чаще всего редукторный привод имеет меньшие массу и размеры. Однако сравнение только по этим показателям достаточно для механизмов, не требующих регулирования скорости.

Для механизмов с частыми пусками и реверсами важно сравнить двигатели по их динамическим показателям. Безредукторные электроприводы более динамичны и предпочтительны для регулируемых электроприводов, так как их легче разгонять, тормозить, регулировать скорость. Они широко применяются для шахтных подъемных установок, прокатных станов.

При выборе системы электропривода необходим учет характера нагрузки, создаваемой рабочим механизмом. Для нерегулируемых электроприводов с неравномерной или пульсирующей нагрузкой выравнивание момента двигателя может быть достигнуто увеличением инерционных масс электропривода (у поршневых компрессоров, дробилок крупного дробления), хотя это может затруднить пуск электропривода.

Значительно сложнее решать этот вопрос для регулируемых реверсивных электроприводов, так как увеличение механической инерции снижает быстродействие электропривода. Очень важно решение такой задачи в электроприводах реверсивных прокатных станов.

Наличие в нагрузке пиков требует дополнительной проверки приводов по допустимой перегрузке. В случаях, когда возможны перегрузки, которые не может преодолеть привод, необходимо предусмотреть соответственно настроенную защиту или систему управления, обеспечивающую ограничение тока и момента дви-

гателя и динамические нагрузки в механических передачах (например в экскаваторных электроприводах).

**Технические требования, технические условия, техническое задание.** Эти документы составляются при проектировании и создании комплектного электрооборудования и его отдельных компонентов. Составление технических требований является одной из основных задач заказчика оборудования. На базе технических требований проектант комплектного электропривода разрабатывает техническое задание, в котором оговариваются все необходимые для данного электропривода технические характеристики, условия эксплуатации, требования по надежности и ресурсу и гарантии поставщика оборудования.

После изготовления и испытаний оборудования поставка производится по техническим условиям на комплектный электропривод и на функционально автономные составляющие комплекта: электродвигатель, полупроводниковый преобразователь, пульты управления и др.

Технические требования, техническое задание, технические условия являются текстовыми документами комплекта конструкторской документации на оборудование.

Технические требования и техническое задание состоят из следующих разделов.

1. Назначение и область применения комплектного электропривода.

2. Технические характеристики электропривода. Приводятся требования к мощности на валу электродвигателя, диапазону регулирования частоты вращения, статической точности и динамическим характеристикам регулируемых переменных электропривода, времени переходных процессов при пуске и торможении. Оговариваются требования к параметрам и мощности питающей сети. В связи с широким использованием регулируемых электроприводов с полупроводниковыми преобразователями при питании от сети ограниченной мощности необходимо сформулировать требования к коэффициентам мощности и нелинейных искажений. Приводятся требования, специфичные для каждого типа машин и технологических процессов.

3. Требования к управлению, сигнализации, защите, диагностированию. Приводятся требования по автоматизации управления электроприводом, устанавливаются количество и характеристики постов оператора, формулируются требования к блокировкам, сигнализации, видам и характеристикам защит, диагностированию. Обязательно указание вида и характеристики сигналов управления, блокировок и защиты (аналоговые, дискретные, ток, напряжение) и уставок защит, сигнализации и диагностирования.

4. Условия эксплуатации. Физическими значениями или ссылками на стандарты формулируются требования к климатическим



условиям (температура, влажность, термоциклические воздействия и др.) и воздействию механических факторов (вибрация, удары, крен, специальные механические воздействия). Оговариваются требования к исполнению защиты от внешних воздействий, взрывозащищенности и др., а также к условиям транспортирования и хранения оборудования.

5. Требования к надежности, ресурсу, обслуживанию и ремонту. В зависимости от назначения и требований к эксплуатации электропривода оговариваются требования к надежности (вероятность безотказной работы и средняя наработка на отказ для невозстанавливаемого оборудования, коэффициент готовности и среднее время восстановления для восстанавливаемого оборудования, к которому чаще всего относится электропривод машин и механизмов). Приводятся ресурс электропривода и комплектного оборудования, порядок и регулярность проведения регламентных и ремонтных работ.

6. Гарантии изготовителя. Оговариваются гарантии предприятия-изготовителя или предприятия — поставщика комплектного электрооборудования.

Технические требования и техническое задание — текстовые документы конструкторской документации, которые должны содержать краткие стандартизованные формулировки с обязательным указанием цифровых данных по всем характеристикам, показателям и условиям эксплуатации (мощности, диапазону регулирования, типам электропривода, типам электрооборудования, температурным условиям, относительной влажности окружающего воздуха, видам защит и др.).

Проектирование оборудования требует не только выполнения расчетов и выбора видов электрических машин и оборудования, но также определения типов этих машин и аппаратуры и выбора их из номенклатуры оборудования, выпускаемого промышленностью.

Первая часть проектирования обычно сосредоточена в пояснительной записке. Вторая часть выражается в составлении перечней оборудования и спецификаций, на основе которых будут производиться заказы. Главной частью проекта являются схемы (функциональные, принципиальные, монтажные), на основе которых выполняется установка электрооборудования, производятся внешние соединения, осуществляется наладка и т. п.

Очень важен выбор соответствующих монтажных размеров, например для двигателей, агрегатируемых с различными механизмами, а также выбор исполнений, отвечающих климатическим условиям и характеру помещений для установки электрооборудования.

**Номинальные параметры типового электрооборудования.** Эти параметры устанавливаются в соответствии с параметрическими рядами на основе геометрических прогрессий. Так, номинальные

мощности электрических машин соответствуют ряду R10 со знаменателем геометрической прогрессии  $R10 = \sqrt[10]{10} \approx 1,25$ , а номинальные мощности трансформаторов соответствуют ряду R5 со знаменателем  $R5 = \sqrt[5]{10} \approx 1,6$ . В стандартах предусматривается возможность округления значений параметров.

В диапазоне 1 ... 10 000 кВт ряд номинальных мощностей электрических машин следующий:

1,1	1,5	—	2,2	—	3,0	4,0	—	5,5	—	7,5	—
11	15	18,5	22	—	30	37	(45)	55	—	75	90
110	132	160	200	250	315	400	—	500	630	800	
1000	1250	1600	2000	2500	3200	4000	—	5000	6300	8000	

Номинальные токи соответствуют ряду R10.

Для приемников постоянного тока номинальные напряжения 27; 110; 220; 440 В, а для приемников переменного тока — 40; 220; 380; 660 В. Для источников энергии (генераторов, трансформаторов) номинальное напряжение выше на 5 % (115; 230; 460 В постоянного тока и 230; 400; 690 В переменного тока). Специфическому стандарту подчиняются вторичные напряжения трансформаторов, предназначенных для питания полупроводниковых преобразователей. Эти напряжения таковы, что позволяют получить стандартные значения выпрямленного напряжения.

Номинальные значения частоты вращения машин трехфазного тока определяются известным соотношением, связывающим частоту питающей сети и число пар полюсов с синхронной частотой вращения:  $n_c = 60f/p$ . Поэтому параметрический ряд синхронных частот вращения при питании от сети с частотой 50 Гц имеет вид: (100); (125); (150); (166,6); (187,5); 200; 250; 300; 375; 500; 600; 750; 1000; 1500; 3000 мин<sup>-1</sup>. Значения в скобках не рекомендуются к применению. При частоте питания 400 Гц параметрический ряд имеет следующие значения: (1500); (3000); 4000; 6000; 12 000; 24 000 мин<sup>-1</sup>.

Для электрических машин постоянного тока параметрический ряд номинальных частот вращения близок к ряду синхронных частот. Это объясняется широким опытом создания преобразовательных агрегатов, в состав которых входят машины постоянного и переменного тока, а также необходимостью унификации механического оборудования (редукторов) по частоте вращения первичного двигателя. Для машин постоянного тока параметрический ряд значительно расширен в сторону малых частот вращения. Для двигателей постоянного тока мощностью более 630 кВт, предназначенных для приводов механизмов металлургического производства и шахтных подъемных машин, значения параметрического ряда номинальных частот вращения находятся в пределах от 20 до 1000 мин<sup>-1</sup> и соответствуют ряду R10.

Кроме унификации указанных параметров электродвигателей, унифицированы также их размеры (высоты осей вращения) и варианты исполнений по способу монтажа. Возможные конструктивные исполнения для различных типов машин приводятся в каталогах и справочниках.

**Климатическое исполнение.** Широкое применение электрического оборудования вызвало потребность обеспечения его климатостойкости, т. е. способности выдерживать без заметных нарушений нормальных эксплуатационных характеристик климат той местности, для которой оно предназначено. Под этим подразумеваются защита от коррозии и прочие меры, обеспечивающие установленный срок службы и надежную работу в том или ином климатическом районе.

В соответствии с особенностями климата (предельный уровень температуры, влажность и др.) вводится понятие климатических зон и выполняется климатическое районирование, т. е. определение принадлежности района к климатической зоне. При этом имеются в виду макроклиматические зоны, т. е. большие территории с определенными особенностями климата, в отличие от микроклимата отдельных районов.

Для электрооборудования, эксплуатируемого на суше, реках и озерах (в отличие от морских условий), определены следующие климатические исполнения: У — для эксплуатации в зонах с умеренным климатом; ХЛ — для холодного климата; УХЛ — для умеренного и холодного климата; ТВ — для влажного тропического климата; ТС — для сухого тропического климата; Т — для сухого и влажного тропического климата; О — общеклиматическое исполнение.

Климатическое исполнение указывают в типовом обозначении электротехнического оборудования. Вместе с ним указывается категория помещения, в котором допускается его эксплуатация.

**Исполнение оболочек электрооборудования** по степени защиты персонала от соприкосновения с токоведущими или движущимися частями, находящимися внутри оболочки, а также от попадания посторонних предметов и влаги также регламентировано государственными стандартами.

Применительно к электродвигателям такая классификация дана в п. 1.3.5. Аналогично она применима и к другому электрооборудованию.

# ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТИПОВЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ И ТРАНСПОРТНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

### 4.1. Типовые группы оборудования технологических комплексов

Наличие в программируемых контроллерах модулей интеллектуальной периферии создает предпосылки для разработки типовых программных блоков, реализующих алгоритмы управления типовым технологическим оборудованием.

Развивая блочно-модульную идеологию построения средств и систем управления до уровня механизмов, агрегатов и комплексов, можно выделить группы оборудования, для которых характерны общие функциональные задачи управления в технологическом процессе (функциональные модули), и в соответствии с этим подготовить программные модели модулей и программные блоки, решающие задачу управления функциональными модулями.

Из таких модулей можно формировать блоки-комплексы и в соответствии с этой идеологией обеспечить экономичную технологию проектирования компьютерных систем управления любыми АТК.

Анализируя функциональные особенности технологического оборудования, в котором активно используются электромеханические системы, можно все его разнообразие свести к следующим типовым группам оборудования:

предназначенное для физической и химической переработок вещества и содержащее энергоемкие однодвигательные электроприводы с продолжительным режимом работы (насосы, компрессоры, вентиляторы, мельницы, дефибреры, смесители, центрифуги и др.);

металло-, дерево- и камнеобрабатывающие станки;

прокатное, кузнечное, пресловое и штамповочное;

резательное (гильотинные, барабанные, летучие ножницы, дисковые и ленточные пилы, резательные станки и др.);

горнодобывающее (роторные и ковшовые экскаваторы, угледобывающие машины, буровое оборудование и др.);

предназначенное для транспортирования и обработки гибких материалов;

промышленные манипуляторы и роботы;

транспортное и подъемно-транспортное (краны, транспортеры, конвейеры, рольганги, монорельсы, лифты, электротранспорт и др.);

контрольно-испытательное (измерительные машины, испытательные стенды, имитаторы и др.);

мониторинговое (телевизионные системы наблюдения за технологическим процессом, телескопы, радиотелескопы, оптические системы космического наблюдения и др.).

В каждой группе выделяются типовые функциональные модули-агрегаты, для которых формируется библиотека программных моделей и программных блоков, реализующих алгоритмы управления.

Рассмотрим типовые функциональные модули оборудования, предназначенного для транспортирования и обработки гибких материалов. Упрощенные функциональные схемы систем управления агрегатами приведены на рис. 4.1, *а...з*. В общем случае системы могут иметь *n* приводов, но для простоты на рис. 4.1 показаны два привода. Имеются следующие типовые функции управления:

1) управление соотношением моментов нагрузки электроприводов, имеющих механическую связь (см. рис. 4.1, *а*). Выполняется относительно ведущего электропривода, замкнутого по скорости или положению. Возможны каскадное, независимое и комбинированное управления;

2) управление скоростью и соотношением скоростей (см. рис. 4.1, *б*). Выполняется аналогично функции «1»;

3) управление положением и соотношением положений электроприводов, имеющих механические взаимосвязи (см. рис. 4.1, *в*). Выполняется по разности скоростей и положений;

4) одновременное управление соотношением скоростей и положений (см. рис. 4.1, *г*), применяемое в агрегатах прокатного производства. Объединяет функции «2» и «3»;

5) управление соотношением скоростей и натяжений (усилий) (см. рис. 4.1, *д*). Выполняется дополнением функции «2» задачами управления натяжениями;

6) управление скоростями и натяжениями с реализацией тормозных режимов электроприводов на сматывающих устройствах, управление натяжением в зоне обработки полотна и линейной скоростью в наматывающем устройстве (см. рис. 4.1, *е*);

7) управление технологическими переменными через положение исполнительных механизмов (см. рис. 4.1, *ж*). Содержит функции «4» с дополнением транспортного запаздывания;

8) управление технологическими переменными через скорости исполнительных механизмов (см. рис. 4.1, *з*). Имеет те же особенности, что и функция «7»;

9) управление технологическими переменными через переменные электроприводов (скорости, положения и др.) и переменные

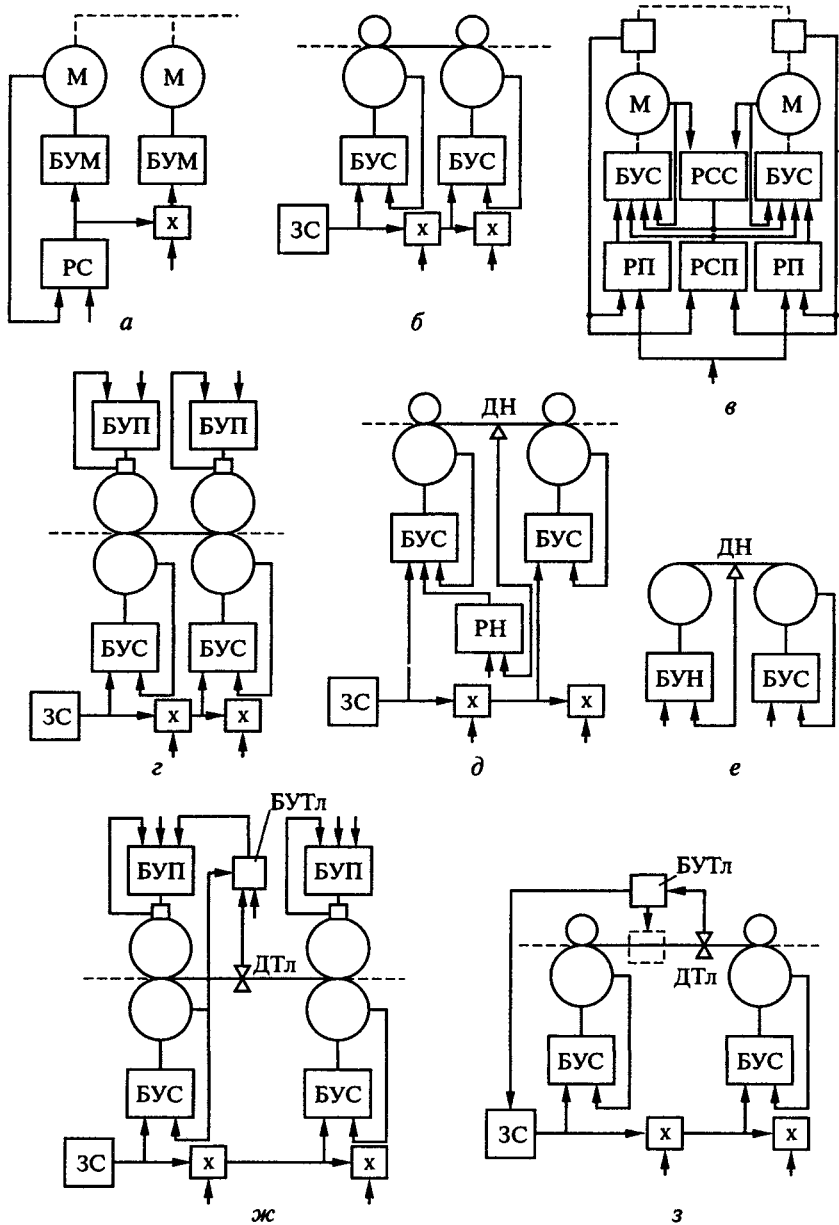


Рис. 4.1

исполнительных устройств иного вида (давление, температура, подача эмульсий и др.) (см. рис. 4.1, ж, з).

Эти функции и способы их реализаций далее будут рассмотрены более подробно. На рис. 4.1 БУМ, БУС, БУП, БУН, БУТл — соответственно блоки управления моментом, скоростью, положением, натяжением, толщиной; РС, РП, РН, РСС, РСР — регуляторы соответственно скорости, положения, натяжения, синхронизации скоростей, синхронизации положений; ЗС — задатчик скорости; ДТл — датчик толщины; ДН — датчик натяжения.

В АТК разного производственного назначения могут использоваться любые сочетания типовых функциональных модулей. В соответствии с изложенным имеется возможность создания базы программных моделей типовых механизмов и технологических агрегатов, а также программных блоков, реализующих алгоритмы управления механизмами и агрегатами, которые обеспечивают решения следующих задач:

отработку алгоритмов управления механизмами, агрегатами и комплексами с имитацией основных технологических режимов;

подготовку программного обеспечения компьютерных систем управления конкретными объектами на основе базы программных блоков;

исследование возможностей использования типовых компьютерных средств автоматизации для реализации гибко программируемых систем управления механизмами, агрегатами и комплексами.

Типовые модули процессов в сочетании с типовыми приводными модулями позволяют иметь готовые модели ряда технологических процессов и проектировать полный комплект средств автоматизации для каждого из них. При этом резко сокращаются затраты на проектирование и время, отводимое для проектных изысканий.

## **4.2. Системы управления оборудованием**

### **4.2.1. Координированное управление механизмами в составе технологического агрегата**

Для координированного управления механизмами применяются различные алгоритмы управления по времени, состоянию объекта, готовности, определенной последовательности работы, шаблону.

В первом случае на выполнение технологического процесса отводится определенный промежуток времени, устанавливаемый и распределяемый между отдельными участками процесса в соответствии с предварительным расчетом. При этом формируется

временная диаграмма работы механизма в составе агрегата. Временная диаграмма в виде таблицы граничных значений заносится в управляющую программу технологического контроллера (КТ), который в заданное время выдает управляющие воздействия на изменение режима работы соответствующего электропривода. Время работы электропривода фиксируется таймером или счетчиком.

Во втором случае движение механизмов осуществляется в зависимости от выходных координат электроприводов. Примером может служить система поддержания заданной подачи на оборот шпинделя в токарных, сверлильных, фрезерных и других станках. Такие технологические агрегаты содержат электроприводы главного движения и электроприводы подачи. Управляющие воздействия для электроприводов формируются по определенным законам управления, зависящим от режима их работы. Системы управления электроприводами манипулятора обеспечивают движение исполнительного органа (ИО) — схвата — по заданной пространственной траектории посредством управления движением отдельных звеньев манипулятора. Каждое звено оснащается электроприводом и датчиками для контроля перемещений.

Управляющие воздействия на включение, отключение электропривода или изменение режима его работы могут подаваться в моменты достижения технологической готовности. Технологическая готовность определяется, например, перемещением ИО в заданное положение либо достижением заданного уровня технологического параметра (давления, массы, состава смеси веществ и т. п.) благодаря действию ИО. Технологическую готовность контролируют при помощи различных датчиков. Например, в системе управления лифтом вначале работает электропривод лебедки, а после срабатывания датчика этажности, управление передается на привод открытия дверей лифта.

Электроприводы технологических агрегатов также могут включаться и отключаться в определенной последовательности, осуществляя на каждом участке технологического процесса движение ИО машин с требуемыми скоростями в нужном направлении.

В некоторых технологических агрегатах применяют системы управления по шаблону (копировальные системы). Программа перемещения ИО машины задается при помощи различного рода копиров, например плоских шаблонов, очертания которых точно соответствуют требуемым траекториям движения ИО. По контуру шаблона движется шуп датчика, жестко соединенного с ИО. Последний по двум взаимно-перпендикулярным направлениям перемещается следящим электроприводом с двумя двигателями (по одному на каждое направление). На вход системы управления следящего привода подается сигнал, пропорциональный отклонению



щупа от контура шаблона (сигнал ошибки). Один из двигателей при этом создает движение щупа и ИО вдоль контура шаблона, второй двигатель обрабатывает сигнал ошибки.

#### 4.2.2. Средства управления агрегатами

Исходя из задач управления, рассмотренных выше, современные системы автоматизации включают в свой состав вычислительные средства (ВС) различного типа, к которым относятся: промышленные компьютеры, технологические контроллеры, однокристалльные микроконтроллеры, встраиваемые одноплатные компьютеры.

Существуют различные схемы построения систем: с централизованным и децентрализованным (распределенным) управлением технологическими агрегатами. В первом случае управление агрегатами осуществляется от одного вычислительного средства. Процессор обслуживает по очереди отдельные каналы управления. Очередность обслуживания может задаваться жесткой программой или осуществляться по мере поступления заявок от отдельных каналов с возможностью использования приоритетного обслуживания. Во втором случае каждый электропривод комплектуется своим ВС. Центральное ВС отсутствует либо вводится для передачи ему функций диспетчера или супервизора. Программное обеспечение ВС состоит из программ диспетчера, координирующего работу системы управления, рабочих программ, программ обслуживания пульта оператора и диагностической программы.

Вычислительные средства в системе управления технологическим агрегатом выполняют следующие функции: сбор и первичную обработку данных; контроль процесса; управление процессом, его стабилизацию и оптимизацию; вспомогательные функции.

Сбор, первичная обработка данных и контроль процесса соответствуют группе *информационных функций* ВС, в состав которой входят: сбор и хранение информации о состоянии процесса и устройств системы управления; непрерывный контроль соответствия параметров процесса и системы допустимым значениям; выдача информации оператору о несоответствии параметров допустимым значениям; периодическая регистрация значений контролируемых параметров; сигнализация в случае приближения к аварийному состоянию; оперативная связь с ВС других уровней и др.

Управление, стабилизация и оптимизация соответствуют группе *управляющих функций* ВС: пуск и останов технологического агрегата или отдельных электроприводов; формирование управляющих воздействий, обеспечивающих ведение заданного режима; выполнение расчетов для определения параметров объекта (ре-

шение задач параметрической идентификации); автоматическая оптимизация процесса в соответствии с принятым критерием качества.

Применение контроллеров предполагает выбор их типа и конфигурации, а также разработку управляющих программ, реализующих требуемые функции управления. При этом должны обеспечиваться не только требования, выдвигаемые со стороны объекта, но и требования, позволяющие всем средствам управления работать в едином управляющем комплексе, обеспечивающем также и отображение состояния объекта в реальном времени для технолога-оператора.

Программируемый контроллер имеет большой набор функциональных модулей, сетевые средства, средства отображения данных о технологическом процессе, средства программирования и дистанционного управления (переносные пульты). Модули ввода и вывода аналоговой и дискретной информации содержат узлы гальванического разделения сигналов, узел мультиплексирования аналоговых входных сигналов, а также аналого-цифровой (АЦП), цифро-аналоговый (ЦАП), дискретно-цифровой (ДЦП) и цифро-дискретный (ЦДП) преобразователи.

Для контроля работоспособности КТ и исправности электрических цепей подключения датчиков и исполнительных устройств объекта управления контроллеры имеют светодиодную индикацию состояния входов и выходов, режимов контроллера и его отдельных модулей. Для этих же целей в составе периферийных устройств КТ имеются ручные отладочные пульты и консоли, с которых можно осуществить полный контроль за состоянием КТ и значениями всех обрабатываемых данных.

При управлении технологическими агрегатами, как правило, применяются контроллеры с небольшим количеством интеллектуальных модулей. В ряде случаев для управления эскалаторами, насосами, компрессорами, маленькими прессами, дверями, воротами и т. д. применяются логические модули, например LOGO фирмы «Siemens». В состав логического модуля входят: встроенные клавиатура, дисплей, часы, цифровые входы и выходы и релейные выходы. Логические модули реализуют основные функции (И, ИЛИ и т. п.) и специальные: задержка включения, задержка выключения, импульсное реле, часы, реле с самоудержанием, тактовый генератор, задержка включения с запоминанием, триггер, аналоговый компаратор и др. Программирование логических модулей осуществляется нажатием кнопок, расположенных на передней панели КТ.

В настоящее время промышленные компьютеры имеют ту же архитектуру, что и персональные: поддерживают шины ISA и PCI; их основой являются материнские платы, в зависимости от решаемых задач имеющие процессоры 386, 486 или Pentium; имеется

динамическое ОЗУ (от 16 Мбайт и более); они поддерживают накопители FDD (накопитель на гибких магнитных дисках) и HDD (винчестер); имеют встроенную флэш-память и несколько последовательных и параллельных портов; функционируют под управлением операционных систем (ОС) — DOS 6/22, Windows и других ОС реального времени.

Промышленные компьютеры имеют большую номенклатуру цифровых и аналоговых модулей ввода и вывода, коммуникационных плат (например, контроллер локальной сети Ethernet, модем для широкого диапазона температур, высокоскоростной модем, платы последовательного и параллельного интерфейсов и др.), плат расширения (например, многофункциональный счетчик-таймер, видеоплата SVGA, контроллер дисководов и винчестера, плата управления движением и др.), комплектующих (например, плата ввода и вывода высоких напряжений, аналоговый мультиплексор, преобразователь RS-232 в RS-485, клеммная плата для оптической развязки и др.).

Для гибкости и эффективности монтажа существует широкий спектр корпусов (монтажных каркасов) и блоков питания. Монтажные каркасы рассчитаны на различное количество слотов разных типов шин с различной разрядностью (8, 16, 32). Блоки питания выполнены на разные мощности и выходные напряжения.

В программное обеспечение (кроме ОС) входят различные специализированные пакеты и алгоритмические языки (например, С++, Quick-Basic и др.).

В технологических агрегатах применяют встраиваемые одноплатные и промышленные компьютеры (ПК). Отличие между ними заключается в том, что в последнем случае источник питания, материнская плата и интеллектуальные модули размещаются в корпусе и могут находиться как в шкафу с электрооборудованием, так и на некотором расстоянии от него.

Высокая производительность ПК, большая номенклатура модулей и эффективные программные средства позволяют решать широкий спектр задач автоматизации.

В системах управления применяются промышленные компьютеры фирм: «Advantech» (IPC-602P3-26P, IPC-620DP4-B, PCM-5864/BARE, MIC-3376-A, MIC-3376S-A, PPC-150T, IPPC-920T, IPPC-950T); «Octagon» (серия одноплатных компьютеров Micro PC, контроллер MIL-STD-1553B); «Dataforth» (DCP485-P, LDM485-P, LDM80-P, LDM85-S); «Ampro»; «PEP»; «Radisus» и др.

В металлорежущих станках широкое применение получили устройства числового программного управления. Современные системы ЧПУ имеют в своей структуре ПК. По виду рабочих движений станка системы ЧПУ могут быть разделены на позиционные, контурные и комбинированные.

Кроме вычислительных средств, в системах управления ряда технологических агрегатов применяются устройства сопряжения с объектом (УСО), которые предназначены для согласования информационных сигналов, поступающих от объекта и системы управления, по уровню и форме.

Для построения систем человеко-машинного интерфейса, решения задач оперативного управления и отображения информации, поступающей от контроллера или персонального компьютера, фирмами разработаны программируемые терминалы или сенсорные панели. Например, фирмой «Omron» разработаны терминалы серии NT (NT20M, NT600M и др.).

Отображаемая информация формируется в виде экранов и выводится на жидкокристаллический дисплей терминала. Количество отображаемых экранов определяется емкостью блока памяти, установленного в терминал.

Для создания прикладных программ для контроллеров используется стандарт Международной электротехнической комиссии IEC-1131 — квинтэссенция опыта стран в области языков программирования для систем автоматизации технологических процессов.

Стандарт специфицирует пять языков программирования:

Sequential Function Chart (SFC) — язык последовательных функциональных блоков;

Function Block Diagram (FBD) — язык функциональных блок-вых диаграмм;

Ladder Diagrams (LD) — язык релейных диаграмм;

Structured Text (ST) — язык структурированного текста;

Instruction List (IL) — язык инструкций.

Для визуализации и обслуживания существующих систем управления различные фирмы разработали специализированные пакеты. В частности, фирма «Siemens» разработала программные продукты: Control Center — для быстрого обзора всех данных проекта и глобальных установок; Graphics Designer — для создания мнемосхем и динамических графических объектов изображений процесса, и другие пакеты, функционирующие в среде Windows 95 или Windows NT.

Во многих машинах и механизмах для управления применяются различные электромеханические командоаппараты различных конструкций, ручные

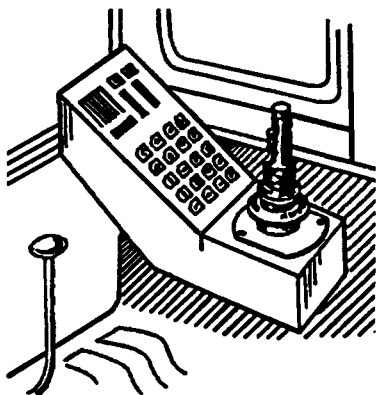


Рис. 4.2

манипуляторы типа «джойстик», кнопки управления (например, панель управления в лифте), педали и т.д. Командоаппарат непосредственно связан с контроллером. Принцип действия ручного манипулятора типа «джойстик» (рис. 4.2) [55] заключается в следующем: при его перемещении на пульте управления меняется напряжение на регулируемом элементе командоаппарата, что фиксируется технологическим контроллером. В зависимости от решаемой для каждого класса машин управленческой задачи контроллер обрабатывает входную информацию по определенному алгоритму, сравнивает ее с предварительно запрограммированными параметрами и вырабатывает необходимые управляющие сигналы, отображаемые на индикаторах панели информации или выдаваемые на электроприводы исполнительных органов.

### 4.2.3. Программное обеспечение средств управления

**Программирование алгоритмов управления по времени [39].** Автоматическое управление в функции времени является одним из наиболее распространенных способов управления в дискретной автоматике. Алгоритм такого управления можно представить в виде двух частей: алгоритма формирования последовательности интервалов времени; алгоритма управления исполнительными устройствами в соответствии с интервалами времени.

Формирование последовательности интервалов времени выполняется с использованием устройств создания выдержек времени (реле времени или таймеров) или счетчика последовательности импульсов заданной длительности. В программируемых контроллерах предпочтительнее использовать первый способ. Во-первых, программирование контроллеров допускает введение большого количества программных таймеров. Во-вторых, такой подход удобнее при отладке системы управления и коррекции значений интервалов времени.

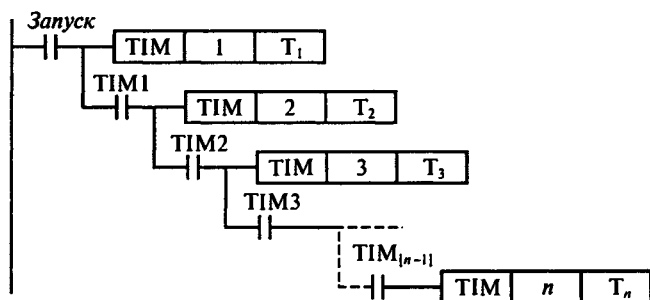


Рис. 4.3

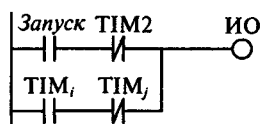


Рис. 4.4

Последовательность интервалов времени формируется последовательностью таймеров, которые составляют генератор интервалов времени (ГИВ). Программная реализация ГИВ на языке релейно-контактных схем приведена на рис. 4.3. В рассматриваемой программе используются таймеры с задержкой на включение. Управляющий бит *Запуск* в общем случае может представлять собой достаточно сложную логическую функцию, зависящую от разных сигналов управления, в том числе и от флагов таймеров, составляющих ГИВ.

При установке бита *Запуск* в единичное состояние (ON) таймеры последовательно формируют интервалы времени, а при установке в нулевое состояние (OFF) все таймеры сбрасываются в течение одного цикла сканирования программы. Бит *Запуск* имеет нулевой интервал времени от начала запуска ГИВ.

Управляющие сигналы на исполнительные устройства формируются в функции состояния бита *Запуск* и флагов таймеров ГИВ. Например, в программе, приведенной на рис. 4.4, бит ИО (исполнительный орган) включается при установке бита *Запуск* в состояние ON и выключается после отработки таймера TIM2, а также включается после отработки таймера TIMi и выключается после отработки таймера TIMj.

Управляющие сигналы на исполнительные устройства формируются в функции состояния бита *Запуск* и флагов таймеров ГИВ. Например, в программе, приведенной на рис. 4.4, бит ИО (исполнительный орган) включается при установке бита *Запуск* в состояние ON и выключается после отработки таймера TIM2, а также включается после отработки таймера TIMi и выключается после отработки таймера TIMj.

**Программирование алгоритмов управления по состоянию объекта.** Для управления по состоянию объекта необходимо иметь информацию об этом состоянии. Поэтому при разработке таких систем обязателен выбор датчиков. Количество датчиков и объем поставляемых ими данных должны быть достаточными для получения полной информации об объекте, необходимой для решения конкретных задач управления.

Можно выделить два способа управления по состоянию объекта:

последовательность действий (состояний объекта) жестко определена, и информация датчиков позволяет контролировать окончание действия или переход объекта в новое состояние, каждое новое действие начинается после окончания предыдущего;

выбор нового действия (состояния объекта) определяется текущими значениями параметров, каждое новое действие начинается после того, как выполняются необходимые для этого условия.

Первый способ называют также программным, а последовательность действий объекта, которая реализуется при этом управлении — программой. В общем случае управление может включать в себя оба способа, например в программе учитывается состояние параметров, в зависимости от которого потребуется та или иная последовательность действий.

**Алгоритм жесткого последовательного управления.** Автоматическое управление в функции состояния объекта при жесткой последовательности операций также является одним из распространенных способов управления в дискретной автоматике. Последовательность операций может выполняться однократно по одной команде или повторяться многократно в повторяющихся циклах. Алгоритм такого управления можно представить в виде двух частей:

алгоритм формирования последовательности действий или шагов управления (отдельных операций, выполняемых в объекте управления);

алгоритм управления исполнительными устройствами в соответствии с шагом управления.

Последовательность шагов (отдельных операций, выполняемых в объекте управления) формируется с использованием датчиков состояния объекта, которые информируют систему управления об окончании текущей операции. Факт окончания предыдущей операции является необходимым условием начала следующей.

Различные шаги управления могут использовать одни и те же датчики или исполнительные устройства, поэтому необходимо фиксировать шаги. В этом случае работа датчиков на последующих шагах не влияет на предыдущие и, соответственно, на управляемые ими исполнительные механизмы. Для этого в программе каждый шаг управления связывается с битовой переменной (признаком шага), которая в момент активизации шага устанавливается в единичное состояние ON.

Таким образом, последовательность действий в объекте управления формируется программой, которая генерирует ряд шагов, последовательно устанавливая связанные с ними биты. По окончании последнего шага все признаки шагов сбрасываются. Если цикл необходимо повторить, то последний шаг должен опять запустить программу последовательности шагов.

Управление исполнительными механизмами определяется текущим шагом. Действие указывается для того механизма, который на этом шаге включается или выключается. Исходя из этого, формируется функция управления исполнительными устройствами: для каждого устройства определяется шаг, на котором оно включается или выключается.

**Алгоритм гибкого управления по состоянию объекта.** Для систем дискретного автоматического управления объектами с конечным числом состояний, у которых алгоритм перехода из одного состояния в другое определяется значениями пара-

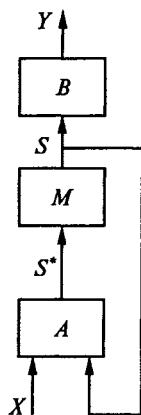


Рис. 4.5

метров объекта и не имеет жесткой последовательности, могут быть использованы известные алгоритмы цифровых автоматов, например автомата Мура.

Блок-схема автомата Мура представлена на рис. 4.5, где  $Y$  — вектор выхода,  $S$  — вектор текущего состояния,  $S^*$  — вектор нового состояния,  $X$  — вектор входа,  $B$  — функция выхода,  $M$  — память,  $A$  — функция перехода. Если алгоритм управления конкретным объектом строится на основе алгоритма автомата Мура, то векторы имеют конкретное содержание. Вектор выхода  $Y$  определяет совокупность сигналов управления на исполнительные устройства объекта управления.

Векторы состояния  $S$  и  $S^*$  отражают режимы работы объекта и его отдельных частей. Вектор входа  $X$  соответствует совокупности внешних сигналов управления, влиянию возмущающих воздействий на объект управления и состоянию текущих параметров самого объекта управления.

### **4.3. Состав и свойства систем управления оборудованием, предназначенным для физической и химической переработки вещества**

#### **4.3.1. Характеристика оборудования и электроприводов**

**Нагнетатели.** *Общие сведения о нагнетателях и их характеристики.* Машина, в которой происходит преобразование механической работы в механическую энергию жидкости, воздуха или газа, называется нагнетателем. К нагнетателям относятся насосы и воздуходувные машины, которые широко применяются на промышленных предприятиях, в коммунальном и сельском хозяйстве и т. д. Воздуходувные машины служат для повышения давления и подачи воздуха или другого газа. В зависимости от степени сжатия воздуходувные машины разделяют на вентиляторы и компрессоры. Мощности электродвигателей этих механизмов колеблются от долей единиц до десятков тысяч киловатт.

Нагнетатели классифицируются по принципу действия и конструкции:

объемные нагнетатели работают по принципу вытеснения, когда давление перемещаемой среды повышается в результате сжатия. К этой группе относят возвратно-поступательные (диафрагменные, поршневые) и роторные (аксиально- и радиально-поршневые, шиберные, зубчатые, винтовые и т. п.) насосы;

динамические нагнетатели работают по принципу силового воздействия на перемещаемую среду. К этой группе относят лопастные (радиальные, центробежные, осевые) нагнетатели и нагнетатели трения (вихревые, дисковые, струйные и т. п.).



Насос — устройство, служащее для напорного перемещения (всасывания, нагнетания) жидкости в результате сообщения ей энергии. Насос преобразует механическую энергию двигателя в энергию перемещаемой жидкости, повышая ее давление. По назначению насосы классифицируют на следующие группы: коммунального и промышленного водоснабжения, погружные для подачи воды или нефти из скважин, циркуляционные, питательные, водоотлива, для транспортировки нефти и других продуктов.

Насосы, как правило, работают в режимах длительной нагрузки, нарабатывая за год большое количество часов; нагрузка на валу приводного двигателя нормальная, перегрузок не возникает. Наиболее совершенным способом регулирования подачи насосов является изменение частоты вращения их двигателей, диапазон регулирования которой обычно невелик; широкое регулирование требуется лишь в отдельных случаях.

Вентилятор — воздуходувная машина, предназначенная для подачи воздуха или другого газа под давлением до 15 кПа при организации воздухообмена. Мощные вентиляторы имеют большой момент инерции, что затрудняет их пуск. В некоторых случаях требуется применение электрического торможения для быстрой остановки рабочего колеса.

Вентиляторы в отличие от других нагнетателей всегда работают на сеть без противодействия, вследствие чего зависимость момента статического сопротивления на валу приводного двигателя от частоты вращения носит квадратичный характер, а подводимая к вентилятору мощность без учета потерь на трение в подшипниках пропорциональна кубу скорости.

Вентиляторы разделяются на центробежные и осевые. Характеристики центробежных вентиляторов аналогичны характеристикам центробежных насосов.

Компрессором называют воздуходувную машину, предназначенную для сжатия и подачи воздуха или какого-либо газа под давлением не ниже 0,2 МПа. Компрессоры являются наиболее мощными нагнетателями. Мощность компрессоров достигает 18 000 кВт и выше. Отличие характеристик компрессоров от других центробежных машин заключается в том, что при изменении частоты вращения изменяется наклон характеристик. Это объясняется тем, что при более высоких частотах вращения повышаются степень сжатия газов и их плотность.

Наиболее типичные области применения компрессоров: генерирование пневматической энергии (энергетические компрессоры), транспортировка газа по магистральным газопроводам, компрессирование воздуха для получения кислорода методом разделения, подача воздуха и кислорода в доменную печь, холодильная техника.

Все компрессоры являются быстроходными. Частота вращения рабочего колеса составляет от 3000 до 20 000 мин<sup>-1</sup>, поэтому для

компрессоров применяются, как правило, быстроходные электродвигатели с номинальной частотой вращения  $3000 \text{ мин}^{-1}$ . В тех случаях, когда требуется большая частота вращения колеса, между двигателем и компрессором устанавливается повышающий редуктор или применяется высокооборотный электродвигатель.

Компрессоры и воздуходувки, как правило, работают в режимах длительной нагрузки, вследствие чего их электроприводы должны быть рассчитаны на длительную работу с большой наработкой часов за год. Все компрессоры, за исключением воздуходувок, работают на сеть с сопротивлением, что определяет существенную зависимость момента сопротивления на валу от частоты вращения.

Пуск компрессоров производится обычно при разгруженной машине соединением полости нагнетания с атмосферой или с полостью всасывания, вследствие чего максимальный момент при пуске не превышает 0,4 номинального.

По принципу работы эти механизмы бывают поршневыми, центробежными и ротационными. Поршневые механизмы в большинстве работают на низких скоростях, а центробежные и ротационные — при средних и высоких скоростях. Особенностью поршневых машин является наличие в их кинематической схеме кривошипно-шатунного механизма.

Характерным для насосов, вентиляторов и компрессоров является зависимость статического момента сопротивления от частоты вращения ( $M_c = f(n)$ ) в соответствии с видом характеристики гидро- или пневмосети, на которую работает нагнетатель.

Сетью называют систему трубопроводов и отдельных агрегатов, присоединенных к нагнетателю. Каждая сеть характеризуется потерями давления, которые можно разделить на внутренние (на трение и в местных сопротивлениях) и внешние (в выходном сечении сети). Сумма внутренних и внешних потерь давления в сети определяет полное гидравлическое сопротивление сети.

Суммарные потери в сети  $\sum \Delta p_c$  складываются из местных потерь и потерь по длине во всех ее элементах [35]:

для вентиляционной сети

$$\sum \Delta p_c = \left( \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{l_i}{d_i} \frac{1}{s_i^2} + \sum_{j=1}^m \frac{\xi_j}{s_j^2} \right) \rho L^2 = kL^2; \quad (4.1)$$

для насосной установки

$$\sum \Delta p_c = \left( \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{l_i}{d_i} \frac{1}{2gs_i^2} + \sum_{j=1}^m \frac{\xi_j}{2gs_j^2} \right) Q^2, \quad (4.2)$$

где  $\lambda_i$  — коэффициент сопротивления по  $i$ -й длине участка сети;  $l_i$  — длина  $i$ -го участка сети;  $d_i$  — диаметр  $i$ -го трубопрово-

да;  $\rho$  — плотность;  $\xi_j$  —  $j$ -й коэффициент местного сопротивления;  $s_i$  —  $i$ -е живое сечение потока;  $k$  — коэффициент, являющийся константой для данной сети;  $L$  — количество воздуха, проходящего в сети;  $g$  — ускорение свободного падения;  $Q$  — подача нагнетателя.

Уравнения (4.1), (4.2) называются характеристиками сетей.

На рис. 4.6 показаны характеристики нагнетателя (насоса) при различных значениях частоты вращения (кривые 1, 2, 3, 4).

К основным характеристикам насосов, вентиляторов и компрессоров относятся [48]:

подача нагнетателя при работе на сеть без статической составляющей напора, пропорциональная частоте вращения нагнетателя:

$$\frac{Q_1}{Q_i} = \frac{\omega_1}{\omega_i} \quad (4.3)$$

или

$$Q = k_Q \omega; \quad (4.4)$$

напор, развиваемый нагнетателем, пропорциональный квадрату частоты вращения:

$$\frac{H_1}{H_i} = \left( \frac{\omega_1}{\omega_i} \right)^2 \quad (4.5)$$

или

$$H = k_H \omega^2; \quad (4.6)$$

полезная мощность, развиваемая нагнетателем и пропорциональная кубу частоты вращения:

$$\frac{N_{\text{пол } 1}}{N_{\text{пол } i}} = \left( \frac{\omega_1}{\omega_i} \right)^3 \quad (4.7)$$

или

$$N_{\text{пол}} = k_P \omega^3; \quad (4.8)$$

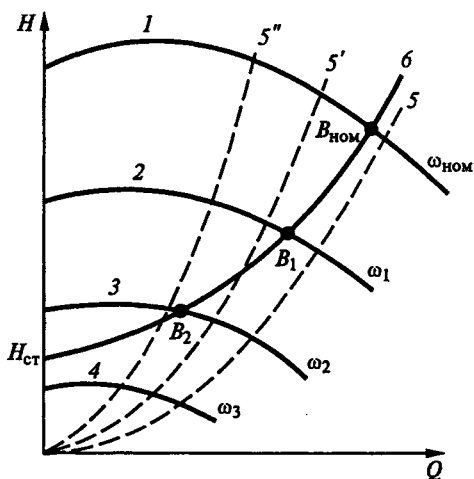


Рис. 4.6

характеристики пропорциональности:

$$H_i = \frac{H_1}{Q_1^2} Q_i^2, \quad (4.9)$$

или

$$H_i = RQ_i^2, \quad (4.10)$$

где  $H_i$  и  $Q_i$  — напор и подача для данной сети при номинальной частоте вращения нагнетателя;  $R$  — сопротивление сети. Характеристики пропорциональности совпадают с характеристиками сети. Поскольку характеристики пропорциональности являются также кривыми равных КПД, то это используют для определения КПД и мощности на валу нагнетателя при его работе с частотой вращения, отличной от номинальной. Этот метод определения КПД нагнетателя при работе с частотой вращения, отличной от номинальной, можно использовать во всех случаях независимо от вида характеристики сети, так как КПД механизма определяется только соотношением  $H = f(Q)$  и частотой вращения.

Формулы приведения (4.3), (4.5), (4.7), (4.9) действительны только для случая, когда нагнетатель работает на сеть, не имеющую статической составляющей напора.

Характеристика сети при наличии противодействия  $H_{ст}$  определяется формулой  $H = H_{ст} + RQ^2$  (на рис. 4.6 кривая б).

Рабочие точки  $B_{ном}$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  находят как точки пересечения характеристики сети с характеристиками механизма, соответствующими различным частотам вращения. Рабочая область регулирования частоты вращения находится в пределах от  $\omega_3$  до  $\omega_{ном}$ . Подача  $Q$  со снижением частоты вращения падает более интенсивно, КПД нагнетателя в этом случае не остается постоянным, а снижается по мере уменьшения частоты вращения.

При отсутствии противодействия (идеальная магистраль) это уравнение будет иметь вид  $H = RQ^2$  (см. кривые 5, 5' и 5'' при различных сопротивлениях сети на рис. 4.6).

Приближенную аналитическую зависимость момента сопротивления на валу нагнетателя от частоты вращения, соответствующую физическим принципам его работы, можно получить, используя характеристики нагнетателя  $H = f(Q)$ .

*Расчет мощности.* Используя такие понятия, как напор насоса  $H$  или давление вентилятора  $P$ , можно определить полезную мощность потока жидкости или воздуха, выходящего из нагнетателя. Если каждой единице веса капельной жидкости сообщается энергия  $H$ , то при весовой подаче насоса, равной  $\gamma Q$ , жидкость выходит из насоса, обладая полезной мощностью

$$N_n = \gamma QH. \quad (4.11)$$

Аналогично рассуждая и рассматривая работу вентилятора, получим, что если каждой единице объема воздуха, прошедшего через вентилятор, сообщается давление  $\Delta P$ , то газ выходит из вентилятора, обладая полезной мощностью

$$N_n = \Delta PL, \quad (4.12)$$

где  $L$  — подача вентилятора.

В любой насосной или вентиляторной установке мощность в различных ее узлах неодинакова. Приводом для нагнетателя является электродвигатель, который потребляет мощность  $N_э$ , преобразуя ее в механическую мощность на валу  $N_в$ . Мощность на валу меньше, чем мощность электрическая, так как часть мощности теряется при работе электродвигателя. Потери мощности в электродвигателе учитываются КПД электродвигателя  $\eta_э$ :

$$N_в = N_э \eta_э. \quad (4.13)$$

Таким образом, нагнетателю подается мощность на валу, или, как иногда ее называют, мощность, потребляемая нагнетателем. Часть мощности на валу передается потоку жидкости или воздуха, проходящему через нагнетатель, тогда из насоса жидкость выходит, обладая запасом мощности, которая называется полезной  $N_n$ . Если насос создает напор  $H$  и через него движется жидкость с расходом  $Q$ , то полезная мощность насоса определяется выражением (4.11).

Необходимая мощность приводного электродвигателя вентиляторов центробежного типа определяется по заданной производительности  $L$  и суммарному напору  $P$ . Расчетную формулу можно вывести исходя из энергии (Дж/с или Вт), которую нужно сообщить движущемуся газу для получения заданных величин  $L$  и  $P$ :

$$W = \frac{mv^2}{2} = \frac{Fv^3\gamma}{2g}, \quad (4.14)$$

где  $m = \frac{Fv\gamma}{2}$  — масса перекачиваемого газа за 1 с, кг/с;  $v$  — скорость движения газа, м/с;  $\gamma$  — удельный вес газа, Н/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $F$  — сечение трубопровода, м<sup>2</sup>.

Пользуясь этим уравнением и имея в виду, что производительность определяется как  $L = Fv$ , а напор  $P = \frac{v^2\gamma}{2g}$  с учетом КПД механизма  $\eta_k$  и КПД передачи  $\eta$ , необходимая мощность (кВт) на валу приводного двигателя

$$N_{\text{дв}} = \frac{Fv^3\gamma 10^{-3}}{2g\eta_k\eta} = \frac{LP10^{-3}}{\eta_k\eta}. \quad (4.15)$$

Для центробежных насосов это уравнение должно быть записано в следующем виде

$$N_{\text{дв}} = \frac{Q(H + \Delta H)\gamma_1 10^{-3}}{\eta_k\eta}, \quad (4.16)$$

где  $H$  — суммарный напор, м;  $\left(H = H_r + \frac{P_2 - P_1}{\gamma_1}\right)$ ,  $H_r$  — геодезический напор, равный сумме высот всасывания и нагнетания, м;  $P_2$  и  $P_1$  — давление в резервуарах, куда и откуда перекачивается жидкость соответственно;  $\Delta H$  — потеря напора в магистрали, м, которая зависит от сечения труб, качества их обработки, профиля трубопровода и т. д.;  $\gamma_1$  — удельный вес жидкости.

Основными характеристиками центробежных механизмов являются зависимости развиваемого напора  $H(P)$  от подачи  $Q(L)$ . Эти зависимости обычно даются заводами-изготовителями в виде графиков  $H = f(Q)$  или  $P = f(L)$  для различных частот вращения механизмов (подобные кривые 1, 2, 3 и 4 приведены на рис. 4.6).

Расчет необходимой мощности двигателя для механизмов поршневого типа можно выполнить по индикаторной диаграмме сжатия (рис. 4.7).

Индикаторную диаграмму строят в координатах  $P-V$ , где  $P$  — давление рабочего тела, Па, а  $V$  — удельный объем рабочего тела, м<sup>3</sup>/кг.

Всасывание вещества происходит при постоянном давлении  $P_1$  и изображается на диаграмме горизонтальной прямой 1—2. Если всасывается атмосферный воздух,  $P_1$  равно атмосферному давлению. В зависимости от конструкции нагнетателя процесс сжатия может быть изотермическим (линия 2—3''), адиабатным (линия

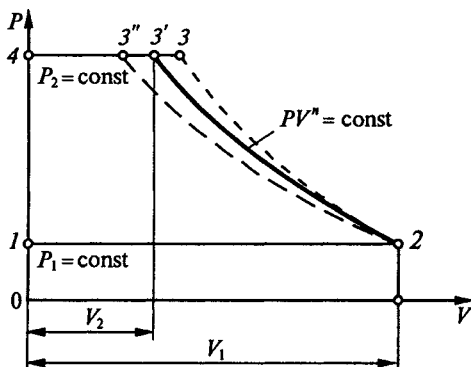


Рис. 4.7

2—3) или политропным (линия 2—3'). Нагнетание вещества изображается горизонтальной прямой 3—4, что соответствует постоянному давлению  $P_2$ . После удаления вещества из рабочего цилиндра давление в нем мгновенно падает от  $P_2$  до  $P_1$  (линия 4—1) и цикл повторяется.

Удельная работа, затрачиваемая на сжатие вещества, в диаграмме  $P—V$  отображается площадью, ограниченной линиями цикла. Наименьшей площади 1—2—3"—4 соответствует цикл с изотермическим сжатием по линии 2—3". Наибольшая работа (площадь 1—2—3—4) совершается при адиабатном сжатии по линии 2—3.

Работа (Дж/кг) при сжатии для политропического процесса

$$A = \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} - 1 \right], \quad (4.17)$$

где  $n$  — показатель политропы, определяемый уравнением  $PV^n = \text{const}$ ;  $P_1$  и  $P_2$  — соответственно начальное и конечное давления, Н/м<sup>2</sup>;  $V_1$  — начальный удельный объем газа или объем 1 кг газа при всасывании, м<sup>3</sup>.

Необходимую мощность (кВт) приводного двигателя можно определить по формуле

$$N_{\text{дв}} = (AQ \cdot 10^{-3}) / (\eta_k \eta), \quad (4.18)$$

где  $Q$  — производительность компрессора, м<sup>3</sup>/с;  $\eta_k$  и  $\eta$  — соответственно индикаторный КПД компрессора при реальном рабочем процессе и КПД механической передачи.

Теоретические индикаторные диаграммы существенно отличаются от действительных, а получение их не всегда возможно. Поэтому при определении мощности на валу компрессора пользуются приближенной формулой, в которой исходными данными являются производительность компрессора, работа изотермического и адиабатического сжатия и КПД компрессора, значения которых приводятся в справочной литературе.

В этом случае необходимая мощность

$$N_{\text{дв}} = \frac{Q}{\eta_k \eta} \frac{A_{\text{и}} + A_{\text{а}}}{2}, \quad (4.19)$$

где  $A_{\text{и}}$  и  $A_{\text{а}}$  — работа соответственно изотермического и адиабатического сжатия 1 м<sup>3</sup> атмосферного воздуха до давления  $P_2$ , выражаемого в кПа.

Для механизмов поршневого типа, работающих при постоянном напоре  $H$ , мощность на валу и скорость вращения находятся в прямой зависимости, так как поршень при каждом ходе преодолевает постоянное среднее усилие независимо от скорости вращения. Поэтому при заданном графике нагрузки на валу механиз-

ма и его номинальной скорости можно предварительно выбрать двигатель по среднему моменту.

*Электроприводы нагнетателей.* Разнообразие условий применения нагнетателей, их конструкций, режимов эксплуатации определяет возможность и экономическую целесообразность использования различных систем электропривода.

Для привода насосов, вентиляторов и компрессоров применяются нерегулируемые электроприводы. Несмотря на очевидные тенденции к более широкому использованию регулируемых электроприводов нагнетателей, особенно при мощности свыше 500 кВт, нерегулируемый привод остается основным в тех случаях, когда режим работы нагнетателя по технологическим условиям постоянен или мощность его невелика и регулирование его производительности без больших потерь энергии может быть осуществлено воздействием на нагнетатель или на его гидравлическую сеть.

Наиболее распространенным приводом (вследствие простоты и наименьших капитальных вложений) является привод с короткозамкнутым асинхронным двигателем, который применяется для нагнетателей мощностью от самой малой до нескольких тысяч киловатт. При мощностях свыше 300 кВт наряду с короткозамкнутым двигателем применяют синхронные двигатели. Когда по условиям пуска необходимо ограничение ускорений или пусковых токов, используют и асинхронные двигатели с фазным ротором.

Регулируемый электропривод применяют в тех случаях, когда: по условиям работы производительность нагнетателя необходимо часто изменять в широких пределах (например насосов систем водоснабжения, энергетических и газовых компрессоров);

механизм длительно работает с производительностью, существенно меньшей номинальной (например шахтные вентиляторы);

нагнетатели нуждаются в автоматическом регулировании производительности с повышенными требованиями к качеству регулирования (например холодильные компрессоры, некоторые циркуляционные и питательные насосы);

нужен электропривод для испытательных и экспериментальных установок (например аэродинамических труб).

Простейшие системы регулируемого электропривода обеспечивают ступенчатое регулирование частоты вращения. Для нагнетателей малой мощности применяют многоскоростные асинхронные двигатели; для нагнетателей большой мощности — асинхронные или синхронные двигатели с питанием от преобразователей частоты.

Системы ступенчатого регулирования частоты вращения привода, а, следовательно, и подачи, не обеспечивают решение задач автоматического регулирования нагнетателей и применяются, как правило, в сочетании с гидро- или аэродинамическими средствами регулирования. Использование таких систем ограничено.



Системы приводов с двигателем постоянного тока, несмотря на отличные регулировочные качества, в большинстве случаев не рациональны для нагнетателей.

Частотно-управляемые приводы используют:

для нагнетателей, расположенных во взрывоопасных цехах;

когда по конструктивным особенностям нагнетателя или по условиям окружающей среды приводной двигатель должен быть асинхронным короткозамкнутым и требуется регулирование его частоты вращения (например для погружных электронасосов);

для безредукторного электропривода быстроходных нагнетателей с частотой вращения свыше  $3000 \text{ мин}^{-1}$ ;

для электроприводов мощностью свыше 20 МВт, для которых машины постоянного тока или асинхронные электродвигатели с фазным ротором не могут быть построены.

В качестве приводов нагнетателей применяют также асинхронные каскады. Достоинство этих приводов применительно к нагнетателям определяется тем, что технико-экономические показатели каскадов зависят от глубины регулирования, поскольку преобразованию в этих приводах подвергается не полная энергия, потребляемая приводом, а лишь часть ее, пропорциональная диапазону регулирования. Нагнетатели в большинстве случаев нуждаются в неглубоком регулировании, поэтому каскадные схемы асинхронного привода для приводов средней и большой мощности рациональны для регулирования частоты вращения нагнетателей.

Вентильные приводы и каскады получили промышленное применение для нагнетателей мощностью от десятков до нескольких тысяч киловатт. Каскадные приводы, а также машины двойного питания являются рациональной системой регулируемого электропривода для нагнетателей большой и средней мощности при ограниченном изменении скорости от номинального значения.

**Дробильно-размольные механизмы.** Эти механизмы применяются для дробления и измельчения горных пород, продуктов химической промышленности, отходов металлургического производства и т.д. К ним относят роторные, конусные, щековые и валковые дробилки, а также шаровые мельницы. Режимы работы перечисленных механизмов существенно отличаются друг от друга. Многие из них по условиям технологического процесса требуют обеспечения регулирования скорости исполнительного органа в широком диапазоне.

Приводы дробильно-размольных механизмов работают в тяжелых условиях: при непрерывных ударных нагрузках, большом количестве пыли и микрочастиц, повышенной влажности, вибрациях и неравномерной нагрузке. В этих условиях предпочтение отдают приводам с АД как более простым и надежным. Данный тип привода обеспечивает широкий диапазон регулирования ско-

рости, позволяет работать агрегату с широким спектром нагрузок и дробимых материалов.

Выбор мощностей приводов дробилок определяется требуемой производительностью, коэффициентом дробления, свойствами материала и потерями в электрической и механической частях дробильных агрегатов и вспомогательных механизмов.

Режим работы дробилок длительный, но нагрузка непостоянна. Возмущающее воздействие на систему привода оказывает случайное сочетание нескольких факторов: твердости и вязкости материала, изменения сил трения в процессе дробления, неравномерности прохождения дробимого вещества. Поэтому машины для дробления руд можно отнести к группе установок с резко изменяющейся нагрузкой в процессе работы.

Производительность дробилок в процессе работы меняется в широких пределах. Это обусловлено рядом факторов: содержанием ценного компонента в руде или горной породе, ее влажностью, физическими свойствами и гранулометрическим составом руды. Высокая влажность руды, поступившей на дробление, вызывает ее «зависание» в бункерах, забивку разгрузочных отверстий и подпрессовку дробилок. С целью стабилизации и регулирования производительности дробления и обеспечения требуемого гранулометрического состава реализуют плавное регулирование скорости всех механизмов.

Одной из важных особенностей режима работы дробилок крупного дробления является нелинейность параметров и характеристик их электроприводов (наличие упругостей, зазоров и др.). Другой особенностью механизмов дробления является стохастический характер нагрузок, действующих в их элементах, что определяется стохастическим характером сопротивляемости горных пород разрушению.

**Смесители.** Эти устройства служат для обеспечения равномерного распределения твердой фазы в жидкости, смешения различных жидкостей для получения эмульсии, а также для интенсификации процессов растворения и химических реакций. Обычно электроприводы агрегатов с перемешивающими устройствами работают в тяжелых условиях окружающей среды: повышенная температура и влажность, наличие агрессивных пожаро- и взрывоопасных пыли и газов.

Для перемешивания порошковых материалов применяются барабанные и лопастные смесители периодического действия, шнековые и центробежные смесители непрерывного действия.

Резиносмесители используются для смешения и механической пластикации натурального каучука. Требуемый диапазон регулирования скорости резиносмесителя составляет 3 : 1, точность стабилизации 5... 10 %. При этом следует учитывать некоторые особенности его работы. Резиносмеситель обычно работает с различными смесями: при более жестких смесях — на низких частотах

вращения, при этом обычно требуются максимальные моменты; при более мягких смесях — на высоких, при этом моменты значительно меньше. Поэтому часто в резиносмесителях требуется поддержание мощности постоянной во всем диапазоне изменения частоты вращения.

Широко применяют быстроходные резиносмесители, мощности электродвигателей которых достигают 800... 1200 кВт.

Среда при обработке резиновых смесей в резиносмесителях характеризуется наличием токопроводящей тонкодисперсной пыли — сажи, поэтому электрооборудование, стоящее вблизи агрегата, должно иметь сажепыленепроницаемое исполнение.

**Центрифуги.** Эти механизмы применяют для разделения неоднородных жидких смесей на твердую и жидкую фазы под воздействием центробежных сил, ускоряющих процесс осаждения. По технологическому назначению они подразделяются на фильтрующие и осадительные. По принципу работы центрифуги делятся на машины периодического и непрерывного действия.

Электрооборудование центрифуг обычно работает в условиях взрывоопасной, химически агрессивной среды с повышенной влажностью и запыленностью. Аппаратура, установленная на самих центрифугах, подвергается значительным вибрациям и тряске. Наибольшую мощность электродвигателей имеют центрифуги периодического действия, применяемые в производстве сахара.

### **4.3.2. Управление вентиляторным, насосным и компрессорным оборудованием**

Все регулирующие устройства в зависимости от их влияния на характеристику сети или нагнетателя можно разделить на три группы. В первую группу входят устройства, дросселирующие сеть, т. е. изменяющие характеристику сети, но не изменяющие характеристику нагнетателя. К таким устройствам относятся клапаны, шибберы, задвижки, диафрагмы и т. п. При дросселировании параметры рабочей точки (подача, давление, мощность и КПД) определяют на характеристике нагнетателя при неизменной частоте вращения рабочего колеса. Вторую группу образуют устройства, изменяющие частоту вращения рабочего колеса (характеристику нагнетателя). При этом характеристика сети не меняется. Известно много устройств, позволяющих изменять частоту вращения рабочего колеса: электродвигатели постоянного и переменного тока, фрикционные передачи, гидромуфты, индукторные муфты скольжения и др. Третья группа включает в себя устройства, одновременно изменяющие характеристику нагнетателя и сети. Примером такого устройства является входной направляющий аппарат, устанавливаемый в вентиляционном агрегате. Сопротивление са-

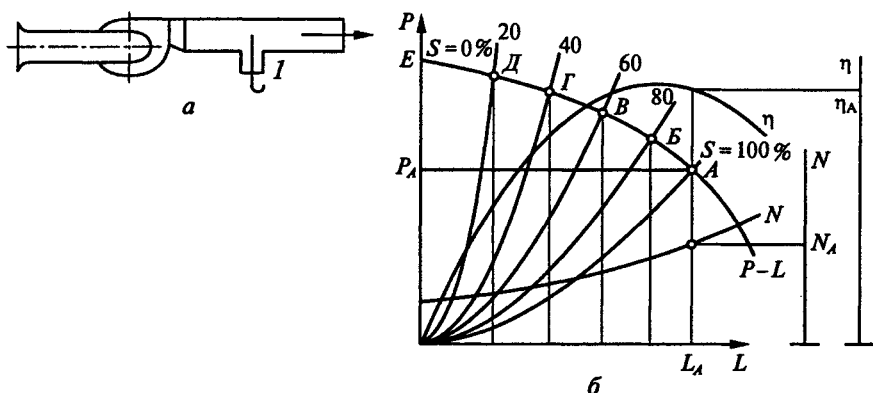


Рис. 4.8

мого направляющего аппарата необходимо учитывать при снятии характеристики вентиляционного агрегата.

Изменение подачи или давления нагнетателя при регулировании, отнесенное к подаче или давлению при исходном режиме, характеризует глубину регулирования.

**Дросселирование.** Дросселирование при  $\omega = \text{const}$  — самый неэкономичный, но весьма распространенный способ регулирования. Он заключается в искусственном введении в сеть дополнительного сопротивления, например в виде шибера *I* (рис. 4.8, а). Так как сопротивление сети при этом увеличивается, то характеристика сети становится более крутой и рабочая точка передвигается из положения *A* (рис. 4.8, б) по характеристике вентилятора влево вверх, занимая последовательно положения *Б*, *В* и т.д. и определяя новые значения параметров работы. Поскольку наибольшая подача достигается при полностью открытом шибере, то такой способ регулирования применяется только с целью уменьшения подачи.

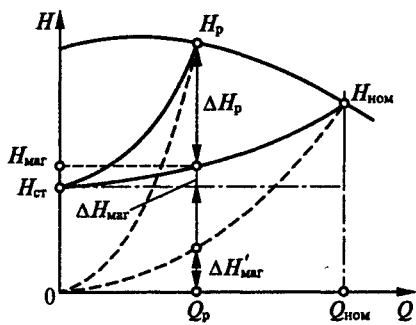


Рис. 4.9

Аналогично выполняется изменение результирующего сопротивления магистрали и для насосов.

При неизменной скорости рабочая точка механизма перемещается по характеристике  $Q = f(H)$  в сторону снижения подачи до точки пересечения с новой характеристикой магистрали (рис. 4.9). При этом часть напора  $\Delta H_p$  теряется на регулирующем устройстве. Для оценки КПД  $\eta_{дс}$  дросселирующего спо-

соба регулирования примем, что КПД механизма и двигателя остаются неизменными при изменении подачи. Тогда

$$\eta_{\text{лс}} = \frac{H_{\text{маг}} Q_p}{(H_{\text{маг}} + \Delta H_p) Q_p} = \frac{H_{\text{ст}}}{H_p} + \frac{\Delta H_{\text{маг}}}{H_p}, \quad (4.20)$$

где  $H_{\text{маг}}$  — напор в магистрали после регулирующего органа;  $Q_p$  — подача механизма совместно с регулирующим органом;  $H_p$  — напор, создаваемый механизмом перед регулирующим органом;  $\Delta H_{\text{маг}}$  — потери напора в магистрали.

Из формулы (4.20) и рис. 4.9 следует, что КПД данного способа регулирования тем ниже, чем меньше статический напор  $H_{\text{ст}}$ . При  $H_{\text{ст}} = 0$

$$\eta_{\text{лс}} = \frac{\Delta H'_{\text{маг}}}{H_p} = \frac{H_{\text{ном}}}{H_p} \left( \frac{Q_p}{Q_{\text{ном}}} \right)^2 < \left( \frac{Q_p}{Q_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (4.21)$$

где  $H_{\text{ном}}$  и  $Q_{\text{ном}}$  — номинальные значения напора и подачи механизма.

Из формулы (4.21) следует, что снижение КПД имеет примерно квадратичную зависимость от диапазона регулирования подачи  $D = Q_{\text{ном}}/Q_p$ . При малом статическом напоре и больших требуемых диапазонах изменения подачи данный способ регулирования весьма неэкономичен.

Это ограничивает область его применения главным образом маломощными установками с относительно небольшим требуемым диапазоном регулирования.

Зависимости КПД от расхода при регулировании задвижкой (1) и изменением частоты вращения (2), рассчитанные для конкретного насоса, приведены на рис. 4.10. При регулировании центробежных насосов, подающих воду, дросселирующее устройство нужно располагать на напорном трубопроводе, так как если установить его на всасывающем трубопроводе, то при регулировании могут возникать кавитационные явления в потоке и нарушение нормальной работы насоса.

*Регулирование нагнетателей путем изменения частоты вращения.* Механизм регулирования давления (напора) и подачи насоса при изменении характеристик сети показан на рис. 4.11. Если необходимо обеспечить регулирование на-

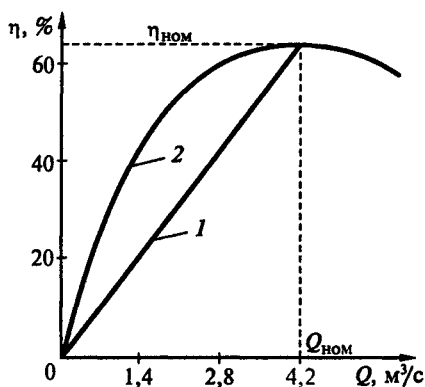


Рис. 4.10

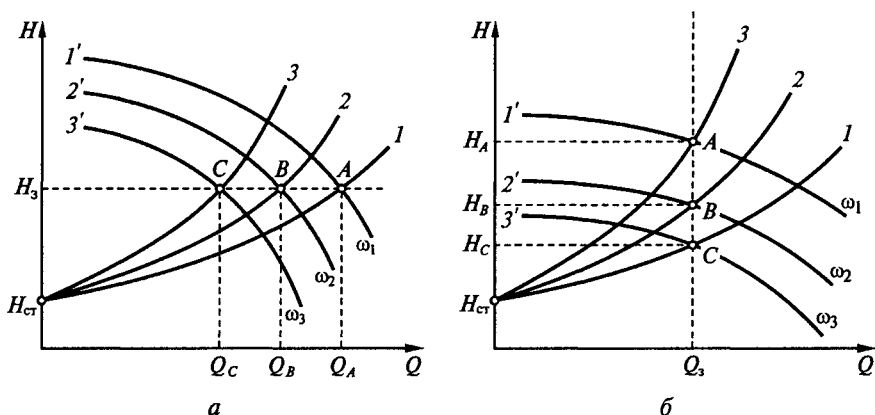


Рис. 4.11

пора и его стабилизацию в соответствии с заданным значением  $H_3$  при произвольном изменении характеристик сети от 1 до 3 (см. рис. 4.11, а), то выполняют измерение давления в магистрали и с помощью регулятора давления автоматически меняют частоту вращения насоса (от  $\omega_1$  до  $\omega_3$ ) так, чтобы давление оставалось постоянным. При этом характеристики насоса изменяются от  $1'$  до  $3'$ . Расход насоса меняется от  $Q_A$  до  $Q_C$ . Точки  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , на характеристиках насоса  $1'$ ,  $2'$ ,  $3'$  являются рабочими точками при разных сопротивлениях магистрали, соответствующих характеристикам сети 1, 2, 3. При изменении заданного значения  $H_3$  будут соответственно меняться характеристики и параметры насоса.

Аналогично обеспечиваются регулирование расхода и его стабилизация в соответствии с заданным значением  $Q_3$  при произвольном изменении характеристик сети (см. рис. 4.11, б). Такой случай имеет место в технологических агрегатах химической промышленности, когда по значению заданного расхода насоса осуществляют расчет массы (объема) жидкости, поступающей в агрегат за известный интервал времени.

Стабилизация расхода при изменении характеристики сети будет сопровождаться изменением напора от  $H_A$  до  $H_C$ , при этом частота вращения насоса будет меняться от  $\omega_1$  до значения  $\omega_3$ .

Насосные агрегаты обычно объединяются в насосные станции, при этом несколько насосов работает параллельно на одну сеть.

Регулирование подачи насосной станции изменением частоты вращения насосов, имеющих различные характеристики, иллюстрируется рис. 4.12. Если два насоса с суммарной характеристикой 2 работают на сеть с характеристикой 1 в точке  $A$  с производительностью  $Q_A$  и необходимо уменьшить их производительность до  $Q_A'$ , то это можно сделать двумя способами: уменьшить частоту вращения

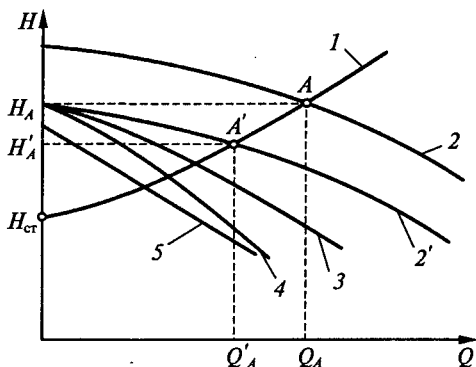


Рис. 4.12

обоих насосов (их характеристики 3 и 4 и суммарная характеристика 2') или снизить, но более значительно, частоту вращения одного из насосов (характеристика 5 при сниженной частоте вращения). Регулирование производительности изменением частоты вращения одновременно двух насосов по своим показателям равноценно регулированию частоты вращения насоса при его одиночной работе.

С точки зрения экономичности регулирования более выгодным является одновременное изменение частоты вращения всех параллельно работающих насосов. Однако это связано с увеличением капитальных затрат на оснащение всех агрегатов регулируемым электроприводом. Поэтому для большинства насосных станций достаточно иметь только один регулируемый агрегат и осуществлять более глубокое регулирование отключением отдельных насосов.

Ряд применяемых компрессоров, насосов и вентиляторов не требует регулирования скорости: вентиляционные установки цеховых помещений, пожарные насосы, насосы некоторых водопроводных магистралей, подавляющее большинство заводских компрессорных установок и др. Поэтому для них используют асинхронные или синхронные (обычно при мощностях свыше 300 кВт) двигатели переменного тока, управление которыми осуществляется магнитными или бесконтактными пускателями (при малых мощностях), стандартными или специальными пусковыми станциями. Для асинхронных и синхронных двигателей такие станции предусматривают прямой, реакторный и автотрансформаторный способы пуска.

**Совместная работа нагнетателей.** В состав технологических схем подачи воздуха в производственные помещения или подачи воды на определенных технологических операциях входят, как правило, несколько нагнетателей. Совместная работа нагнетателей в большинстве случаев вызвана следующими причинами:

один нагнетатель не может обеспечить требуемую подачу или давление, а замена его другим, более мощным, невозможна;

в процессе эксплуатации в соответствии с требованиями технологического процесса возникают режимы, связанные с продолжительным изменением расхода и сопротивления сети (изменение режима осуществляется отключением одного из нагнетателей);

требуется обеспечить надежность работы всей системы в целом; архитектурно-планировочные решения зданий приводят к созданию сложных разветвленных сетей, для регулирования которых с наибольшей эффективностью требуется установка нескольких нагнетателей.

Включение нагнетателей в совместную работу может быть параллельным, последовательным и смешанным (комбинированным).

Рассмотрим работу нагнетателей при их совместной работе на примере вентиляторов с параллельным включением [35]. Все ниже изложенное будет справедливо и для насосов. Но вместо параметра  $P$  необходимо иметь в виду  $H$ , а вместо  $L$  —  $Q$ . Характеристика  $H$  смещена на значение  $H_{ст}$ .

*Параллельное включение нагнетателей.* Параллельное включение двух и большего числа нагнетателей рекомендуется тогда, когда требуется увеличение подачи, а соответствующее увеличение частоты вращения рабочего колеса или размеров нагнетателя невозможно из-за чрезмерного усиления шума, конструктивных или архитектурно-планировочных причин.

Известны три основные схемы параллельного включения нагнетателей: полностью параллельное включение (рис. 4.13, а) и полупараллельное включение по схемам, показанным на рис. 4.13, б и в.

На рис. 4.13 в сеть включены нагнетатели с одинаковыми характеристиками. Для упрощения анализа пренебрежем сопротивлением индивидуальных участков сети (участки 1—2). В этом случае, как и в случае любого совместного включения, главным является определение режима работы не только всей системы в целом, но и каждого из нагнетателей. Функциональная зависимость давления нагнетателя от его подачи сложна и чаще всего задается графически в виде характеристики  $P = f(L)$ , поэто-

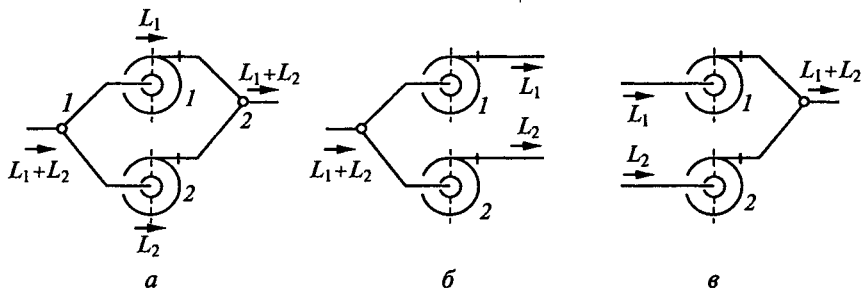


Рис. 4.13



му наиболее простой способ анализа — графический. Обычно применяют метод суммарной характеристики нагнетателей.

Давления, создаваемые каждым нагнетателем в точках 1 и 2, одинаковы, а общая подача равна сумме подач отдельных нагнетателей. Отсюда следует правило построения суммарной характеристики параллельно включенных нагнетателей: при одинаковом давлении нужно сложить подачи.

Построение суммарной характеристики давления показано на рис. 4.14. Абсциссы  $a$ , представляющие собой подачу одного нагнетателя, суммируются при каждом значении давления. При включении нагнетателей в сеть с характеристикой  $(1 + 1)$  режим работы определяется точкой  $A$ . При этом суммарная подача нагнетателей определяется величиной  $L_{A(1+1)}$ , а суммарное давление — величиной  $P_{A(1+1)}$ , при этом  $P_{1(1+1)} = P_{A(1+1)}$ , т. е. давление, создаваемое каждым нагнетателем при совместной работе, равно суммарному давлению. Подача каждого нагнетателя составляет половину общей и может быть определена графически по положению точки  $A''$ , т. е.  $L_{1(1+1)} = L_{A''} = 0,5L_{A(1+1)}$ . КПД обоих нагнетателей равен КПД каждого из них и определяется пересечением ординаты, проходящей через точку  $A''$ , с характеристикой КПД нагнетателя. Пересечение этой ординаты с характеристикой мощности определяет затраты мощности каждым нагнетателем. Суммарные затраты мощности равны сумме мощностей отдельных нагнетателей:  $N_{A(1+1)} = 2N_{1(1+1)}$ .

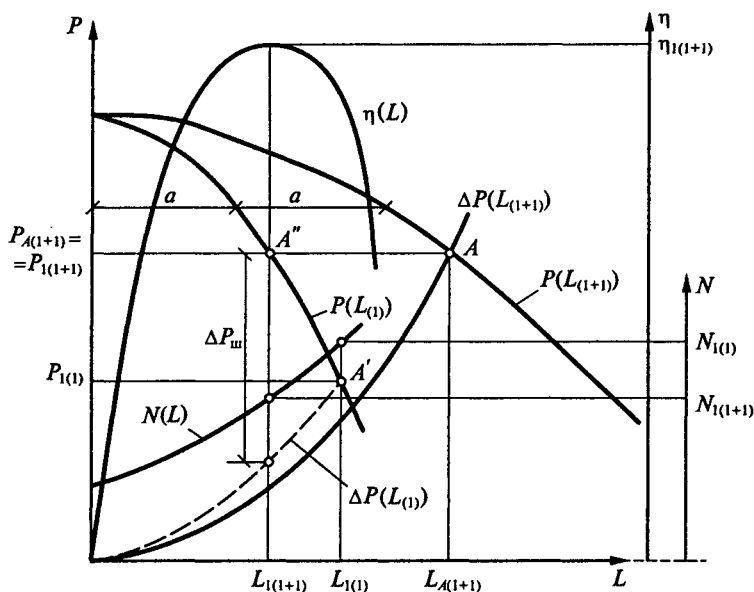


Рис. 4.14

При отключении одного из нагнетателей характеристика сети  $\Delta P(L_{(1)})$  становится круче вследствие уменьшения площади поперечного сечения для прохода воздуха между точками 1 и 2 (см. рис. 4.13, а). Рабочая точка переходит из положения А в положение А' (см. рис. 4.14). При этом параметрами работы нагнетателя становятся  $L_{1(1)} > L_{1(1+1)}$ ,  $P_{1(1)} < P_{1(1+1)}$  и  $N_{1(1)} > N_{1(1+1)}$ . Это приводит к перегреванию обмоток электродвигателя. Поэтому при выключении одного из нагнетателей его индивидуальный участок необходимо перекрыть клапаном (чтобы исключить бесполезное перетекание воздуха по нему из-за разности давлений  $P_2 - P_1$ ), а в сеть оставшегося в работе нагнетателя ввести дополнительное давление  $\Delta P_{ш}$  так, чтобы рабочая точка переместилась в положение А". При этом затраты мощности составляют  $N_{1(1+1)}$ , и перегревания электродвигателя не происходит.

Построение суммарной характеристики нагнетателей с разными характеристиками в принципе не отличается от предыдущего построения.

Если несколько нагнетателей, имеющих разные характеристики, подключить к одной камере, то в ней можно создать настолько значительное давление, что один из нагнетателей не сможет ему противодействовать, и поток воздуха пойдет через этот нагнетатель в обратную сторону. При этом разность полных давлений с обеих сторон нагнетателя останется положительной, а поток изменит направление и нагнетатель, следовательно, будет работать при отрицательных подачах ( $L < 0$ ). Направление вращения рабочего колеса при этом не изменяется, поэтому нагнетатель по-прежнему потребляет мощность (в противном случае нагнетатель стал бы работать как турбина, отдавая мощность на вал).

При параллельной работе нагнетателей с разными характеристиками представляется целесообразным определять средний КПД нагнетателей:

$$\eta_{ср} = \frac{P_1 L_1 + P_2 L_2}{P_1 L_1 / \eta_1 + P_2 L_2 / \eta_2}. \quad (4.22)$$

Из формулы (4.22) следует, что более мощные нагнетатели должны работать с максимальным КПД, а регулировать расход в системе целесообразнее менее мощным нагнетателем.

Рассмотренный выше метод построения суммарной характеристики нагнетателей можно применять при любом числе нагнетателей.

*Последовательное включение нагнетателей.* Последовательное включение двух или большего числа нагнетателей применяется тогда, когда давление, создаваемое одним нагнетателем, недостаточно для преодоления сопротивления сети.

При последовательном включении одно и то же количество воздуха последовательно перемещается всеми нагнетателями, а

давление, необходимое для преодоления сопротивления всей сети, равно сумме давлений, создаваемых каждым нагнетателем. Так как кинетическая энергия, сообщенная потоку первым нагнетателем, не теряется на удар, то общее статическое давление больше суммы статических давлений отдельных нагнетателей. Например, три одинаковых последовательно включенных нагнетателя создают полное давление  $3P_{1(1+1+1)}$ .

Если нагнетатель включить последовательно с более мощным, то его подача может увеличиться до значений, гораздо больших, чем его собственная максимальная подача. При этом он станет сопротивлением для более мощного нагнетателя, т. е. при сохранении направления подачи ( $L > 0$ ) разность давлений с обеих сторон нагнетателя изменит знак.

Работа нагнетателя возможна при  $L > 0$  и  $P > 0$  (I квадрант), при  $L < 0$  и  $P > 0$  (II квадрант), при  $L > 0$  и  $P < 0$  (IV квадрант). Работа нагнетателя в III квадранте невозможна, так как поток не может пойти в обратном направлении через нагнетатель ( $L < 0$ ) при давлении перед нагнетателем бóльшим, чем за ним. Обычно характеристику снимают только в I квадранте, т. е. при нормальной работе нагнетателя, тем более что для снятия характеристики во II и IV квадрантах требуется специальное оборудование.

**Система управления насосом с преобразователем частоты.** Наиболее современным является регулирование с помощью преобразователей частоты, которые позволяют плавно регулировать частоту вращения электродвигателя насоса и поддерживать давление в гидросистеме при разных расходах перекачиваемой жидкости. При малых расходах жидкости двигатель насоса вращается с малой скоростью, необходимой только для поддержания номинального давления, и не расходует лишней энергии. При увеличении расхода жидкости преобразователь увеличивает частоту вращения электродвигателя, повышая производительность насоса при сохранении заданного давления.

На рис. 4.15 показана функциональная схема регулирования электродвигателя насоса с использованием преобразователя частоты FR-A500 фирмы «Mitsubishi electric» [52]. На вход системы подаются сигналы задания давления и сигнал реального давления, получаемый с датчика давления, установленного в цепи обратной связи. Отклонение между реальным и заданным значениями давления преобразуется ПИД-регулятором в сигнал задания частоты для преобразователя. Под воздействием сигнала задания преобразователь изменяет частоту вращения электродвигателя насоса и стремится привести разность между заданным и реальным значениями к нулю. Таким образом, давление в системе поддерживается равным заданному и не зависит от расхода.

Современные преобразователи частоты позволяют создавать системы управления (СУ) без дополнительных аппаратных средств,

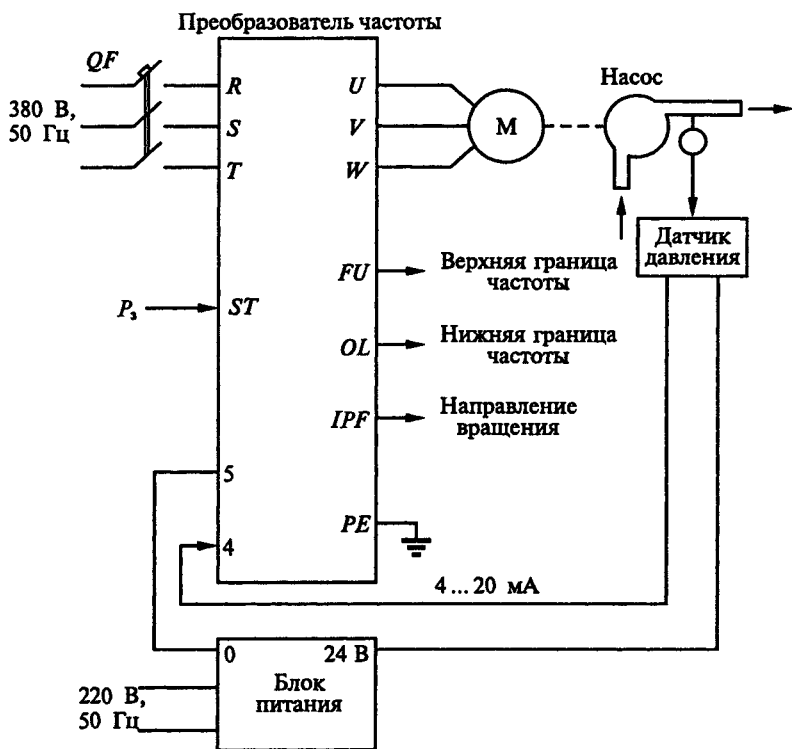


Рис. 4.15

так как имеют встроенные программные функции, позволяющие реализовывать узел сравнения и ПИД-регулятор. Для реализации системы требуется только внешний датчик давления.

**Система управления насосом с использованием нечеткой логики.** Рассмотрим пример управления асинхронным электроприводом центробежного насоса для стабилизации давления в системе во-

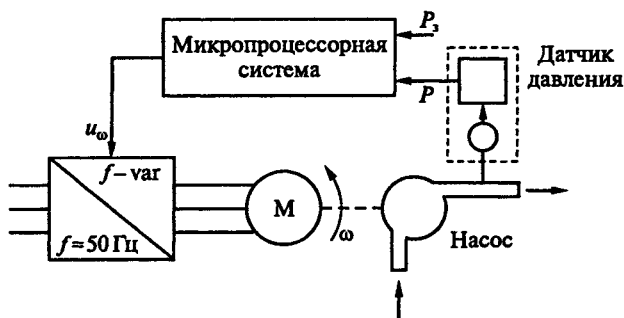


Рис. 4.16

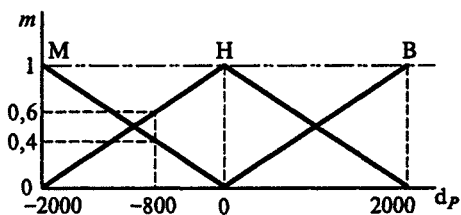


Рис. 4.17

доснабжения. Система управления (рис. 4.16) включает в себя микропроцессорную систему, реализующую управление по правилам нечеткой логики, и преобразователь частоты, позволяющий регулировать подачу насоса изменением его частоты вращения. Функции принадлежности входных и выходных сигналов, правила принятия решений формируются на основе знаний эксперта (опытного специалиста) о ходе технологического процесса.

Значение давления  $P$  определяется датчиком давления, сигнал с которого после двенадцатиразрядного аналого-цифрового преобразования поступает в микропроцессорную систему управления в виде целого числа (от 0 до 4000). Положим, что значение требуемого давления находится на середине диапазона измерения датчика.

Заданное давление  $P_z$  примем равным 2000. Тогда отклонение текущего давления (ошибка регулирования)  $d_P$  от заданного значения находится в диапазоне от минус 2000 до плюс 2000. Для перехода к нечетким переменным по отклонению давления примем стандартную форму функций принадлежности трех термов: уменьшить (М), норма (Н) и увеличить (В) (рис. 4.17).

Чтобы более качественно управлять процессом, вычисляется также скорость изменения давления  $v_P$ , которая может принимать значения от минус 2000 до плюс 2000. Для перехода к нечетким переменным скорости изменения давления примем стандартную форму функций принадлежности трех термов: уменьшить (М), норма (Н) и увеличить (В) (рис. 4.18).

Для регулирования с помощью преобразователя частоты скорости электропривода насоса используем сигнал задания скорости  $u_\omega$ , который поступает с выхода цифроаналогового преобразовате-

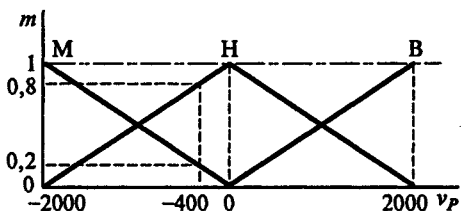


Рис. 4.18

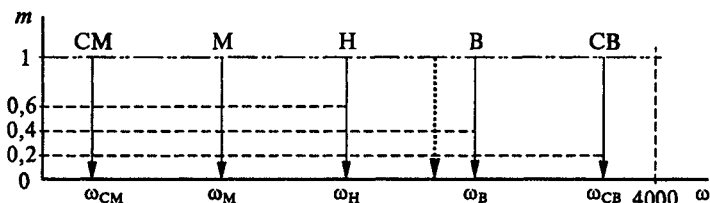


Рис. 4.19

ля микропроцессорной системы управления. Формированием управляющего сигнала обеспечивается изменение частоты вращения  $\omega$ , которое определяется целым числом в диапазоне от 0 до 4000. В лингвистических переменных нечеткой логики управление изменением частоты вращения может быть представлено пятью термами: сильно уменьшить (СМ), уменьшить (М), норма (Н), увеличить (В) и сильно увеличить (СВ) (рис. 4.19).

Если давление меньше и его значение не изменяется, то частоту вращения насоса увеличиваем. Через нечеткие переменные это правило можно записать следующим образом: если  $d_p = M$  и  $v_p = H$ , то  $\omega = B$ .

Если давление меньше и его значение уменьшается, то частоту вращения насоса сильно увеличиваем. Через нечеткие переменные это правило можно записать так: если  $d_p = M$  и  $v_p = M$ , то  $\omega = CB$ .

Аналогично составляются остальные правила. Если анализировать все возможные состояния условий, то для рассматриваемого случая можно составить девять правил. Совокупность всех правил удобно представить в виде таблицы, в которой столбцы соответствуют условиям одного параметра, строки — условиям другого параметра, а на их пересечениях записываются выводы, соответствующие этим условиям (табл. 4.1).

В качестве метода дефазификации примем метод центра тяжести. Рассмотрим, как определяется управление в некоторой точке движения системы.

Допустим имеет место отклонение давления, равное минус 800, оно продолжает снижаться со скоростью минус 400. В этом случае термы М и Н отклонения давления имеют степень принадлежно-

Таблица 4.1

Отклонение давления $d_p$	Скорость изменения давления $v_p$		
	М	Н	В
М	СВ	В	Н
Н	В	Н	М
В	Н	М	СМ

сти 0,4 и 0,6 соответственно (см. рис. 4.17), а термы М и Н скорости изменения давления равны 0,2 и 0,8 (см. рис. 4.18). Остальные термы имеют степень принадлежности, равную 0. Для принятой формы записи правил степень принадлежности antecedента каждого правила определяется по минимуму всех условий, т.е. для вывода имеют значения только правила, содержащие условия с ненулевыми степенями принадлежности:

1. Если  $d_p = M$  и  $v_p = M$ , то  $\omega = CB$ ;
2. »  $d_p = M$  и  $v_p = H$ , »  $\omega = B$ ;
3. »  $d_p = H$  и  $v_p = M$ , »  $\omega = B$ ;
4. »  $d_p = H$  и  $v_p = H$ , »  $\omega = H$ .

Каждое из этих правил дает степень принадлежности выводу по минимуму:

1.  $m_{CB}(\omega) = \min \{m_M(d_p); m_M(v_p)\} = \min \{0,4; 0,2\} = 0,2$ ;
2.  $m_B(\omega) = \min \{m_M(d_p); m_H(v_p)\} = \min \{0,4; 0,8\} = 0,4$ ;
3.  $m_B(\omega) = \min \{m_H(d_p); m_M(v_p)\} = \min \{0,6; 0,2\} = 0,2$ ;
4.  $m_H(\omega) = \min \{m_H(d_p); m_H(v_p)\} = \min \{0,6; 0,8\} = 0,6$ .

На втором шаге формирования нечеткого вывода определим степень принадлежности термов выходной переменной по максимуму. Например, выражения п. п. 2 и 3 дают разные значения степени принадлежности для терма В, но берется максимальное:

$$m_B(\omega) = \max \{m_B(\omega)_2; m_B(\omega)_3\} = \max \{0,4; 0,2\} = 0,4.$$

Таким образом, при данном состоянии входных сигналов степени принадлежности термов выходной переменной имеют значения (см. рис. 4.19):

$$\{m_{CM}, m_M, m_H, m_B, m_{CB}\} = \{0; 0; 0,6; 0,4; 0,2\}. \quad (4.23)$$

Для перехода от нечетких выводов к управляющему воздействию используем формулу дефазификации по методу центра тяжести:

$$\omega = \frac{\omega_{CM}m_{CM} + \omega_M m_M + \omega_H m_H + \omega_B m_B + \omega_{CB}m_{CB}}{m_{CM} + m_M + m_H + m_B + m_{CB}}. \quad (4.24)$$

Подставив в формулу (4.24) численные значения, получим

$$\omega = \frac{200 \cdot 0 + 1100 \cdot 0 + 2000 \cdot 0,6 + 2900 \cdot 0,4 + 3800 \cdot 0,2}{0 + 0 + 0,6 + 0,4 + 0,2} = 2600.$$

Таким образом получено значение сигнала управления приводом насоса.

### 4.3.3. Управление мельничным и дробильным оборудованием

В данных механизмах в основном применяются асинхронные реверсивные электроприводы с частотным и частотно-токовым управлением, машины двойного питания и всевозможные меха-

нические вариаторы, управляемые муфты и т.д. Применение управляемых электроприводов постоянного тока весьма ограничено из-за специфических условий работы.

Автоматическое управление режимом работы процесса дробления включает в себя: управление загрузкой материала в дробилку; регулирование скорости дробления, исходя из минимума затрат электроэнергии; регулирование гранулометрического состава продуктов дробления.

Производительность дробилки в зависимости от прочности и крупности дробимого материала ограничивается пропускной способностью или нагрузкой двигателя дробилки. При дроблении прочных пород количество материала, подаваемого в дробилку, должно ограничиваться допустимой нагрузкой двигателя привода дробилки; если дробимый материал обладает малой прочностью, то его количество ограничивается пропускной способностью дробилки. Поэтому управление загрузкой материала в дробилку для исключения перегрузки двигателя привода дробилки или завала дробилки осуществляют в зависимости от нагрузки двигателя и уровня материала в дробилке. Значительное повышение эффективности процесса дробления дает управление загрузкой материала в зависимости от размеров дробимого материала или на основе измерения косвенных параметров, характеризующих этот показатель (например виброскорости в конусной дробилке и амплитуды колебаний корпуса щековой или валковой дробилки).

Управление режимом работы дробилки при регулировании гранулометрического состава продуктов дробления осуществляют изменением размера разгрузочной щели или частоты качаний подвижного органа дробилки в зависимости от размеров продуктов дробления или параметров, косвенно характеризующих прочность и размеры продуктов дробления, таких как удельный расход энергии на дробление, амплитуда колебаний корпуса дробилки.

На обогатительных фабриках, где продукты дробления подвергаются последующему измельчению, наиболее приемлемым критерием управления является получение минимальных размеров продуктов дробления при заданной производительности технологического комплекса дробления. Такое управление процессом дробления позволяет получать продукты дробления наименьших размеров, что снижает затраты на измельчение и, следовательно, на подготовку сырья к обогащению в целом. Системный подход при выборе режима работы каждой дробилки является основой наиболее эффективного управления технологической линией дробления. Каждый агрегат должен быть максимально задействован для достижения цели управления — получения продуктов дробления с минимальными размерами при заданной производительности технологической линии дробления.

В дробильных механизмах система управления осуществляет:



контроль минимального уровня вещества в бункере над пластинчатым питателем, установленным перед дробилкой. Чтобы избежать повреждения пластин питателя при загрузке вещества, в бункере должна быть каменная «постель»;

контроль завала дробилок, применяемый для предупреждения вынужденных остановок;

контроль состояния подшипников дробилок, предусматривающий сигнализацию о перегревании подшипников, измерение температуры масла на сливе из подшипников и сигнализацию о прекращении потока масла с одновременной подачей команд в схему электропривода для необходимых блокировок;

учет количества перерабатываемого вещества с помощью конвейерных весов, установленных за дробилками крупного дробления, после промежуточных складов и перед бункерами корпуса обогащения;

контроль наличия руды на питателях и конвейерах с помощью электродных или других датчиков, необходимый для информации оператора о прохождении материала через течи;

обнаружение и удаление металлических предметов из потока руды с помощью металлоискателей;

контроль размеров продуктов дробления.

Регулирование дробилки заключается в стабилизации количества материала в ее рабочем пространстве. Если уровень материала превышает заданное значение, подводимый поток уменьшается, если запас меньше заданного значения, поток увеличивается. Схемы автоматизации цикла дробления обеспечивают также пуск и остановку дробилки и вспомогательных механизмов с соблюдением определенной технологической последовательности.

Рассмотрим систему управления на примере роторной дробилки. Электропривод роторной дробилки выполнен на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и частотным преобразователем. В систему управления входят датчики, которые контролируют массу на входе дробилки, наличие металлических предметов в общей массе вещества, массу дробимого материала на выходе дробилки. Кроме этого, применяются датчики уровня, вибраций корпуса установки, температуры опор и переполнения входного бункера.

Общее управление роторной дробилкой осуществляется программируемым контроллером. Задачами контроллера являются: управление работой роторной дробилки, реализация режима технического диагностирования, отображение процесса дробления. В состав контроллера входят: NT-терминал, ручной пульт управления, четыре аналоговых модуля ввода и вывода на восемь входов и восемь выходов, два температурных модуля (для контроля температуры подшипников). Количество модулей обусловлено количеством датчиков, контролируемых различные технологические и технические параметры. В состав контроллера также входит флэш-

карта, на которой записаны основные предустановочные параметры для процесса дробления. Вся информация о процессе дробления отображается на NT-терминале.

При дроблении реализуются алгоритмы оптимизации, осуществляющие две задачи:

для заданной производительности дробильного агрегата обеспечить минимальное электропотребление при произвольном временном варьировании массы, размера и физических свойств вещества; обеспечить максимальную производительность дробильного агрегата с ограничением мощности электропотребления в системах автономного питания при произвольном временном варьировании массы, размеров и физических свойств вещества.

Для решения сформулированных задач оптимизации необходимо иметь математические модели дробильных агрегатов, отражающие физические и энергетические составляющие процесса дробления вещества.

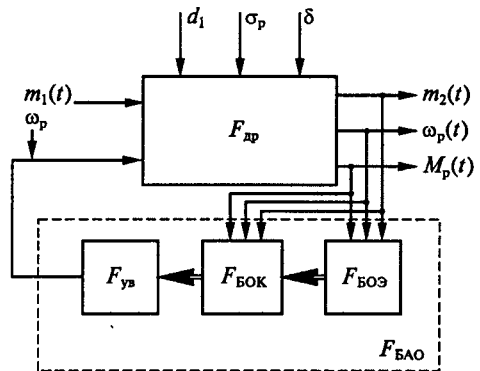
Независимо от типов дробильных агрегатов их математическое описание имеет общую основу, которая в наибольшей степени выражена для роторных дробилок.

Для оптимизации процесса дробления необходимо иметь информацию о следующих переменных:  $m_1(t)$ ,  $m_2(t)$  — соответственно текущих значениях масс вещества на входе и на выходе дробилки;  $\omega_p(t)$ ,  $M_p(t)$ ,  $i_p(t)$  — соответственно частоте вращения, моменте и токе ротора;  $P_c(t)$ ,  $i_c(t)$  — мощности и токе электросети соответственно. Размеры и физические свойства вещества непосредственно не измеряют, а оценивают косвенно в процессе управления. К ним относятся переменные  $d_1(t)$ ,  $\sigma_p(t)$ ,  $\delta$ , характеризующие соответственно условный диаметр вещества на входе дробилки (при его представлении в шарообразном виде), предел прочности материала при растяжении, плотность дробимого вещества. Указанные переменные связаны между собой векторным оператором  $F_{др}$ , представляющим собой математическое описание дробилки как объекта оптимизации. Система автоматической оптимизации (рис. 4.20), использующая поисковые методы, решает сформулированные ранее задачи оптимизации с помощью блока автоматической оптимизации с векторным оператором  $F_{БАО}$ .

Блок оптимизации, реализуемый программным способом на промышленном компьютере, состоит из трех модулей: оценки составляющих баланса энергии агрегата (оператор  $F_{БЭЭ}$ ), выработки оценки функционала качества (оператор  $F_{БОК}$ ), выработки управляющего воздействия (оператор  $F_{ув}$ ) для реализации режима оптимизации.

В качестве алгоритма автоматической оптимизации используется метод прямого спуска (Хука — Дживса), имеющий по отношению к другим алгоритмам (деформируемого симплекса, градиентного спуска, наискорейшего спуска) преимущества в скорости и точности оптимизации.

Рис. 4.20



В шаровых мельницах измельчение материала осуществляется падающими шарами, имеющими размер  $d \leq D/20$ , где  $D$  — диаметр барабана мельницы, м.

Мощность (кВт) электродвигателя мельницы

$$P = Cm\sqrt{D/\eta}, \quad (4.25)$$

где  $C$  — коэффициент, зависящий от заполнения барабана мельницы;  $m$  — общая масса загрузки барабана мельницы ( $m = 1,1m_T$  для металлических мелющих тел;  $m = 2m_T$  для керамических мелющих тел;  $m_T$  — масса мелющих тел, кг);  $\eta$  — КПД электропривода.

Для привода крупных шаровых мельниц наиболее широко распространены безредукторные электроприводы с синхронными двигателями частотой вращения  $10 \dots 12 \text{ мин}^{-1}$  и мощностью до 6 МВт.

#### 4.3.4. Управление смесителями, центрифугами и сепараторами

**Смесители.** Обычно электропривод смесителей выполняют нерегулируемым с асинхронным короткозамкнутым двигателем. При необходимости регулирования частоты вращения используют механические вариаторы. В последнее время для смесителей применяют безредукторный электропривод с частотным управлением. Например, электроприводы резиносмесителей выполняют регулируемыми и нерегулируемыми. Поскольку максимальные мощности электродвигателей современных резиносмесителей достигают 2500 кВт, то нерегулируемые электроприводы выполняют с синхронными электродвигателями, регулируемые — с асинхронными.

Рассмотрим работу системы управления (СУ) смесителем на примере резервуара для смешивания красок. Функциональная схема СУ показана на рис. 4.21. Подача красок по питающим трубам в резервуар производится сверху при помощи насосов. Через отдельную трубу в нижней части резервуара вытекает готовая смесь кра-

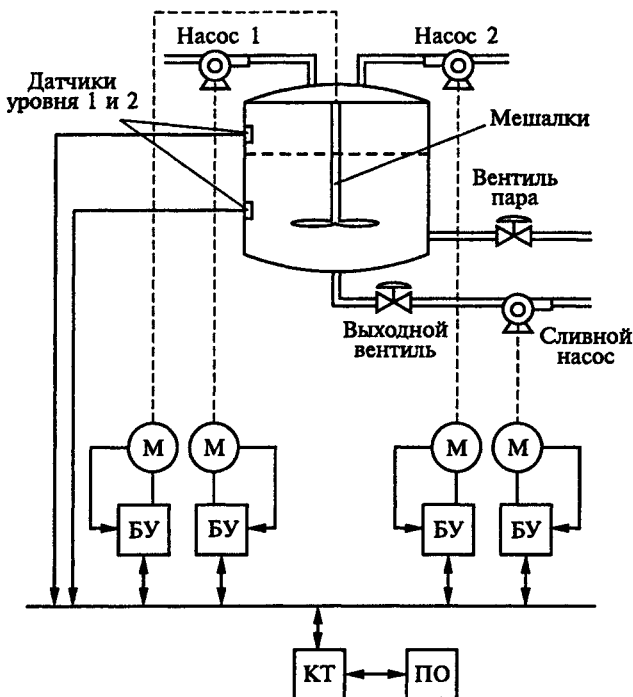


Рис. 4.21

сок. Система управляет процессом наполнения, контролирует уровень наполнения и управляет циклами смешивания и нагревания.

Алгоритм процесса смешивания состоит из следующих этапов: наполнить резервуар первой краской; наполнить резервуар второй краской; закончить подачу, если замкнут переключатель «Резервуар полный»; оставить насос включенным, если пусковой переключатель открыт; начать цикл нагревания и смешивания; включить двигатель смесителя и вентиль пара; выпустить готовую краску из резервуара; подсчитать циклы включения смесителя.

На рис. 4.22 представлена управляющая программа в виде релейных диаграмм (LD) для контроллера S7-200, который реализует описанный выше алгоритм процесса смешивания.

**Центрифуги.** Центрифуги непрерывного действия обычно выполняют с нерегулируемым электроприводом. Для центрифуг с повышенными скоростями требуются преобразователи частоты для питания электродвигателей напряжением повышенной частоты.

Для центрифуг периодического действия характерно, что их момент инерции может в 50...100 раз превышать момент инерции двигателя, причем в процессе работы центрифуги значение его изменяется в широких пределах в связи с выделением жидкой фазы из обрабатываемого продукта.

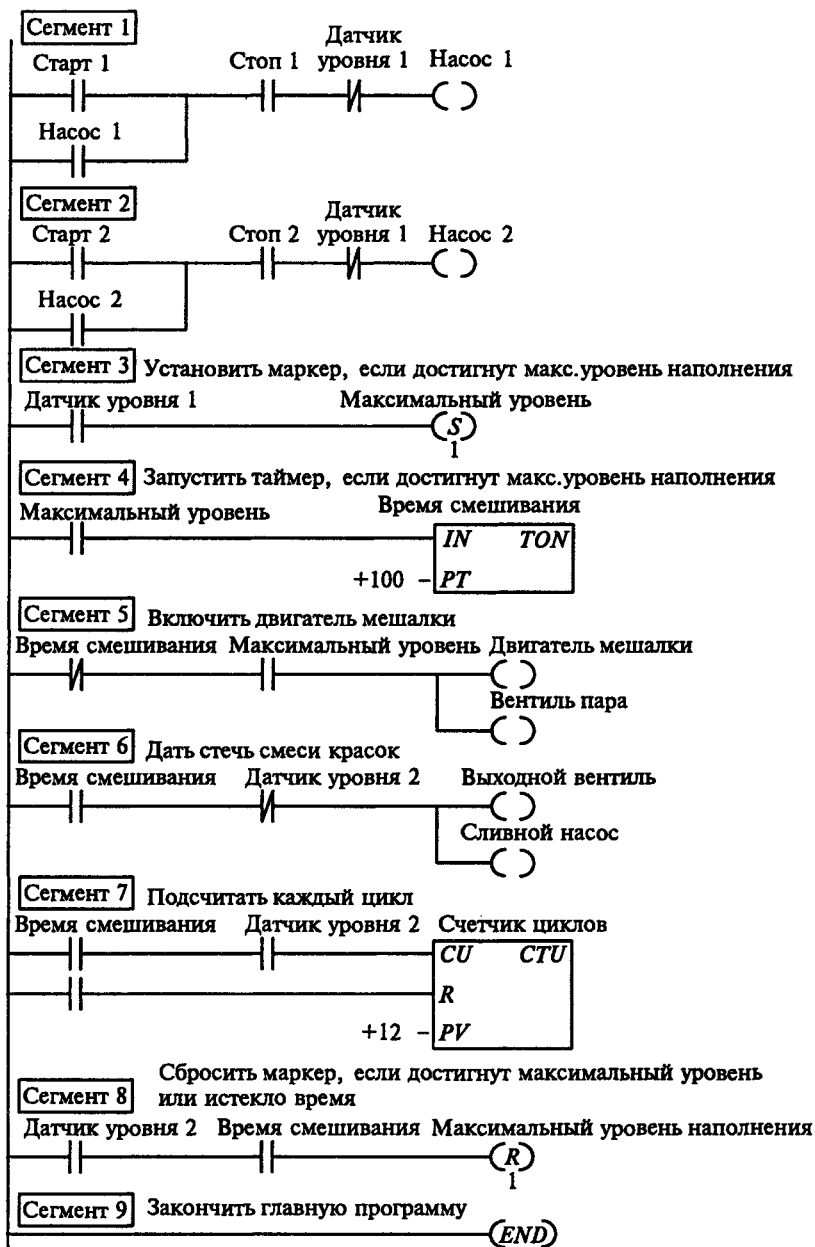


Рис. 4.22

Основными требованиями к электроприводу центрифуг являются обеспечение оптимальных динамических режимов при постоянных ускорении и замедлении центрифуги и стабилизация ее

частоты вращения при загрузке, выгрузке и фуговке. Часто по технологическим причинам требуется изменять значения максимальной скорости и скоростей загрузки и выгрузки. Мощности электродвигателей современных быстродействующих центрифуг периодического действия достигают 160 кВт.

Статический момент сопротивления центрифуги складывается из момента  $M_b$  (Н·м), затрачиваемого на механическое трение ротора о воздух, и момента  $M_r$  (Н·м), затрачиваемого на механическое трение вала в подшипниках:

$$M_b = 23,5 \cdot 10^{-6} H D n^2; \quad (4.26)$$

$$M_r = 4,9 f m_{ц} d, \quad (4.27)$$

где  $H$  — высота ротора, м;  $D$  — диаметр ротора, м;  $n$  — частота вращения ротора,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $f = 0,03 \dots 0,09$  — коэффициент трения, зависящий от типа подшипника;  $m_{ц}$  — масса ротора центрифуги с продуктом, кг;  $d$  — диаметр вала, м.

Для центрифуг непрерывного действия необходимо учитывать условия пуска при выборе мощности электродвигателя.

Для центрифуг периодического действия при расчете мощности электродвигателя необходимо учитывать динамические моменты, возникающие при переходных процессах и являющиеся при больших моментах инерции центрифуг весьма значительными.

Для центрифуг периодического действия широко применяют многоскоростные АД. Это позволяет упростить систему регулируемого электропривода, но имеет существенные недостатки, так как не дает плавно изменять установившиеся скорости в зависимости от обрабатываемого продукта и не обеспечивает постоянного ускорения во время разгона.

**Сепараторы.** Обычно электропривод сепараторов выполняют нерегулируемым с асинхронным короткозамкнутым двигателем. При необходимости регулирования частоты вращения в последнее время применяется электропривод переменного тока с частотным управлением.

## 4.4. Состав и свойства систем управления металло-, дерево- и камнеобрабатывающими станками

### 4.4.1. Характеристика станков и электроприводов

**Станки.** Металло-, дерево- и камнеобрабатывающие станки выполняют схожие операции по обработке материалов, отличающиеся инструментальными средствами обработки и свойствами обрабатываемых материалов.

Например, деревообрабатывающие станки выполняют продольный и поперечный раскрой досок на заготовки, формирование необходимого поперечного сечения, обработку концов деталей, выработку гнезд и отверстий, вытачивание деталей, являющихся телами вращения; обеспечивают получение деталей сложной формы с пространственно кривыми поверхностями, уменьшение шероховатости поверхности деталей в результате шлифования абразивными инструментами и т. д.

Камнеобрабатывающие станки обеспечивают получение изделий из камня заданных размеров, шлифование поверхности, выработку гнезд и отверстий и т. п.

Металлообрабатывающие станки наиболее распространены и сложны. Они выполняют все основные функции других станков. В связи с этим рассмотрим системы управления именно этими станками.

Многообразие металлообрабатывающих станков в основном обусловлено конструктивно-технологическими особенностями обрабатываемых деталей, все разнообразие которых условно можно разделить на три типа: валы, диски и корпусные детали. Для обработки тел вращения (валы и диски) используют токарные центровые и патронно-центровые станки, а для корпусных деталей — станки расточно-фрезерно-сверлильной группы. Для изготовления специальных деталей, таких как, например, зубчатые колеса, используют специализированные зубообрабатывающие, зубошлифовальные и другие станки. Электрофизические станки применяют для обработки высокотвердых материалов. Для обработки листовых материалов используют машины газовой, плазменной и лазерной резки.

Многооперационный сверлильно-фрезерно-расточной станок с горизонтальным шпинделем (рис. 4.23) предназначен для высокопроизводительной обработки корпусных деталей, устанавливаемых на поворотном столе 2. Обработку деталей производят инструментом, закрепленным в шпинделе 3, подачей стойки 7, шпиндельной бабки 6 и стола в направлении осей координатной системы  $OXYZ$ .

Стол и подвижная стойка находятся на станине 1 станка. Стол предназначен для установки и крепления обрабатываемых деталей. Он состоит из саней и встроенного поворотного делительного стола. Сани монтируются на станине стола, которая закрепляется на общей станине станка. Сани с поворотным столом могут перемещаться по направляющим станины стола в направлении оси  $X$ . Поворот на угол  $\alpha$  осуществляется вокруг оси  $Y$ . Стойка перемещается по направляющим станины в направлении оси  $Z$ . Шпиндельная бабка расположена внутри стойки и по ее направляющим перемещается в направлении оси  $Y$ . В ней в отдельном корпусе монтируется шпиндель.

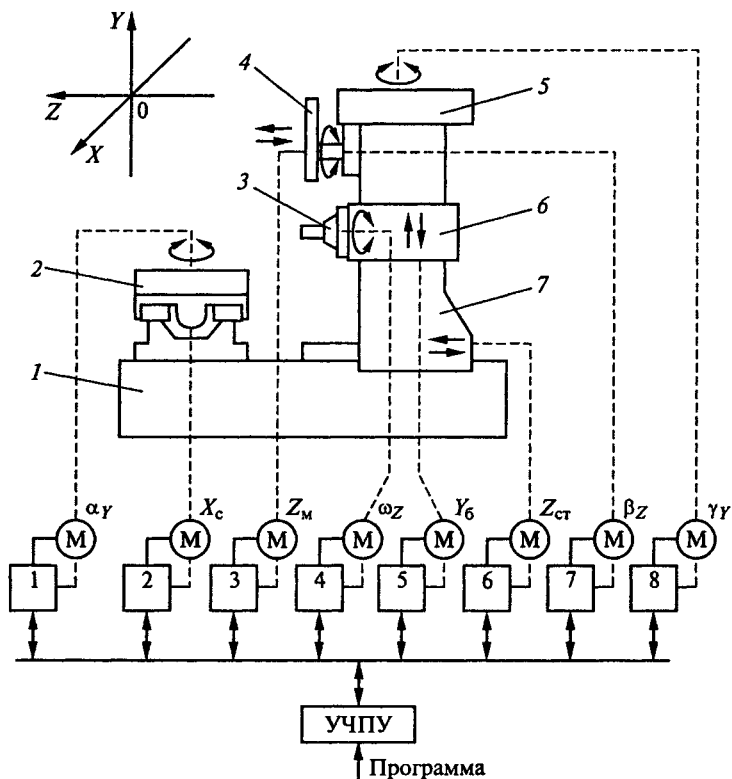


Рис. 4.23

Устройство для автоматической смены инструмента состоит из манипулятора 4 и инструментального магазина 5 и расположено вне рабочей зоны станка. Инструментальный магазин служит для хранения комплекта инструмента, используемого для обработки детали по программе и перемещения на угол  $\gamma_Y$  требуемого гнезда с инструментом в зону смены инструмента. Магазин выполняется в виде поворотного барабана с фиксированными гнездами и монтируется на верхнем торце стойки. Манипулятор обеспечивает автоматический обмен инструментами между магазином и шпинделем станка. Он закрепляется на переднем торце стойки и состоит из корпуса, двухзахватной поворотной руки и механизма ее выдвижения в направлении оси  $Z$  и поворота на угол  $\beta_Z$ .

Широкий диапазон частот вращения шпинделя  $\omega_Z$  и скоростей подачи стола  $X_c$ , стойки  $Z_{ст}$  и бабки  $Y_6$  позволяет обрабатывать конструкционные материалы от легких сплавов до высокопрочных сталей.



В станке применяются короткие жесткие кинематические связи с минимальным количеством зубчатых колес. В приводах подач (линейные перемещения стола стойки и бабки) используются высокомоментные электродвигатели и кинематические передачи типа «винт — гайка качения». В приводах поворота используются червячные передачи, в приводе шпиндельной бабки — тормозная муфта, исключая падение бабки при снятии напряжения сети.

Станок оснащается автоматизированными системами электроприводов 1...8 и трехкоординатным комбинированным устройством числового программного управления УЧПУ на базе микроЭВМ, позволяющими осуществить контурное управление и позиционирование рабочего органа станка, стабилизацию частоты вращения инструмента, управление инструментальным магазином и устройством автоматической смены инструмента.

Все многообразие металлообрабатывающего оборудования можно охарактеризовать несколькими понятиями, общими для всех видов станков.

Число управляемых (осей) характеризует возможности станка по формированию траектории движения его исполнительных органов (ИО) в пространстве. Координаты ИО станка могут изменяться одновременно, формируя при этом траекторию движения, или поочередно. Число одновременно управляемых осей характеризует возможности станка обрабатывать поверхности заготовки. Эти оси называют осями геометрии. Остальные оси станка обеспечивают доступ инструмента к обрабатываемым поверхностям и выполнение вспомогательных операций, например, автоматическую смену инструмента, транспортировку заготовок в рабочую зону станка и т.д.

При обработке в плоскости достаточно перемещать исполнительный орган одновременно только по двум осям, что достаточно для управления токарным станком. Для обработки корпусных деталей требуется минимум три одновременно управляемые оси, а для сложных изделий, требующих ориентации инструмента относительно поверхности детали, осей геометрии может быть пять и более. Это характерно для многооперационных станков типа обрабатывающего центра или специализированных, выполняющих обработку изделий со сложной формой поверхности.

Главное движение — движение, обеспечивающее перемещение рабочей точки, линии или поверхности инструмента относительно заготовки и производящее при этом обработку. В токарных станках таким движением является вращение заготовки, зажатой в патроне шпинделя; во фрезерных — вращение инструмента (фрезы), установленного в шпинделе; в шлифовальных — вращение шлифовального круга. Как правило, главное движение имеет наибольшую установленную мощность привода, так как именно главный привод станка обеспечивает необходимое усилие резания.

Движения подач — движения по осям геометрии станка, обеспечивающее перемещение ИО станка по определенной плоской или пространственной траектории (контур) с заданной скоростью. Диапазон изменения скоростей приводов подач очень велик и определяется технологическими режимами обработки. Однако для соблюдения заданных технологических режимов обработки задается контурная скорость движения точки инструмента. Требуемые при этом скорости подач по осям станка вычисляются системой управления в процессе выполнения задания.

Главное движение и движения подач называются основными движениями. Кроме основных движений, в станках имеются вспомогательные движения, непосредственно не участвующие в процессе резания, но способствующие ему или выполняющие вспомогательные операции, обеспечивающие работу станка. Они осуществляют подачу охлаждающей смазочной жидкости, зажим и отжим заготовки и механизмов станков, автоматический подвод и отвод инструментов, автоматический контроль размеров в процессе обработки и т. д.

Для обработки заготовок на станке, как правило, используется не один, а несколько инструментов. Для сложных корпусных деталей их число иногда доходит до нескольких сотен. Наиболее простыми системами смены инструмента являются револьверные головки, несущие небольшое число инструментов (шесть—десять). Смена инструмента осуществляется при этом поворотом револьверной головки, ее фиксацией и зажатием.

Более сложные системы снабжены магазинами инструментов поворотного или цепного типов и автооператорами для замены инструмента. Магазин инструментов располагается вне рабочей зоны станка, количество хранящихся в магазине инструментов не ограничено.

Современные станки оснащены станочным транспортом, обеспечивающим доставку спутников с заготовками и деталями при загрузке и выгрузке рабочего стола станка.

Основными технологическими процессами металлообработки являются: точение, расточка, строгание, сверление, фрезерование и шлифование.

*Точение* (рис. 4.24, а) осуществляется на токарных станках в результате вращения обрабатываемого изделия 1 (главное движение) и перемещения резца 2 (движения подач) по осям  $x-s_2$  и  $y-s_1$ .

Окружная скорость изделия в точке соприкосновения резца с обрабатываемой деталью называется скоростью резания (м/мин):

$$v = 9,55\pi d_n \omega_n = 30d_n \omega_n, \quad (4.28)$$

где  $d_n$  — диаметр обработки, м;  $\omega_n$  — угловая скорость изделия, рад/с.

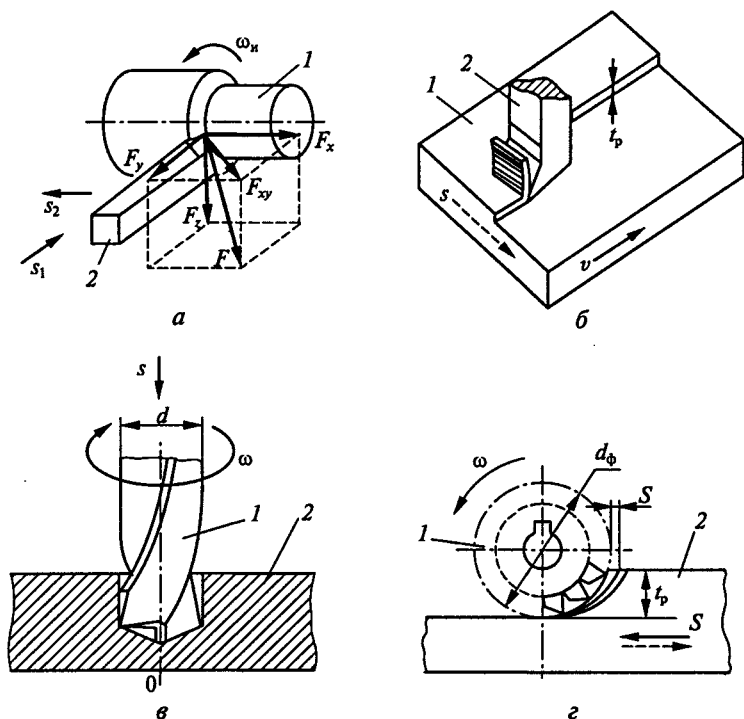


Рис. 4.24

Подача определяется перемещением резца, приходящимся на один оборот изделия. Глубина резания представляет собой разность радиусов обрабатываемой и обработанной поверхностей. Быстрое перемещение суппорта, зажим и отжатие обрабатываемого изделия, перемещение люнета, задней бабки и другие движения относятся к вспомогательным.

В процессе обработки происходит износ инструмента. При достижении оптимального износа инструмент перетачивают. Время работы инструмента между двумя переточками определяет его стойкость  $T$ .

Параметры обработки связаны между собой эмпирической формулой

$$v = \frac{C_v}{T^m t_p^{x_v} s^{y_v}}, \quad (4.29)$$

где  $C_v$  — коэффициент, характеризующий вид и условия обработки, а также материал изделия и резца;  $T$  — стойкость, мин;  $t_p$  — глубина резания, мм;  $s$  — подача, мм/об;  $x_v, y_v, m$  — показатели степени, зависящие от свойств обрабатываемого металла, материала резца и вида обработки.

При снятии стружки резцом возникает усилие  $F$ , приложенное к режущей кромке инструмента, которое может быть разложено (см. рис. 4.24, а) на составляющие:

$$F = \sqrt{F_z^2 + F_y^2 + F_x^2}, \quad (4.30)$$

где  $F_z$  — главная касательная сила, действующая в направлении траектории главного движения, преодолеваемая шпинделем станка и называемая усилием резания;  $F_y$  — радиальная сила, действующая нормально к обработанной поверхности и создающая давление на суппорт;  $F_x$  — осевая сила, действующая в направлении подачи.

Расчет усилия резания производится по эмпирической формуле

$$F_z = C_F t_p^{x_F} s^{y_F} v^n, \quad (4.31)$$

где  $C_F$  — коэффициент, характеризующий материал детали, резца и вид токарной обработки;  $x_F$ ,  $y_F$ ,  $n$  — показатели степени.

Мощность резания (кВт)

$$P_z = \frac{F_z v}{60} 10^{-3}. \quad (4.32)$$

Коэффициенты и показатели степени в (4.29) и (4.31) принимаются по справочникам режимов резания.

По аналогичным формулам рассчитываются усилия  $F_x$  и  $F_y$ . Приблизительно можно принять  $F_x \approx 0,4 F_z$  и  $F_y \approx 0,3 F_z$ .

Усилие  $F_{п1}$ , действующее на механизм подачи, кроме собственного усилия подачи  $F_x$ , имеет также составляющие, возникающие в направляющих из-за сил трения от действия усилий  $F_z$  и  $F_y$ :

$$F_{п1} = F_x + \mu_1 (F_z + F_y), \quad (4.33)$$

где  $\mu_1$  — коэффициент трения в направляющих.

Мощность подачи (кВт)

$$P_{п1} = \frac{F_{п1} v_{п1}}{60} 10^{-3} = \frac{F_{п1} s_1 \omega}{2\pi} 10^{-6}. \quad (4.34)$$

Аналогично рассчитываются усилие  $F_{п2}$  и мощность  $P_{п2}$ . Поскольку скорость подачи во много раз меньше скорости резания, мощность подачи намного меньше мощности резания и составляет относительно последней 0,1... 1%.

*Расточка* применяется для черновой, чистовой и алмазной обработок отверстий на токарных и расточных станках. При расточке резцы, оснащенные пластинками из быстрорежущей стали, твердых сплавов или ограненного технического алмаза, закрепляют в оправках. Скорость, усилие и мощность резания при черновой и чистовой расточках определяют по формулам (4.29), (4.31) и (4.32), т. е. по тем же, что и для точения.

**Строгание** (рис. 4.24, б) можно рассматривать как точение участка детали с бесконечно большим диаметром. При этом деталь 1 перемещается возвратно-поступательно относительно резца 2, снятие стружки происходит в течение рабочего хода, а обратный ход совершается вхолостую. Скорость, с которой деталь перемещается относительно резца при рабочем ходе, называется *скоростью резания  $v$*  (м/мин). Продольное перемещение стола является главным движением.

Перемещение резца за один двойной ход стола перпендикулярно главному движению и называется *движением подачи  $S$*  (мм/мин). Величина  $t_p$ , на которую углубляется резец в изделие при одном проходе, называется *глубиной резания*. Перемещение траверсы и суппортов, подъем резца при обратном ходе, установочные медленные перемещения стола относятся к вспомогательным движениям.

Скорость, усилие и мощность резания при строгании определяют, как и для точения, по формулам (4.29), (4.31) и (4.32).

**Сверление** (рис. 4.24, в) осуществляется в результате вращательного (главного) движения инструмента — сверла 1 (иногда детали) и его продольного перемещения в детали 2 (движения подачи). Продольное и поперечное перемещения стола, перемещение шпиндельной бабки, зажим колонны являются вспомогательными движениями.

**Фрезерование** (рис. 4.24, г) производится вращающейся фрезой 1, имеющей несколько режущих лезвий (зубьев), каждое из которых в результате поступательного перемещения фрезы относительно детали 2 снимает стружку в пределах определенного угла поворота фрезы, а затем вращается вхолостую.

Главным движением при фрезеровании является вращение фрезы; перемещение детали относительно инструмента представляет собой движение подачи. Быстрое перемещение стола, на котором укреплен деталь, и ускоренное перемещение шпиндельной бабки при наладке относятся к вспомогательным движениям.

**Шлифование** производится, как правило, абразивными кругами, при этом каждое абразивное зерно в зоне обработки работает как резец, снимая стружку с детали в пределах определенного угла поворота. Главное движение при шлифовании — вращение шлифовального круга; поступательное перемещение круга относительно детали представляет собой движение подачи.

**Приводы.** Основные и вспомогательные движения на станках выполняются от электро- и гидроприводов. При использовании в приводе электродвигательного устройства он является электроприводом. Электроприводы наиболее распространены среди приводов основных движений.

*Электропривод главного движения* имеет электродвигатель и коробку скоростей или редуктор в качестве устройства, передающе-

го движения исполнительному органу станка. Возможно отсутствие передающего устройства, когда двигатель соединяется непосредственно с исполнительным органом.

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

Использование электропривода переменного тока со ступенчатым регулированием скорости резания не может обеспечить полную производительность. Применение коробки скоростей со сложной кинематикой снижает точность работы станка и увеличивает его стоимость. Поэтому привод главного движения выполняется в виде регулируемого электропривода с простым редуктором или двухступенчатой коробкой скоростей и дистанционным переключением.

Для электроприводов главного движения шлифовальных станков и заточных станков, где требуется высокая частота вращения ( $6000 \text{ мин}^{-1}$  и более), применяются высокооборотные электроприводы переменного тока. Для этих станков используют специальные асинхронные двигатели с частотным управлением мощностью до 100 кВт, асинхронные высокоскоростные двигатели мощностью до 4 кВт и др.

Мощность, развиваемая при резании, определяется скоростью резания и усилием резания. Усилие резания  $F_z$  определяется подачей и глубиной резания при неизменных материалах и форме резца и заготовки.

Для приводов главного движения наиболее рациональным является способ регулирования скорости с постоянной мощностью, так как большим скоростям резания соответствуют меньшие усилия резания, а меньшим скоростям — большие усилия.

Диапазон регулирования частоты вращения определяется пределами скоростей резания и диаметров обрабатываемых изделий. Это обусловлено тем, что на универсальных станках могут обрабатываться детали из различных материалов и разных размеров, в частности разных диаметров. Для обработки изделий одинакового диаметра из различных материалов необходимо обеспечить определенный диапазон регулирования скорости резания. С другой стороны, рациональная обработка изделий из одного и того же материала, но разных диаметров, требует постоянной скорости резания.

Соблюдение условия  $v = \text{const}$  достигается регулированием скорости привода с диапазоном регулирования, определяемым ди-

апазоном диаметров. Так, для токарных станков с диаметром устанавливаемых изделий 320... 1000 мм требуемый диапазон регулирования частот вращения примерно 50:1, а для токарно-карусельных станков с диаметром обрабатываемого изделия от 1250 до 4000 мм он доходит до 80:1.

В станках с числовым программным управлением (ЧПУ) функции, выполняемые электроприводом главного движения, значительно усложнены. Кроме стабилизации частоты вращения, при силовых режимах резания требуются обеспечение режимов позиционирования шпинделя при автоматической смене инструмента и производстве легких долбежных и строгальных работ, а также возможность нарезания резьбы метчиками и резцами. Это неизбежно ведет к увеличению требуемого диапазона регулирования частоты вращения. Так, при требуемой точности позиционирования шпинделя 0,1 % и максимальной частоте вращения двигателя 3000... 5000 мин<sup>-1</sup> суммарный диапазон изменения частоты вращения должен быть не менее 10 000:1.

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

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

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

$$\Delta_p = \frac{2(n_{\text{пр}} - n_{\text{л}})}{n_{\text{пр}} + n_{\text{л}}} 100 \%, \quad (4.35)$$

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

Отличительной особенностью главного привода для высокоавтоматизированных станков с ЧПУ является необходимость применения реверсивного привода даже в тех случаях, когда по тех-

нологии обработки реверс не требуется. Требование обеспечения эффективного торможения и подтормаживания при снижении частоты вращения и режимов поддержания постоянной скорости резания приводит к необходимости применения реверсивного привода с целью получения нужного качества переходных процессов.

В *электроприводах подач* наибольшее распространение получили передачи «винт — гайка» или «шестерня — рейка». Применяются высокомоментные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов, рассчитанные на установку непосредственно на ходовой винт, что существенно сокращает механическую часть привода, снижает его момент инерции и повышает КПД.

Для повышения производительности станков перемещение исполнительных органов в зону обработки осуществляется на быстрых ходах теми же электродвигателями подачи.

Расширение технологических возможностей станков, а также использование твердосплавного и быстрорежущего инструмента обеспечили возможность проведения на одном станке различных технологических операций: фрезерования, сверления и растачивания; точения, сверления и растачивания и т.д. Это привело к усложнению электроприводов подач.

Увеличение скорости быстрых перемещений до 10 м/мин, снижение скорости установочных перемещений привело к значительному увеличению диапазона регулирования. Максимальная рабочая подача на современных многооперационных станках составляет 10...30 % скорости быстрых перемещений.

Полный диапазон регулирования скорости в станках фрезерной, расточной и токарной групп составляет 100...10 000, а в карусельных расширяется до 30 000...40 000. Реальный диапазон регулирования скорости привода подачи каждой оси в станках с ЧПУ при контурном фрезеровании бесконечен, так как минимальная подача по каждой оси в двух точках обрабатываемой окружности равна 0.

Из-за неудовлетворительных динамических свойств регулируемого электропривода, особенно при возмущении по нагрузке, появляется шероховатость поверхности, поэтому важно обеспечить высокое быстродействие привода при подключении и отключении нагрузки, а также при реверсе двигателя под нагрузкой на самых малых частотах вращения (контурное фрезерование в режиме круговой интерполяции). Для электроприводов подач изменение частоты вращения при подключении и отключении нагрузки  $0,5M_{\text{ном}}$  относительно заданного уровня не должно превышать 100 % при  $n = 0,001n_{\text{ном}}$  и времени восстановления 100 мс. Время реверса под нагрузкой  $M_{\text{ном}}$  при  $n = 0,001n_{\text{ном}}$  не более 0,5 с.

К электроприводам подач предъявляются следующие основные требования:



минимальные размеры электродвигателя при высоком вращающем моменте;

высокая максимальная скорость;

значительная перегрузочная способность привода в режимах кратковременной и повторно-кратковременной нагрузки;

широкий диапазон регулирования;

высокая стабильность характеристик;

высокое быстродействие при разгоне и торможении, подключении и отключении нагрузки и при реверсе под нагрузкой на самых малых частотах вращения;

высокая равномерность движения при различной нагрузке на всех скоростях вплоть до самых малых;

высокая надежность и ремонтпригодность;

удобство конструктивной установки двигателя на станке и встраивания управляемых преобразователей в шкафы и ниши станков; малые размеры.

Этим требованиям в полной мере удовлетворяют современные сервоприводы с частотным регулированием.

*Электроприводы вспомогательных движений*, как правило, не требуют регулирования скорости и осуществляются от АД с передающими устройствами и без них.

При всем многообразии станков требования, предъявляемые к приводам станков, обусловлены, главным образом, не тем, к какой группе относится станок, а для какого движения предназначен привод (главного, подачи или вспомогательного). Это определяет мощность, способ и диапазон регулирования скорости, необходимую плавность регулирования, требования к жесткости и стабильности характеристик, требования к динамике.

#### **4.4.2. Системы числового программного управления металлообрабатывающими станками**

Внедрение в технологические процессы вычислительной техники позволило экономически эффективно осуществить идею числового программного управления технологическим оборудованием, которая нашла широкое применение в первую очередь в управлении станками.

Числовое программное управление это управление обработкой заготовки на станке или роботом по управляющей программе (УП), заданной в цифровой форме. Станки с устройствами числового программного управления (УЧПУ) превратились сегодня в важнейший вид высокоэффективного металлорежущего оборудования. Этому способствовала не только высокая степень автоматизации обработки, но и возможность быстрой переналадки их на обработку любой детали в пределах технологических возможностей станка.

Управляющая программа включает в себя геометрическую и технологическую информацию. Геометрическая информация содержит данные о траектории движения инструмента и ее параметрах. Большинство траекторий, воспроизводимых УЧПУ, представляют собой прямые и дуги окружностей, поэтому прямая и дуга окружности — это основные элементы траектории, задаваемые в управляющей программе. Более сложные, аналитически не описываемые кривые обычно аппроксимируются отрезками прямых и дугами окружностей.

Технологическая информация в УП включает в себя данные о технологических режимах станка и режущем инструменте, а также функциях дискретно-логического управления вспомогательными системами станка.

Любое устройство ЧПУ имеет четыре основных функции: цифровое управление; обработку УП; связь с оператором; диагностирование УЧПУ, тестирование программного обеспечения и аппаратных средств УЧПУ.

На рис. 4.25 отображено содержание этих функций.

Группа функций цифрового управления определяет преобразование УП в сигналы управления исполнительными механизмами станка. Функция расчета траектории включает в себя: интерпретацию текста УП, коррекцию траектории движения с учетом геометрических параметров реального инструмента, расчет оптимальных режимов разгона и торможения. Функция воспроизведения траектории обеспечивает управление приводами осей геометрии станка и отслеживание правильности воспроизведения траектории. Для реализации заданной траектории необходимо в ре-

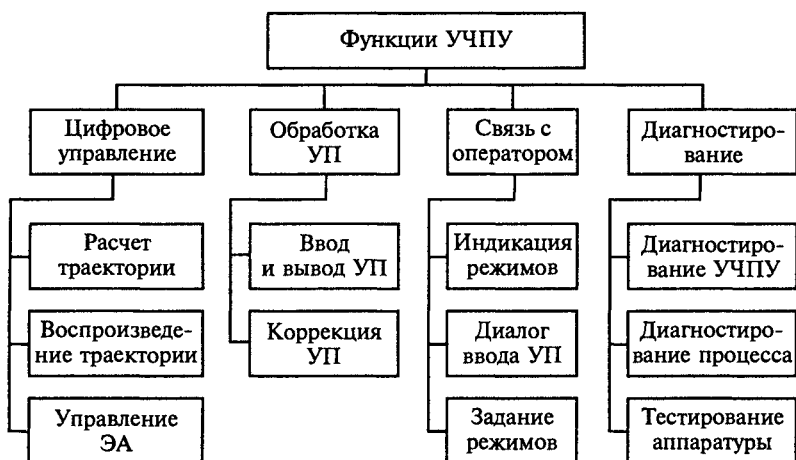


Рис. 4.25

жиме реального времени вычислять координаты промежуточных точек траектории. Этот процесс называют *интерполяцией*. Функция воспроизведения траектории включает в себя реализацию замкнутого контура регулирования положения осей станка. Функция управления электроавтоматикой (ЭА) также осуществляется в режиме реального времени и обеспечивает выполнение технологических команд управляющей программы.

Другую группу функций составляют функции обработки УП, которые зависят от способа ее подготовки.

Различают следующие способы подготовки:

аналитический, предполагающий введение программы на языке технолога. Этот способ наиболее распространен при программировании станков с ЧПУ;

непосредственное обучение, при котором координаты точек по всем осям заносятся в память после вывода всех исполнительных механизмов в заданную точку. Этот способ используется, как правило, в промышленных роботах;

полуаналитический, при котором координаты опорных точек записываются в память УЧПУ, а участки кривых между ними аппроксимируются элементарными кривыми. Этот способ используется в контурных УЧПУ роботами (когда траектория задается пространственной кривой).

Современные УЧПУ имеют развитые инструментальные среды для интерактивного создания, коррекции и моделирования выполнения УП.

Следующая группа функций отвечает за взаимодействие оператора с УЧПУ. Традиционно ввод команд оператора в УЧПУ производится при помощи функциональной клавиатуры. Однако функциональные возможности современных УЧПУ значительно расширились, поэтому наряду со стандартной функциональной клавиатурой широко используются так называемые программные клавиши (SoftKey), назначение которых изменяется в зависимости от режима УЧПУ. Текущее назначение программных клавиш отображается на экране панели оператора. На экране также отображаются: текущее состояние и режим работы устройства, сообщения оператору, координаты текущего положения инструмента в различных системах координат, текущие технологические режимы, текст текущей управляющей программы и т.д.

Существует также группа функций диагностирования аппаратных средств, системного программного обеспечения, протекания технологических процессов, а также правильности вводимых УП. Чем точнее указано место неисправности, тем меньше время восстановления работоспособности системы. Для диагностирования в УЧПУ используются различные программно-аппаратные средства (датчики положения, программные счетчики и др.).

В зависимости от выполняемого задания УЧПУ работает в различных режимах. Можно выделить несколько основных режимов работы, которые соответствуют функциям УЧПУ:

режим наладки станка. В этом режиме оператор имеет возможность управлять перемещениями станка вручную при помощи клавиатуры или специальных задающих устройств. Этот режим используется при установке и базировании заготовки на станке;

режим выхода в исходное состояние. Большинство станков оснащены инкрементальными датчиками положения осей. Следовательно после включения УЧПУ абсолютные координаты осей станка неизвестны. Режим выхода в исходное состояние позволяет осуществить поиск ноль-меток измерительных датчиков и определить положение осей станка в его системе координат;

режим ввода и вывода информации по каналам связи. Он используется при подготовке УП и связи с внешними устройствами и модулями УЧПУ;

режим выполнения УП. Этот режим соответствует функции цифрового управления, а также включает в себя контроль состояния оборудования и работы программного обеспечения. При сбоях в работе УЧПУ должно связываться с оператором и сообщать об ошибке через интерфейс оператора. При выполнении этого задания одновременно выполняется несколько задач — интерпретация, интерполяция и др. Дискретно-логическое управление, основанное на логическом анализе поступающей с датчиков информации и соответствующей реакции на события, предусматривает также адаптацию управления к возмущениям, возникающим во время работы.

#### **4.4.3. Управляющие технологические программы**

Изготовление продукции на станках с ЧПУ во многом основывается на проверенных практикой надежных типовых технологических решениях, применяющихся на универсальном оборудовании, обслуживаемом рабочим-станочником. Эти решения закладываются в основу технологических УП для станков с ЧПУ.

Основой для составления УП является информация о заготовке и детали, которая представляется на бумаге в виде чертежа или в САПР в виде геометрической модели. Основной задачей подготовки УП для УЧПУ является построение траектории движения расчетной точки инструмента относительно контура детали. Для расчета геометрических перемещений используются три системы координат.

Система координат станка в соответствии с рекомендациями ISO представляет собой правую прямоугольную декартову систему координат, связанную с конструктивными элементами станка. Оси системы координат станка параллельны посту-

пательным перемещениям осей станка. Обозначение осей координат и направления движения устанавливаются так, чтобы программирование операций обработки не зависело от того, что перемещается — инструмент или заготовка.

Ориентация осей системы координат станка связывается с направлением движения при сверлении на сверлильных, расточных, фрезерных и токарных станках. Направление выхода сверла из заготовки принимается за положительное направление оси  $Z$ . Ось  $X$  перпендикулярна оси  $Z$  и параллельна плоскости установки заготовки. Если такому определению соответствуют две оси, то за ось  $X$  принимают ось с наибольшим перемещением. При известных осях  $X$  и  $Z$  однозначно определяется ось  $Y$ . Начало системы координат станка выбирается произвольно, но обычно совмещается с базовой точкой узла, несущего заготовку.

Система координат инструмента предназначена для задания положения режущих кромок относительно державки. Оси системы координат инструмента параллельны осям системы координат станка и направлены в ту же сторону, а начало располагается в базовой точке инструментального блока. При установке инструмента в станок его базовая точка, как правило, совмещается с базовой точкой узла станка, несущего инструмент. В УП задается траектория движения базовой точки инструмента. Таким образом, УП не зависит от геометрических параметров используемого инструмента, которые вводятся в УЧПУ независимо от УП. При выполнении программы УЧПУ рассчитывает траекторию движения режущей кромки инструмента, используя его параметры. Этот процесс называют *коррекцией на инструмент*.

Система координат детали служит для расчета координат опорных точек траектории инструмента. Опорными называют точки начала, конца, пересечения или касания геометрических элементов, из которых образованы контуры детали и траектории инструмента. Система координат детали используется при подготовке УП. При выполнении УП система координат станка, как правило, совмещается с системой координат детали с учетом базирования заготовки в рабочем пространстве станка.

В качестве системы координат детали принимается правая прямоугольная система. При выборе начала системы координат детали и ориентации ее осей исходят из простоты расчетов опорных точек траектории.

Формат УП определяется рекомендациями ISO и национальными стандартами, например ГОСТ 20999—83, DIN 66025 и т. д. Язык большинства современных УЧПУ в той или иной степени отличается от стандарта.

Управляющая программа записывается в виде последовательности кадров, представляющих собой законченные по смыслу фразы на языке кодирования геометрической, технологической и

вспомогательной информации. Отдельные последовательности кадров для обработки участков заготовки объединяются в главы, каждая из которых начинается с главного кадра. Главный кадр содержит информацию об условиях обработки, с него можно начинать или возобновлять работу станка по УП. Остальные кадры содержат только изменения относительно предыдущих кадров и называются дополнительными.

Кадры состоят из слов, а слова из символов. Первый символ слова всегда является буквой, называемой адресом слова, а остальные символы образуют число со знаком или целочисленный код. Кадр содержит последовательность слов, образующих информацию для одной рабочей операции. В УП используются только заглавные буквы латинского алфавита, цифры, а также некоторые служебные символы.

Программа начинается символом %, за которым следует имя программы. Заканчивается программа символами M02 или M30 (конец программы). Комментарии заключаются в круглые скобки и размещаются после имени программы между кадрами. Каждый кадр программы должен содержать слово с адресом N (номер кадра или признак главного кадра), информационные слова и символ ПС (признак конца кадра).

Словосочетание «Номер кадра» является вспомогательной информацией и служит идентификатором, меткой, кадром. Последовательная нумерация кадров рациональна, но допускаются любые изменения номеров, лимитируется только неповторяемость в пределах одной программы. В новых моделях УЧПУ словосочетание «Номер кадра» необязательно.

Подготовительные функции определяют режим работы УЧПУ. Эти слова задаются адресом G и двузначным (а в новых УЧПУ — трехзначным) десятичным числом. Подготовительные функции разделены на группы. В одном кадре можно задать только одну функцию из каждой группы.

Словосочетание «Размерные перемещения» предназначено для задания геометрической информации. Адресом его является обозначение оси станка, например X, Y, Z. Размерные перемещения означают координаты опорных точек траектории инструмента в системе координат детали (абсолютные размеры, активна функция G90) или размеры в приращениях, которые записываются числами с «плавающей» точкой со знаком. Учитывая, что начальная точка каждого из участков траектории, кроме первого, является одновременно конечной точкой предыдущего участка, в кадрах задается информация только о конечных точках.

Словосочетание «Функция подачи» (адрес F) определяет контурную скорость движения инструмента по траектории. Скорость задается числом с «плавающей» точкой в миллиметрах в минуту,

если активна функция G94, или в миллиметрах на один оборот шпинделя, если активна G95.

Словосочетание «Скорость главного движения» записывается с адресом S и определяет линейную скорость точки приложения инструмента относительно заготовки в метрах в минуту, если активна функция G96 (постоянная скорость резания), или частоту вращения шпинделя в оборотах в минуту, если активна функция G97. Словосочетание «Функция инструмента» используется для указания инструмента и набора геометрических параметров инструмента — корректоров. В слове за адресом T записывается кодовое число с одной или двумя группами цифр. В первом случае слово задает только номер инструмента или его позицию в магазине инструментов, а корректор для этого инструмента определяется другим словом с адресом D. Во втором случае вторая группа цифр определяет номер корректора на длину, положение или радиус инструмента.

Вспомогательные функции определяют команды управления электроавтоматикой станка и задаются словами с адресом M и двузначным десятичным кодовым числом (M00... M99). Часть вспомогательных функций являются стандартными. Например, M3, M4 — включение вращения шпинделя по или против часовой стрелки соответственно; M7, M8 — включение подачи смазочно-охлаждающей жидкости № 1 или № 2 соответственно. Назначение функций, не установленных стандартом, определяется разработчиком конкретного станка.

Пример УП для движения инструмента по контуру, представленному на рис. 4.26:

```
%1
N1 T1 S1000 M3
N2 G90 GO X10 Y10
N3 G1 X30 Y30 F300
N4 G2 G17 X50 Y10 I0 J20
N5 G1 X10 Y10
N6 GO X0 Y0
N7 M30
```

Программа имеет имя 1. В кадре N1 устанавливаются инструмент № 1, частота вращения шпинделя  $1000 \text{ мин}^{-1}$  и направление вращения по часовой стрелке. Движения по траектории в этом кадре еще нет.

В кадре N2 устанавливается режим задания размерных перемещений относительно нуля системы координат детали (функция

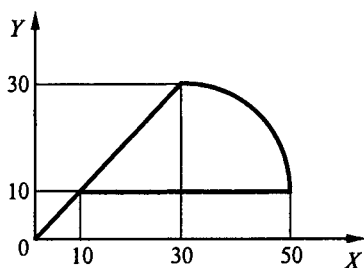


Рис. 4.26

G90). Функция G0 задает режим быстрого позиционирования, т.е. перемещения на максимальной скорости в заданную точку. После выполнения этого кадра инструмент перемещается в точку с координатами 10, 10.

Кадр N3 задает движение по прямой линии (функция G1) в точку с координатами 30, 30 с контурной скоростью 300 мм/мин.

Кадр N4 задает движение по дуге окружности по часовой стрелке (функция G2) в плоскости X0Y (функция G17). Конечная точка дуги имеет координаты 50, 10. Адресами I, J заданы координаты центра дуги относительно начальной точки дуги.

Кадр N5 снова переводит УЧПУ в режим линейной интерполяции и задает движение в точку с координатами 10, 10.

Кадр N6 задает движение в точку с координатами 0, 0 на быстром ходу.

Кадр N7 содержит вспомогательную функцию M30, обозначающую конец программы. После выполнения этого кадра УЧПУ возвращается в исходное состояние.

Описанные команды языка УП задают только элементарные действия по обработке заготовки. Использование только элементарных команд при программировании сложных деталей приводит к увеличению размера УП и возрастанию числа ошибок. Стремление уменьшить длину УП, сократить время ее разработки и число ошибок вызывает необходимость расширить язык программирования и вычислительные возможности УЧПУ. Этому способствует применение подпрограмм и стандартных циклов, являющихся своеобразными макроопределениями для обработки целых областей заготовки.

#### **4.4.4. Системы стабилизации скорости, усилия, мощности и температуры резания, а также упругих деформаций, возникающих в зоне резания**

**Системы стабилизации скорости резания.** Рассмотрим систему стабилизации скорости резания  $v_p$  на примере процесса точения (рис. 4.27). В шпинделе 1, вращающемся с частотой  $\omega_{ш}$ , установлена деталь 2, профиль которой изменяется перемещением резца 4, закрепленного в суппорте 3. С помощью заднего центра 5 обеспечивается жесткость установки детали большого размера. Привод шпинделя с электродвигателем M1 является приводом главного движения. Приводы с электродвигателями M2 и M3 являются приводами поперечной  $S_1$  и продольной  $S_2$  подач суппорта с резцом.

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



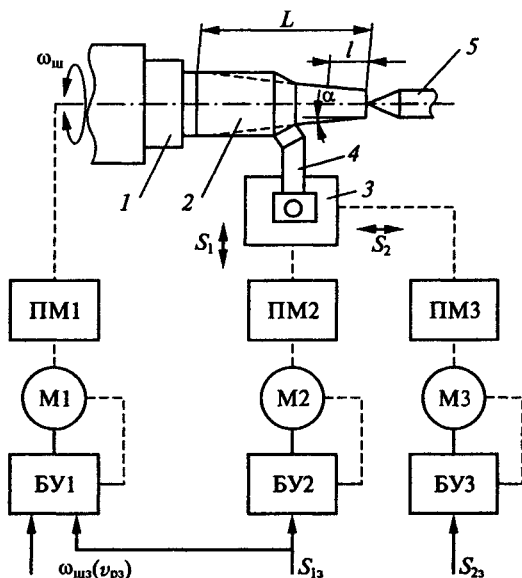


Рис. 4.27

расчетное значение скорости  $v_p$  при большем радиусе  $R_2$  имеем  $\omega_{ш} = v_p/R_2 = \text{const}$ .

Тогда время обработки детали

$$t_{об1} = 2\pi LR_2/v_p S_2, \quad (4.36)$$

где  $S_2$  — подача резца вдоль образующей.

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

$$t_{об2} = \int_0^L \frac{2\pi r}{v_p S_2} dl, \quad (4.37)$$

где  $r$  — текущий радиус обработки.

При  $l = L$  радиус  $r$  равен большему значению:  $r = R_2$ . Представив текущий радиус в виде  $r = R_1 + l \sin \alpha$ , где  $\alpha$  — угол наклона образующей, можно записать:

$$t_{об2} = \frac{\pi L}{v_p S_2} (R_1 + R_2). \quad (4.38)$$

Относительное сокращение времени обработки благодаря стабилизации скорости  $v_p$

$$\frac{t_{об1} - t_{об2}}{t_{об1}} = 0,5 \frac{D - 1}{D}, \quad (4.39)$$

где  $D = \omega_{ш \max}/\omega_{ш \min}$ .

При больших значениях  $D$  можно получить существенную экономию времени обработки детали.

Техническая реализация режима стабилизации скорости  $v_p$  заключается в формировании дополнительного воздействия на блок управления БУ1 (осуществляющего стабилизацию частоты  $\omega_{ш}$ ), пропорционального поперечной подаче  $S_1$  суппорта. Так как  $v_p = \omega_{ш}r = \text{const}$ , то частота  $\omega_{ш}$  обратно пропорциональна текущему радиусу  $r$ . А так как  $r \equiv 1/S_1$  то  $\omega_{ш} \equiv S_1$ .

Аналогично происходит стабилизация скорости шлифования (резания) в шлифовальных станках при изменении диаметра шлифовального круга  $d_k$  в процессе изменения частоты вращения шпинделя  $\omega_{ш}$ . Функциональная схема системы управления главным приводом с электродвигателем М4 вращения шпинделя с шлифовальным кругом 3, приводами подачи  $S_1, S_2$  двухкоординатного стола 1,  $S_3$  бабки 4 показана на рис. 4.28.

При плоском шлифовании детали 2 уменьшение диаметра  $d_k$  не приводит к уменьшению глубины шлифования, так как она поддерживается приводом подачи  $S_3$ . Уменьшение  $d_k$  приводит к уменьшению скорости резания, если  $\omega_{ш} = \text{const}$ . Для обеспечения условия  $v_p = \text{const}$  в блок управления БУ4 вводится информация о текущем значении  $d_k/2$  и в соответствии с этим обеспечивается постоянство скорости  $v_p = \omega_{ш}d_k/2 = \text{const}$  в процессе увеличения частоты  $\omega_{ш}$ .

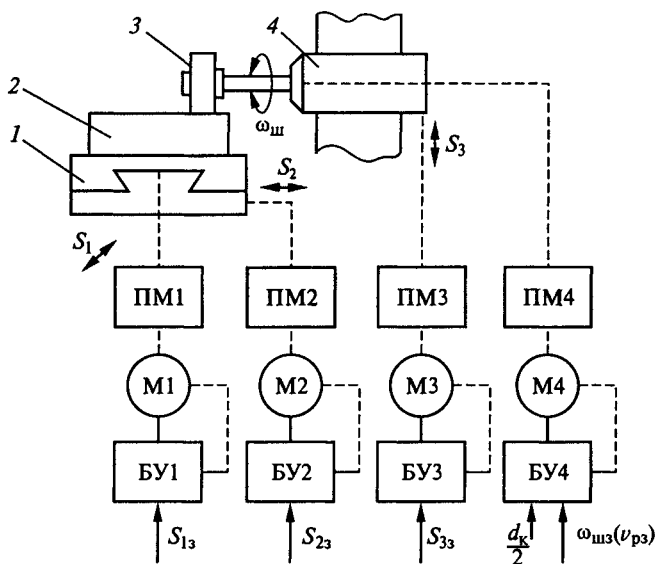


Рис. 4.28

**Системы стабилизации мощно-**  
**сти и усилия резания.** Управление  
 мощностью  $P_p$  и усилием  $F_p$  ре-  
 зания осуществляется с помощью  
 электроприводов шпинделя и по-  
 дач (ЭПШ и ЭПП) (рис. 4.29)  
 при изменении глубины резания  
 $h$  и свойств материала (твердо-  
 сти материала НВ). Стабилизируя  
 мощность резания, следует иметь  
 в виду, что  $P_p = F_p v_p$ . Если осу-  
 ществляется стабилизация скоро-  
 сти  $v_p$ , то выполнить условие  $P_p =$   
 $= \text{const}$  можно соблюдением ус-  
 ловия  $F_p = \text{const}$ . Таким образом,  
 стабилизируя переменные  $v_p$  и  
 $F_p$  при изменении переменных  $h$  и НВ, можно считать, что ста-  
 билизируем и сам процесс резания (ПР).

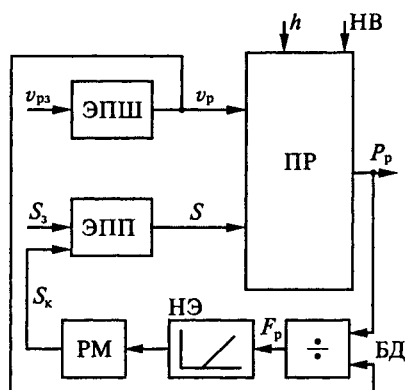


Рис. 4.29

Автоматическая стабилизация мощности (усилия) резания воз-  
 возможна, если применить нелинейную обратную связь, действие  
 которой начинается после превышения мощностью некоторого  
 значения  $P_{ро}$ , соответствующего рабочему режиму резания. При  
 условии  $P_p > P_{ро}$  на выходе нелинейного элемента НЭ и регулято-  
 ра мощности РМ появляется сигнал коррекции  $S_k$ , уменьшающий  
 подачу  $S$  так, чтобы  $P_p = \text{const}$ . Регулятор мощности обеспечивает  
 требуемую динамику процесса стабилизации.

Нелинейную коррекцию подачи удобно выполнять по усилию  
 $F_p$ , которое может быть получено с помощью блока деления БД,  
 реализующего зависимость  $F_p = P_p / v_p$ . Непосредственно измерять  
 мощность или усилие резания сложно, поэтому применяют кос-  
 венные оценки по мощности электропривода шпинделя  $P_{эш}$  и  
 значению потерь в двигателе  $\Delta P_d$  и передаточном механизме  $\Delta P_{пм}$ ;  
 $P_p = P_{эш} - \Delta P_d - \Delta P_{пм}$ . Потери  $\Delta P_d$  и  $\Delta P_{пм}$  можно учитывать разны-  
 ми способами, в том числе по эмпирическим формулам с учетом  
 значений тока и частоты вращения электродвигателя.

Их доля существенна, когда металлообработка происходит при  
 малых усилиях резания. Но в этом случае нет опасности появле-  
 ния чрезмерных значений  $P_p$ , нарушающих нормальный ход про-  
 цесса резания. При больших значениях усилий резания можно  
 пренебречь потерями и считать, что  $P_p \approx P_{эш}$ .

Функциональная схема системы стабилизации мощности реза-  
 ния показана на рис. 4.30. Электропривод шпинделя выполнен на  
 базе асинхронного электродвигателя М1, управляемого от преоб-  
 разователя частоты ПЧ, и имеет главную обратную связь по ско-  
 рости резания  $v_p$ . Датчик скорости резания ДСР формирует ин-  
 формацию по частоте вращения шпинделя  $\omega_{ш}$  и радиусу обработ-

ки  $r_{об}$ . Управление М1 может быть выполнено, в частности, по схеме частотно-токового управления. Датчик мощности ДМ измеряет активную мощность привода и с учетом потерь формирует сигнал  $u_p$ , пропорциональный мощности резания. Схема датчика мощности подробно рассмотрена в [1]. Электропривод подач выполнен на базе электродвигателя постоянного тока М2, управляемого по напряжению якоря от управляемого преобразователя УП. В зависимости от режима работы привода подач сигнал коррекции  $u_{сх}$  может быть подан на вход регулятора положения или скорости.

Стабилизация мощности осуществляется двумя сепаратными системами, взаимосвязанными процессом резания. Выбор регуляторов мощности, скорости резания, положения, скорости и тока привода подач и расчет их параметров могут быть выполнены на основании структурной схемы системы стабилизации (рис. 4.31). В сепаратной системе стабилизации скорости  $v_p$  не показан контур стабилизации потока двигателя, а электромагнитные процессы отражены в виде эквивалентного инерционного звена с передаточной функцией  $k_{эм}/(T_{эм}p + 1)$ , где  $k_{эм}$ ,  $T_{эм}$  — соответственно коэффициент и постоянная времени электромагнитного контура. В сепаратной системе стабилизации мощности рассматривается режим с постоянной подачей  $S'$  (мм/об или мм/мин), поэтому корректирующий сигнал  $u_{сх}$  поступает на вход регулятора скорости. Процесс резания характеризуется передаточной функцией  $H_p(p) = F_p(p)/S'(p) = k_p/(T_p p + 1)$ , где  $k_p$ ,  $T_p$  — соответственно коэффициент и постоянная времени резания. В соответствии с эмпирической формулой  $k_p = C_p v_p^n h S^{(y_p - 1)}$ , где  $C_p$ ,  $n$ ,  $y_p$  — соответственно коэффициент и показатели степени, зависящие от вида обработки, материала инструмента и детали. Постоянная  $T_p \approx 2\pi/\omega_{ш}$ . Изменение глубины резания и твердости материала детали отражено в виде эквивалентного возмущения  $F_{рв}$ . Настройка контуров управления выполняется по типовым динамическим характеристикам и зависит от интенсивности, возмущений  $M_{с1}$ ,  $M_{с2}$ ,  $F_{рв}$ . В частности, регуляторы РП, РС могут быть П-регуляторами, а РТ и РМ — ПИ-регуляторами. Для ПИ-регулятора мощности с передаточной функцией  $W_{рм}(p) = \beta_{рм}(\tau_{рм}p + 1) / \tau_{рм}p$  настройка параметров выполняется из условий оптимизации системы стабилизации мощности по модулю. Тогда  $\tau_{рм} = T_p$ , а  $\beta_{рм} = T_p / 2T_{\mu p} k_{дс2}^{-1} k_{пм2} k_{дм} k_p$ , где  $T_{\mu p}$  — малая некомпенсируемая постоянная времени контура регулирования мощности. Датчик мощности рассматривается как инерционное звено  $W_{дм}(p) = k_{дм} / (T_{дм}p + 1)$ , где  $k_{дм}$ ,  $T_{дм}$  — соответственно коэффициент и постоянная времени датчика мощности. Расчет параметров остальных регуляторов очевиден.

Если в качестве двигателя главного движения используется двигатель постоянного тока, то не нужно измерять мощность. Можно использовать информацию о токе якоря двигателя  $i_1$ , и с учетом



значений  $r_{об}$  вычислить значение  $F_p$ . Полагая справедливым  $P_p \approx P_{эш}$  и учитывая, что  $P_p = v_p F_p$ ,  $P_{эш} = \omega'_1 M'_1$ ,  $M'_1 = c_{д1} i_{p1} i_1$ ,  $v_p = \omega'_1 r_{об}$  (где  $\omega'_1$ ,  $M'_1$  — частота вращения и электромагнитный момент привода, приведенные к месту резания;  $c_{д1}$ ,  $i_{p1}$  — постоянная двигателя и коэффициент редукции передаточного механизма), имеем  $F_p = c_{д1} i_{p1} i_1 / r_{об}$ . Усилие резания пропорционально частному от деления значения тока якоря двигателя на текущее значение радиуса обработки. Если в приводе главного движения реализуется система двухзонного управления скоростью двигателя при изменении потока  $\Phi_1 = var$ , то  $F_p = c_{д1} i_{p1} \Phi_1 i_1 / r_{об}$ .

Функциональная схема системы стабилизации мощности (усилия) резания с приводом постоянного тока показана на рис. 4.32, где СУЭП — система управления электроприводом подачи, БУ — блок управления электроприводом подачи, БУ — блок управления электроприводом шпинделя. Настройка этой системы выполняется аналогично настройке предыдущей системы.

**Система стабилизации упругих деформаций, возникающих в зоне резания.** Поскольку система «станок — приспособление — инструмент — деталь» представляет собой многомассовую упругую механическую систему, то в процессе резания могут возникнуть резонансные колебания с большой амплитудой. Такие колебания, особенно проявляющиеся на малых частотах, существенно влияют на качество металлообработки. Не изменяя собственных частот колебаний, можно существенно уменьшить амплитуду колебаний частоты возмущающих воздействий, если сместить эти частоты относительно собственных частот колебаний, что выполнимо в результате изменения скорости резания  $v_p$  и скорости подачи  $S'$ .

**Типовая система стабилизации мощности и упругих деформаций станка.** Применительно к тяжелым фрезерным станкам осуществляется автоматическое поддержание задаваемой мощности резания  $P_{рз}$  путем изменения минутной подачи стола или бабки  $S_M$ , ограничивающей амплитуду вибраций станка  $A$  в допустимых пределах с помощью воздействий на подачу. На функциональной схе-

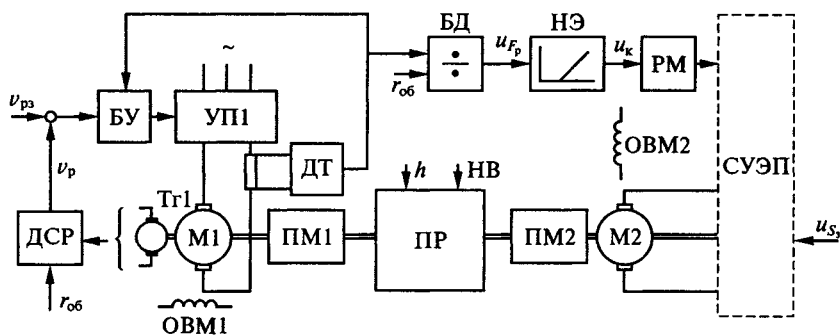


Рис. 4.32

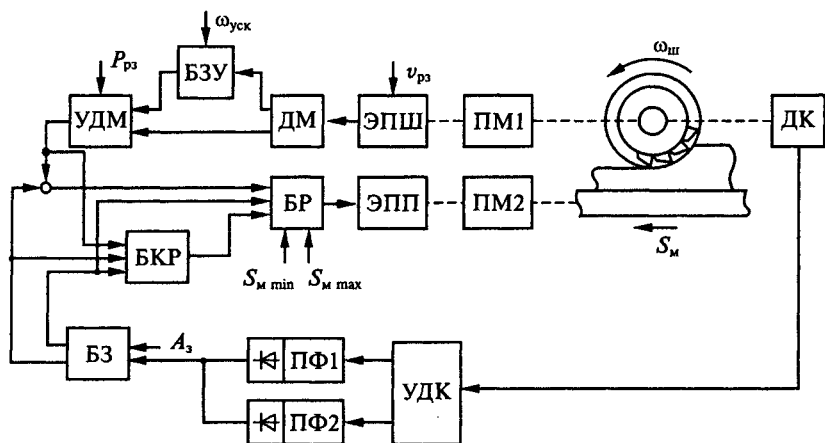


Рис. 4.33

ме системы (рис. 4.33) обозначены: ДМ, ДК — соответственно датчики мощности и колебаний; УДМ, УДК — соответственно усилители датчиков мощности и колебаний; БЗ, БЗУ, БКР, БР — блоки соответственно задания, запоминающих устройств, контроля режимов, регулирования; ПФ1, ПФ2 — полосовые фильтры; ЭПШ, ЭПП — электроприводы шпинделя и подачи.

Система стабилизации реализует алгоритм:

$$P_p = \text{const}; \omega_{ш} = \text{const}; S_m = \text{var}, \quad (4.40)$$

$$S_{m \min} \leq S_m \leq S_{m \max}; A \leq A_{\max}, \quad (4.41)$$

где  $S_{m \min}$ ,  $S_{m \max}$  — минимально и максимально допустимые минутные подачи;  $A_{\max}$  — максимально допустимая амплитуда вибраций,  $A_{\max} = A_3$ .

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

#### 4.4.5. Влияние погрешностей следящих электроприводов на качество металлообработки

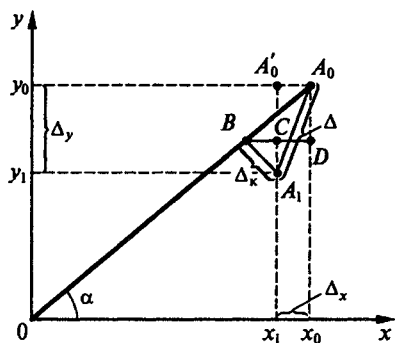
Основными показателями качества металлообработки на станках являются точность и шероховатость обработанных деталей. Точность определяется оценками соответствия размеров и формы де-

талей заданным значениям, шероховатость — разностью между максимальными и минимальными высотами кривой сечения обработанной поверхности. Отклонения от заданных нормированных значений точности и шероховатости возникают из-за кинематических погрешностей станка, упругих деформаций в механической системе «станок — приспособление — инструмент — деталь», возмущений систем управления в виде изменений сил и моментов сопротивлений, возникающих при движении главного привода и приводов подач, изменений усилий резания и подач из-за неоднородности обрабатываемого материала и изменения качества инструмента, недостаточного быстродействия, неоптимальности настройки регуляторов систем управления движением механизмов станка.

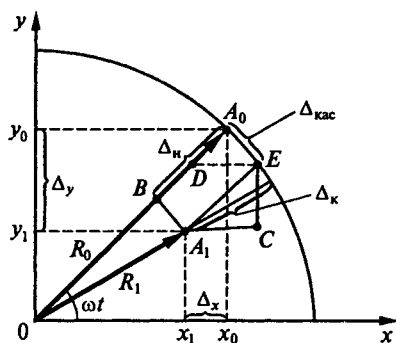
Имеются нормированные степени точности с оценками предельных отклонений поверхностей обработанных деталей от заданных значений. Они различаются по виду обработки и интервалам номинальных размеров (длин, диаметров) деталей. При обработке плоскостей и прямых принимаются следующие интервалы номинальных длин (мм): до 10; 10... 25; 25... 60; 60... 160; 160... 400; 400... 1000; 1000... 2500; 2500... 6300; 6300... 10000. При обработке цилиндрических поверхностей интервалы номинальных диаметров (мм) следующие: до 6; 6... 18; 18... 50; 50... 120; 120... 260; 260... 500; 500... 800; 800... 1250; 1250... 2000.

Дадим характеристику погрешностей и установим зависимость контурной погрешности металлообработки от динамических свойств следящих электроприводов подач для конкретных видов обработки деталей.

**Погрешности при прямолинейной обработке деталей.** Рассмотрим прямолинейную обработку деталей одновременно по двум координатам в плоскости  $Oxy$  (рис. 4.34, а). Прямая  $OA_0$  является заданной траекторией. Точка  $A_1$  реальной траектории отклонена от точки  $A_0$  заданной траектории на значения координатных по-



а



б

Рис. 4.34



грешностей  $\Delta_x = x_0 - x_1$  и  $\Delta_y = y_0 - y_1$ . Суммарная геометрическая погрешность  $\Delta = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}$  определяется из треугольника  $A_1A_0A'_0$ . Кратчайшее расстояние между заданной и реальной траекториями движения, определяемое по нормали из точки  $A_1$ , называется *контурной* погрешностью  $\Delta_k$ .

Для режима равномерного движения электроприводов по каждой оси координат со скоростями  $v_x, v_y$  при нулевых начальных значениях координат имеем  $x = v_x t; y = v_y t$ . Погрешность по каждой оси

$$\Delta_x = v_x / k_{v_x}; \quad \Delta_y = v_y / k_{v_y}, \quad (4.42)$$

где  $k_{v_x}, k_{v_y}$  — добротности по скорости следящих электроприводов.

Угол наклона заданной траектории к оси  $O_x$  может быть определен из уравнения:  $\alpha = \text{arctg}(v_y / v_x)$ .

Зависимость погрешности  $\Delta_k$  от погрешностей  $\Delta_x$  и  $\Delta_y$  можно установить из анализа треугольников  $A_0DB$  и  $BCA_1$ :

$$\begin{aligned} \Delta_y &= \Delta_k \cos \alpha + (\Delta_x + \Delta_k \sin \alpha) \text{tg} \alpha; \\ \Delta_k &= \Delta_y \cos \alpha - \Delta_x \sin \alpha. \end{aligned} \quad (4.43)$$

Выполнив тригонометрические преобразования и используя формулу (4.42), из (4.43) получим

$$\Delta_k = \frac{v_y}{1 + (v_y / v_x)^2} \left( \frac{1}{k_{v_y}} - \frac{1}{k_{v_x}} \right). \quad (4.44)$$

Контурная погрешность может быть через результирующую скорость подачи  $S' = v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$  и угол наклона траектории движения  $\alpha$ :

$$\Delta_k = \frac{v}{2} \sin 2\alpha \left( \frac{1}{k_{v_y}} - \frac{1}{k_{v_x}} \right). \quad (4.45)$$

Из формул (4.44) и (4.45) следует, что с ростом подачи увеличивается контурная погрешность, обусловленная скоростной погрешностью следящих электроприводов. Максимальное значение погрешности имеет место при угле обработки  $\alpha = 45^\circ$ . Контурная погрешность равна 0, если добротности следящих электроприводов координат  $x$  и  $y$  одинаковы.

**Погрешности при обработке окружностей.** Рассмотрим обработку окружности при одновременном движении электроприводов по двум координатам в плоскости  $Oxy$  (рис. 4.34, б). Заданная траектория представлена в виде части окружности с радиусом  $R_0$ . Точка  $A_1$  реальной траектории отклонена от точки  $A_0$  заданной траекторий на значения координатных погрешностей  $\Delta_x$  и  $\Delta_y$ . Кроме координатных, используются также следующие виды погрешностей: по касательной  $\Delta_{\text{кас}}$ ; по нормали  $\Delta_n$ ; контурной  $\Delta_k$ .

Рассмотрим режим равномерного движения с угловой скоростью  $\omega$ . Перемещения точек  $A_0$  и  $A_1$  с радиусами  $R_0$  и  $R_1$  по осям координат:  $x_i = R_i \cos \omega t$  и  $y_i = R_i \sin \omega t$ ,  $i = 0, 1$ . Скорости перемещений:  $dx_i/dt = -\omega R_i \sin \omega t$ ;  $dy_i/dt = \omega R_i \cos \omega t$ . Погрешности по осям координат и контурная соответственно

$$\Delta_x = \frac{dx/dt}{k_{v_x}} = -\frac{\omega R_i}{k_{v_x}} \sin \omega t; \quad (4.46)$$

$$\Delta_y = \frac{dy/dt}{k_{v_y}} = \frac{\omega R_i}{k_{v_y}} \cos \omega t; \quad (4.47)$$

$$\Delta_k = R_0 - R_1. \quad (4.48)$$

Из треугольника  $0BA_1$  получим

$$R_1 = \sqrt{(R_0 - \Delta_n)^2 + \Delta_{\text{кас}}^2}. \quad (4.49)$$

Из треугольников  $A_0DE$  и  $ECA_1$  имеем:

$$\Delta_n \sin \omega t + \Delta_{\text{кас}} \cos \omega t = \Delta_y; \quad (4.50)$$

$$\Delta_n \cos \omega t - \Delta_{\text{кас}} \sin \omega t = \Delta_x; \quad (4.51)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{кас}} &= \Delta_y \cos \omega t - \Delta_x \sin \omega t; \\ \Delta_n &= \Delta_y \sin \omega t + \Delta_x \cos \omega t. \end{aligned} \quad (4.52)$$

Подставляя (4.52) в (4.49), получим радиус реальной окружности

$$R_1 = \sqrt{R_0^2 + \Delta_x^2 + \Delta_y^2 - 2R_0(\Delta_x \cos \omega t + \Delta_y \sin \omega t)}. \quad (4.53)$$

Он отличается от заданного на значение погрешности  $\Delta_k$ . С учетом (4.46, 4.47, 4.48) можно записать

$$R_1 = R_0 \sqrt{1 + \omega^2 \Sigma}, \quad (4.54)$$

где

$$\Sigma = \cos^2 \omega t / k_{v_y}^2 + \sin^2 \omega t / k_{v_x}^2 - (\sin 2\omega t / \omega) \left( \frac{1}{k_{v_y}} - \frac{1}{k_{v_x}} \right). \quad (4.55)$$

Контурная погрешность

$$\Delta_k = R_0 - R_1 = R_0 \left( 1 - \sqrt{1 + \omega^2 \Sigma} \right). \quad (4.56)$$

Если учесть, что линейная скорость  $v = \omega R$ , то (4.56) можно записать в виде

$$\Delta_k = R_0 \left\{ 1 - \sqrt{1 + \frac{v^2}{R_0^2} \left[ \frac{\cos^2 \frac{vt}{R_0}}{k_{v_y}^2} + \frac{\sin^2 \frac{vt}{R_0}}{k_{v_x}^2} - \frac{\sin^2 \frac{vt}{R_0}}{v/R_0} \left( \frac{1}{k_{v_y}} - \frac{1}{k_{v_x}} \right) \right]} \right\}. \quad (4.57)$$

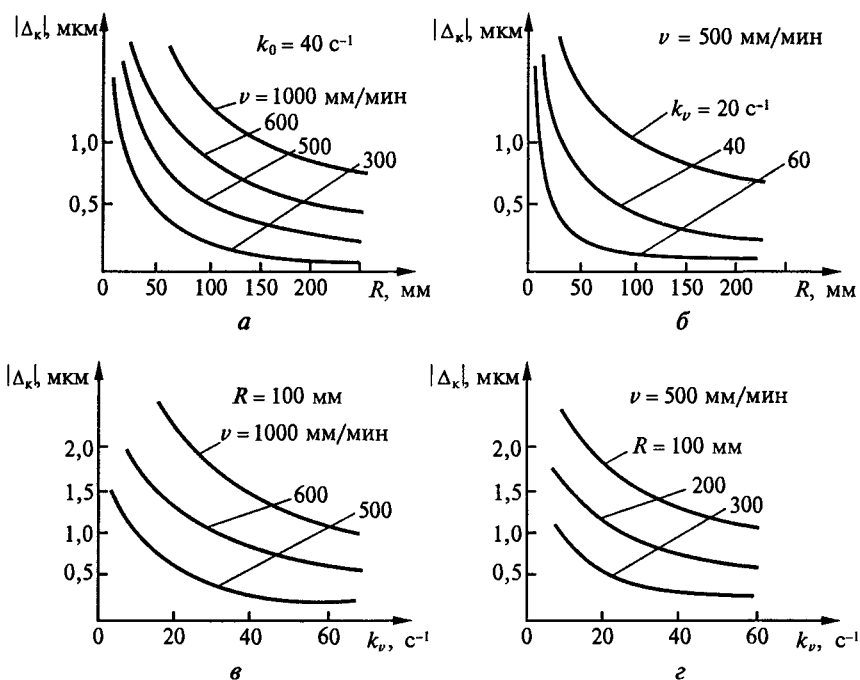


Рис. 4.35

При равенстве добротностей следящих приводов  $k_{v_x} = k_{v_y} = k_v$  выражение (4.57) упрощается:

$$\Delta_k = R_0 \left[ 1 - \sqrt{1 + \left( \frac{v}{R_0 k_v} \right)^2} \right]. \quad (4.58)$$

Из (4.58) следует, что контурная погрешность возрастает с увеличением скорости обработки и уменьшается с увеличением радиуса и добротности электроприводов. Примерные зависимости контурной погрешности  $\Delta_k$  от радиуса обработки  $R$  и добротности приводов  $k_v$  для разных скоростей подачи  $v$  показаны на рис. 4.35.

Если добротности электроприводов по координатам обработки не одинаковы, то контурная погрешность прямолинейной обработки и обработки окружностей резко возрастает. Приняв  $k_v = k_{v_y}$  и обозначив относительное отклонение добротностей приводов

$$a = (k_{v_y} - k_{v_x}) / k_{v_y}, \quad (4.59)$$

получим контурную погрешность при прямолинейной обработке

$$\Delta_k = \frac{va}{2k_v(a-1)} \sin 2\alpha. \quad (4.60)$$

При обработке окружности

$$\Delta_k = R_0 \left\{ 1 - \sqrt{1 + \left(\frac{v}{R_0 k_v}\right)^2 \left[ \frac{1 - 2a(1 - 0,5a) \cos^2\left(\frac{vt}{R_0}\right) + \left(\frac{a R_0 k_v}{v}\right) \sin 2\left(\frac{vt}{R_0}\right)}{(1-a)^2} + \frac{1-a}{1-a} \right]} \right\}. \quad (4.61)$$

Подставляя в (4.60) значения угла обработки  $vt/R_0 = \alpha = \pi/4$ , при котором контурная погрешность максимальна, и пренебрегая в выражении (4.61) малыми членами, получим из (4.60) и (4.61) формулы, удобные для инженерных расчетов:

при прямолинейной обработке

$$\Delta_k = \frac{va}{2k_v(a-1)}; \quad (4.62)$$

при обработке окружности

$$\Delta_k = R_0 \left[ 1 - \sqrt{1 + \left(\frac{v}{R_0 k_v}\right)^2 \frac{1 + (a R_0 k_v / v)}{1-a}} \right]. \quad (4.63)$$

Малые отклонения добротностей (несколько процентов) вызывают большие увеличения контурных погрешностей (в несколько раз). Поэтому стремятся обеспечить одинаковую добротность приводов разных координат и не делать их слишком большими при одинаковых значениях, так как это существенно не снижает контурную погрешность.

Шероховатость поверхности зависит от динамических отклонений подач по координатам движения (которые обусловлены изменением сил и моментов сопротивлений в направляющих и опорах), помех датчиков скорости и положения, изменений усилий резания и подач из-за неоднородности материала детали, упругих деформаций в приводах и механической системе «станок — приспособление — инструмент — деталь». Оценку шероховатости выполняют по высотам десяти точек профиля поверхности, отсчет которых производят от некоторой базовой высоты  $h_0$ , выбираемой из условия удобства измерения:

$$R_h = \frac{1}{5} \left( \sum_1^5 h_{\text{вып}} - \sum_1^5 h_{\text{впад}} \right), \quad (4.64)$$

где  $h_{\text{вып}}$ ,  $h_{\text{впад}}$  — высоты выпуклостей и впадин профиля сечения.

Применяют также оценку в виде среднего арифметического отклонения профиля от идеального

$$R_a = \frac{1}{l} \int_l |y| dx \approx \sum_1^n |y| / n. \quad (4.65)$$

Высокий класс шероховатости достигается применением прецизионных следящих систем, в которых используются лазерные и фотоэлектрические датчики для контроля малых перемещений, опоры с малыми коэффициентами трения и короткие кинематические передачи, обладающие высокой механической жесткостью.

## 4.5. Состав и свойства систем управления прокатным, кузнечным, прессовым и штамповочным оборудованием

### 4.5.1. Характеристика оборудования и электроприводов

**Клетки прокатных станов.** Клеть является основным технологическим оборудованием прокатного стана, осуществляющим деформацию металла в валках в режимах: нереверсивном (проход металла только в одном направлении) или реверсивном (прокатываемый металл проходит между валками несколько раз).

Клетки классифицируют по количеству и расположению валков, по режиму работы [48]. По количеству валков клетки прокатных станов разделяются на двух-, трех-, четырех- и многовалковые (рис. 4.36). Приводными являются, как правило, рабочие валки, в которых происходит обжатие металла. В многовалковых клетях в качестве приводных используют рабочие и опорные валки. По расположению валков клетки бывают с горизонтальными, вертикальными и косыми валками. Некоторые клетки имеют горизонтальные и вертикальные валки. Двухвалковые (см. рис. 4.36, *а*) и трехвалковые (см. рис. 4.36, *б*) клетки применяют в тех случаях, когда отношение диаметра рабочего валка к его длине  $D_b/L_b > 0,4$ , что обеспечивает достаточную жесткость валка на изгиб. Такие клетки устанавливают на обжимных, заготовочных, сортовых и трубных станах. Трехвалковая клетка имеет один двигатель, двухвалковая клетка может иметь один или два двигателя с индивидуальным или групповым приводом рабочих валков.

Четырехвалковые клетки (см. рис. 4.36, *в*), кроме двух рабочих валков, выполняющих обжатие металла, имеют два опорных валка, что позволяет повысить жесткость рабочих валков. Приводны-

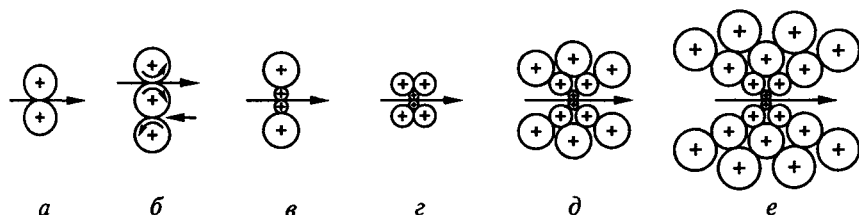


Рис. 4.36

ми являются рабочие валки. В зависимости от мощности привода используют один или два двигателя, соединенных механически на одном валу.

Шести-, двенадцати- и двадцативалковые клетки (см. рис. 4.36, *з*, *д*, *е*), кроме двух рабочих валков, имеют соответственно 4, 10 и 18 опорных валков, обеспечивающих высокую жесткость рабочих валков не только по вертикальной оси. Такие клетки служат для прокатки тончайшей ленты толщиной менее 0,1 мм. Приводными валками являются рабочие и опорные валки при индивидуальном и групповом питании. Они используются для станов холодной прокатки.

Для определения нагрузки прокатного двигателя необходимо знать энергию, которая идет на изменение формы заготовки, т. е. определить усилие давления или момент прокатки, создаваемые в процессе обработки металла. Существуют два способа определения момента прокатки: аналитический по эмпирическим формулам и с использованием кривых удельного расхода энергии на 1 т проката [48].

*Аналитический метод расчета момента прокатки.* Для прокатки металла необходимо к заготовке через валки приложить внешнюю силу, преодолевающую внутреннее сопротивление деформации, а к рабочим валкам — момент прокатки

$$M_{\text{пр}} = FD_p \sin \beta,$$

где  $F$  — усилие металла на один рабочий валок;  $D_p$  — диаметр рабочего валка;  $\beta$  — угол, определяющий точку приложения усилия  $F$ . Усилие металла на один валок

$$F = F_{\text{ср}} S,$$

где  $F_{\text{ср}}$  — среднее усилие металла на валки, МПа;  $S$  — поверхность соприкосновения металла с одним валком, мм<sup>2</sup>.

Значение среднего давления  $F_{\text{ср}}$  зависит от химического состава и температуры металла, значения обжатия, толщины заготовки, скорости прокатки, коэффициента трения и т. д. Современные методы расчета давления при прокатке основаны на теории пластичности.

На рис. 4.37 показана зона деформации металла в процессе прокатки. Для расчета давления металла на валки широко применяют формулы А. И. Целикова.

В общем случае прокатки

$$F_{\text{ср}} = k \frac{2h_1}{\Delta h (\delta - 1)} \left( \frac{h_n}{h_1} \right) \left[ \left( \frac{h_n}{h_1} \right)^\delta - 1 \right], \quad (4.66)$$

где  $k = 1,15$ ;  $h_1$  — толщина металла после прохода, мм;  $h_n$  — толщина металла в нейтральном сечении, мм;  $\Delta h = h_0 - h_1$  — обжатие, мм;  $h_0$  — толщина металла до прохода, мм;  $\delta = \sqrt{\frac{2D_p}{\Delta h}} = \frac{2\mu l}{\Delta h}$  —

коэффициент;  $\mu$  — коэффициент трения металла о валки;  $l$  — длина дуги захвата, мм;  $D_p$  — диаметр рабочего валка, мм.

Толщина раската в нейтральном сечении находится из соотношения

$$\frac{h_n}{h_1} = \left[ \frac{1 + \sqrt{(\delta^2 - 1)(h_0/h_1)^\delta}}{\delta + 1} \right]^{1/\delta} \quad (4.67)$$

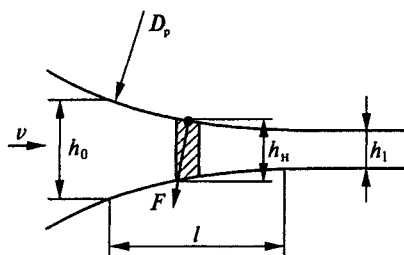


Рис. 4.37

Для упрощения расчетов по определению давления металла на валки строят номограммы, представляющие собой зависимость  $F/F_{cp} = f(\delta)$  для различных значений относительных обжатий  $\varepsilon = \Delta h / 100 \% / h_0$  (рис. 4.38). Усилие металла на валки

$$F = F_{cp} B_{cp} l,$$

где  $B_{cp}$  — средняя ширина раската, мм.

Для холодной прокатки, характеризующейся значительным натяжением прокатываемого металла, используют следующую формулу:

$$F_{cp} = \frac{\xi_1 k_1}{q} \left[ \left( \frac{\xi_0 k_0}{\xi_1 k_1} \right)^{\frac{h_0}{h_0 + h_1 e^q}} - \frac{\xi_0 k_0 - h_0}{\xi_1 k_1 (h_0 + h_1)} - \frac{h_1}{h_0 + h_1} \right], \quad (4.68)$$

где  $\xi_0 = (k_0 - \sigma_0)/k_0$ ;  $\xi_1 = (k_1 - \sigma_1)/k_1$ ;  $k_0$  и  $k_1$  — соответственно пределы текучести металла до и после прохода;  $\sigma_0$  и  $\sigma_1$  — соответственно натяжения при входе и выходе металла из валков. Обычно  $k_0 = 1,15\sigma_{s0}$ , а  $\sigma_{s0}$  находят по кривым, характеризующим зависимость предела текучести стали от степени обжатия  $\sigma_{s0} = f(\varepsilon_s)$  (рис. 4.39).

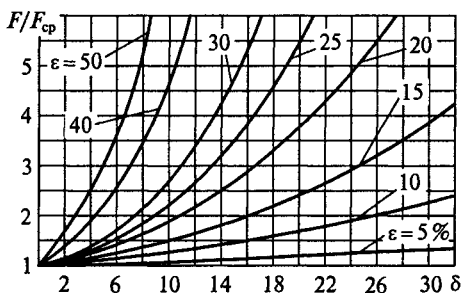


Рис. 4.38

Значение  $q$  находится по формуле

$$q = \frac{2\mu l}{(h_0 + h_1)}. \quad (4.69)$$

При холодной прокатке (особенно металлов повышенной прочности) происходит сплющивание валков, которое способствует увеличению длины дуги захвата  $l$  и росту среднего давления  $F'_{cp}$ . Длина дуги захвата с учетом сплющивания валка

$$l_c = x_0 + \sqrt{x_0^2 + l^2}, \quad (4.70)$$

где  $x_0$  — приращение длины дуги захвата в результате сплющивания валка.

Параметр

$$x_0 = \frac{RF'_{cp}}{950}, \quad (4.71)$$

где  $F'_{cp}$  — среднее давление при прокатке в сплюснутых валках, Н/мм<sup>2</sup>;  $R$  — радиус рабочего валка.

Таким образом, чтобы определить  $l_c$ , необходимо знать  $F'_{cp}$ , которое рассчитывается по  $l_c$ . В связи с этим  $F'_{cp}$  можно определить методами подбора или последовательного приближения.

Давление  $F'_{cp}$  определяется по (4.68), где принимается

$$q = q_c = \frac{2\mu l_c}{(h_0 + h_1)}. \quad (4.72)$$

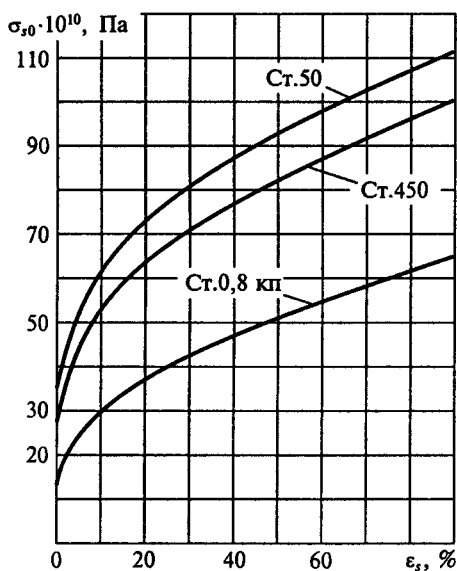


Рис. 4.39

*Расчет момента прокатки с использованием кривых удельного расхода энергии.* Момент прокатки  $M_n = F_n D_p$ , где  $F_n$  — усилие на один валок при прокатке металла в  $n$ -м пропуске, Н.

В  $n$ -м пропуске  $2F_n = A_n/L_n$ , где  $A_n$  — расход энергии прокатки в  $n$ -м пропуске;  $L_n$  — длина заготовки после  $n$ -го пропуски.

Используя кривые удельного расхода энергии, определяют расходуемую на прокатку энергию  $A_n$ . Кривые удельного расхода энергии представляют собой зависимость  $Q = f(\lambda)$  для обжимных, сортовых и других станов и



$Q = f(h)$  для листовых станов, где  $Q$  — удельный расход энергии на 1 т проката, кВт·ч/т;  $\lambda = S_n/S_{n-1}$  — относительное удлинение прокатываемой заготовки;  $h$  — толщина заготовки в листовых станах, мм.

Кривые удельного расхода энергии, приведенные в [48], сняты экспериментально, и расчет с их использованием дает хороший результат, если заданные условия прокатки сходны с условиями, при которых снималась кривая.

В прокатном производстве для привода рабочих валков клетей большинства станов используются двигатели постоянного тока, получающие питание от полупроводниковых преобразователей. В новых разработках и при модернизации применяют синхронные и асинхронные короткозамкнутые двигатели, получающие питание от преобразователя частоты.

Условия работы электроприводов прокатных станов (особенно реверсивных) предъявляют высокие требования к электрическим машинам. Для получения наилучших динамических показателей при заданной установленной мощности требуются машины с предельными характеристиками, высоким КПД и максимальной надежностью в эксплуатации.

Для привода валков рабочих клетей прокатных станов применяют двигатели мощностью от десятков до тысяч киловатт с различным диапазоном скоростей. В установках мощностью до 200 кВт используют в основном серийные двигатели, а для установок бóльшей мощности разрабатываются специальные двигатели.

Обжимные станы, требующие больших обжатий при малых геометрических размерах заготовки по длине, требуют установки реверсивных двигателей, рассчитанных на малые частоты вращения (50... 150 мин<sup>-1</sup>). Неревверсивные двигатели, используемые для полунепрерывных и других станов, изготавливают более быстроходными (100... 1250 мин<sup>-1</sup>).

**Кузнечно-прессовые машины.** КПМ осуществляют деформацию металла или другого материала в процессе приложения ударного усилия. К таким машинам относятся кривошипные прессы, ковочные машины и вальцы, винтовые прессы и др. Электроприводы кузнечно-прессовых машин разделяются на: главные электроприводы машин, снабженных маховиками; главные безмаховиковые электроприводы машин; электроприводы насосов и компрессоров, используемых в гидропрессах и молотах; электроприводы вспомогательных механизмов механических и гидравлических КПМ [48, 51].

Расчеты мощности и выбор электродвигателей для последних трех групп приводов КПМ не имеют каких-либо особенностей и производятся по аналогии с другими механизмами. Некоторая специфика, свойственная всем КПМ, заключается в выборе исполнений электродвигателей по способу защиты от вредных воздействий окружающей среды, поскольку большинство этих элек-

троприводов работает в условиях вибраций и ударов, повышенных температур горячих цехов, в атмосфере, содержащей пары воды и масла, обладающей повышенной проводимостью вследствие наличия окалины, графитовой смазки и т.п. Поэтому для подавляющего большинства приводов КПМ электродвигатели должны иметь закрытое обдуваемое (продуваемое), а для некоторых — даже в пожаро- и взрывобезопасное исполнения.

Механические КПМ с маховиковыми электроприводами составляют наибольшую группу по числу типов и количеству выпускаемых и эксплуатируемых машин. В нее входят кривошипные прессы, ковочные машины и вальцы, винтовые прессы и др. Специфической особенностью работы этого оборудования является резко выраженный ударный характер нагрузки, при которой статический момент сопротивления за цикл резко изменяется по различным законам от значения момента холостого хода  $M_{сх}$  до максимального ( $M_{сmax}$ ) и вновь падает до  $M_{сх}$ . При этом для большинства кривошипных КПМ отношение  $M_{сmax}/M_{сх} = 10 \dots 30$ .

#### 4.5.2. Система управления клетью прокатного стана

Клетки прокатного стана могут быть нереверсивными и реверсивными. Реверсивные клетки, кроме горизонтальных прокатных валков, могут иметь пару вспомогательных вертикальных валков для обжатия боковых граней заготовки. Такие клетки называются универсальными (слябинги, некоторые толстолистовые и балочные станы).

Различают групповой и индивидуальный приводы прокатных валков. При групповом приводе (рис. 4.40) прокатные валки 2, установленные в станине клетки 1, приводятся во вращение от общего двигателя 5 через шестеренную клетку 4 и универсальные шпиндели 3.

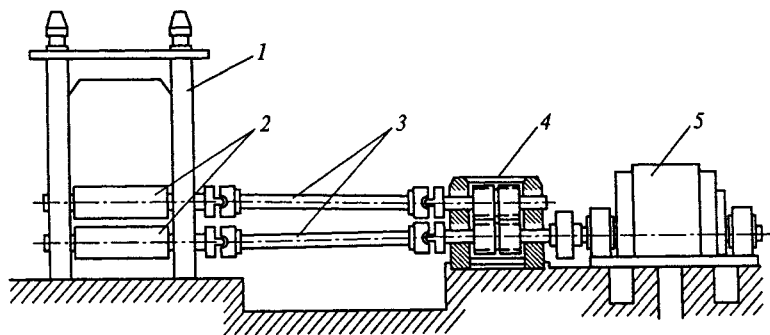


Рис. 4.40

прокатных валков 2 имеет привод от отдельного электродвигателя 5. Система передачи вращающего момента от верхнего двигателя, более удаленного от клетки 1, кроме универсального шпинделя 3, снабжена промежуточным валом 4.

Основные преимущества индивидуального привода валков перед групповым состоят в: увеличении предельной мощности, которая может быть приложена к каждому валку; уменьшении суммарного момента инерции, приходящегося на единицу мощности привода; отсутствии шестеренной клетки, потери мощности в которой могут достигать 5 % мощности привода; отсутствии необходимости в точном подборе диаметров валков. Уменьшение момента инерции в свою очередь дает ряд преимуществ: уменьшается продолжительность прокатки вследствие увеличения допустимых ускорений и замедлений; сокращается расход энергии на 1 т проката и на нагревание электрических машин; менее опасными становятся срывы при захвате металла; скорость захвата из-за изменения условий захвата может быть увеличена, что приводит к возрастанию средней скорости прокатки и, следовательно, к росту производительности стана.

Основными недостатками индивидуального привода по сравнению с групповым являются: увеличение количества электрооборудования; усложнение схемы управления, связанное с необходимостью регулирования соотношения скоростей и выравнивания нагрузок двигателей; увеличение в некоторых случаях размеров машинного зала, так как угол наклона шпинделей не должен превышать  $(6 \dots 8)^\circ$ , вследствие чего двигатели должны быть удалены от клетки на большое расстояние.

Индивидуальный привод валков целесообразно применять для мощных обжимных станов с диаметром валков 1100 ... 1300 мм. Для блюминга диаметром 1000 мм можно применять индивидуальный и групповой приводы. Для заготовочных, рельсобалочных станов

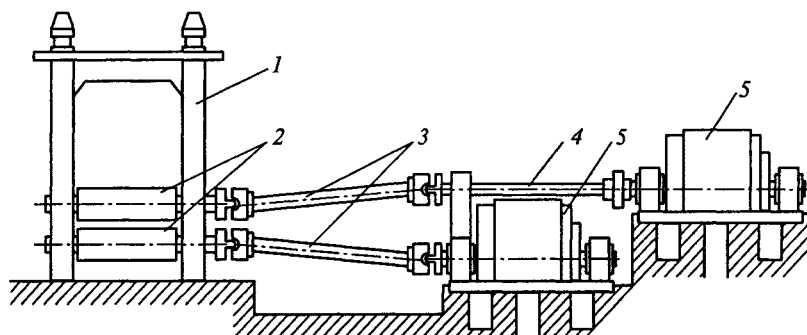


Рис. 4.41

диаметром 900 мм и менее предпочтительно применение группового привода.

Цикл работы реверсивной клетки стана горячей прокатки для одного пропуска в общем случае включает в себя разгон валков вхолостую до скорости захвата слитка, разгон со слитком в валках до установившейся скорости, прокатку на этой скорости, торможение до скорости выброса слитка и реверс вхолостую до скорости захвата слитка, повторный разгон со слитком в валках до установившейся скорости, прокатку на этой скорости, торможение до скорости выброса слитка и реверс вхолостую до скорости захвата при противоположном направлении вращения валков. Во время паузы между пропусками металла с помощью нажимного устройства клетки перемещают верхний прокатный валок для изменения раствора между валками в соответствии с требуемым обжатием. При необходимости заготовка перемещается в поперечном направлении по рольгангу посредством линейек манипулятора и кантуется (поворачивается на  $90^\circ$  вокруг своей продольной оси) с помощью кантователя. Рабочий рольганг возвращает заготовку к клетке для последующего пропуска. По окончании последнего пропуска заготовка транспортируется рольгангом к следующему механизму, а нажимное устройство перемещает верхний прокатный валок в первоначальное положение.

Работа электропривода реверсивных клеток характеризуется частыми реверсами (с числом включений до 1000 и более в 1 ч) и ударной нагрузкой, которая может превышать номинальную в 2 раза и более. Диапазон регулирования скорости, определяемый скоростями прокатки и захвата, достигает 10 : 1.

Номинальная частота вращения прокатных двигателей обычно  $50 \dots 70 \text{ мин}^{-1}$ . Диапазон регулирования скорости изменением магнитного потока двигателя не превышает 2 : 1. Уменьшение потока двигателя применяется только при небольших обжатиях, главным образом при последних пропусках металла, так как работа при ослабленном возбуждении ведет к непроизводительному нагреванию и снижению перегрузочной способности двигателя.

По условиям технологического процесса прокатки ускорение привода постоянно. Ускорение и замедление во время паузы между пропусками при изменении скорости от скорости выброса до скорости захвата определяются, как правило, временем работы нажимного устройства и лежат в пределах: для группового привода соответственно  $40 \dots 60$  и  $50 \dots 70 \text{ мин}^{-1}\text{с}^{-1}$ , для индивидуального привода  $70 \dots 100$  и  $80 \dots 130 \text{ мин}^{-1}\text{с}^{-1}$ . Среднее значение динамического момента при этом обычно составляет  $0,8 \dots 1$  номинального, что позволяет использовать большую часть допустимого момента двигателя при разгоне со слитком в валках для обжатия металла.

При увеличении скорости захвата и уменьшении скорости выброса слитка лучше используется запас кинетической энергии вра-

щающихся частей привода, уменьшается нагревание двигателей, а также снижается изменение активной и реактивной мощностей при использовании вентильного электропривода.

Предельная скорость захвата определяется коэффициентом трения металла о валки, который снижается с увеличением скорости. Скорость выброса не может быть слишком низкой. Если продолжительность паузы определяется временем работы вспомогательного механизма, например нажимного устройства, чрезмерное снижение скорости выброса приводит к уменьшению производительности стана. Для реверсивных станов частота вращения привода захвата выбирается в пределах  $10 \dots 45 \text{ мин}^{-1}$ . Меньшие значения принимаются для первых пропусков, большие — для последующих. Примерно в тех же пределах меняется и частота вращения привода при выбросе. При последнем пропуске выброс слитка производится на скорости прокатки.

В универсальных клетях, где прокатка заготовки происходит одновременно в горизонтальных и вертикальных валках, необходимо обеспечить определенное соотношение линейных скоростей валков с учетом направления прокатки (от вертикальных валков к горизонтальным или наоборот), удлинения металла при обжати во избежание нежелательных деформаций металла (на балочных станах) и перегрузки механического оборудования и электроприводов вертикальных валков. Соотношение между скоростями валков при прокатке от вертикальных валков к горизонтальным должно быть следующим:

$$\omega_{\text{в}}/\omega_{\text{г}} = D_{\text{г}}/D_{\text{в}}\lambda_{\text{г}}, \quad (4.73)$$

а при прокатке от горизонтальных валков к вертикальным —

$$\omega_{\text{в}}/\omega_{\text{г}} = D_{\text{г}}\lambda_{\text{в}}/D_{\text{в}}, \quad (4.74)$$

где  $D_{\text{в}}$ ,  $D_{\text{г}}$  — диаметры вертикальных и горизонтальных валков;  $\omega_{\text{в}}$ ,  $\omega_{\text{г}}$  — угловые скорости вертикальных и горизонтальных валков;  $\lambda_{\text{в}}$ ,  $\lambda_{\text{г}}$  — удлинения металла при прокатке в вертикальных и горизонтальных валках.

Расчет мощности прокатных двигателей реверсивного стана горячей прокатки является поверочным. Исходными данными при расчете служат программы прокатки и проектная производительность стана. В программе прокатки указываются число пропусков, размеры слитков до и после каждого пропуска, порядок кантовки слитков, марка и температура стали, диаметр валков в каждом калибре. Расчет обычно выполняют для всего сортамента стана, после чего устанавливается самая трудная программа прокатки, характеризующаяся наибольшим произведением полного удлинения металла на максимальную производительность с учетом числа пусков в 1 ч.

Расчет начинается с построения тахограммы (рис. 4.42). Треугольный график скорости (см. рис. 4.42, I) обычно имеет место при первых пропусках, когда длина слитка небольшая. При последующих пропусках, когда длина слитка увеличивается, график скорости принимает форму трапеции (см. рис. 4.42, II).

При последних пропусках для уменьшения времени прокатки целесообразно увеличить скорость, ослабив магнитный поток двигателя. Соответствующий график скорости изображен на рис. 4.42, III.

Максимальная частота вращения двигателя ( $\text{мин}^{-1}$ ) при треугольном графике прокатки

$$n_{\max} = \sqrt{\frac{2ab \frac{60L}{\pi D} + n_3^2 b + n_B^2 a}{a + b}}, \quad (4.75)$$

где  $L$  — длина слитка после прокатки в данном пропуске, мм;  $D$  — диаметр валков, мм;  $n_3$ ,  $n_B$  — соответственно частоты вращения захвата и выброса,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $a$ ,  $b$  — соответственно ускорение и замедление привода,  $\text{рад}/\text{с}^2$ .

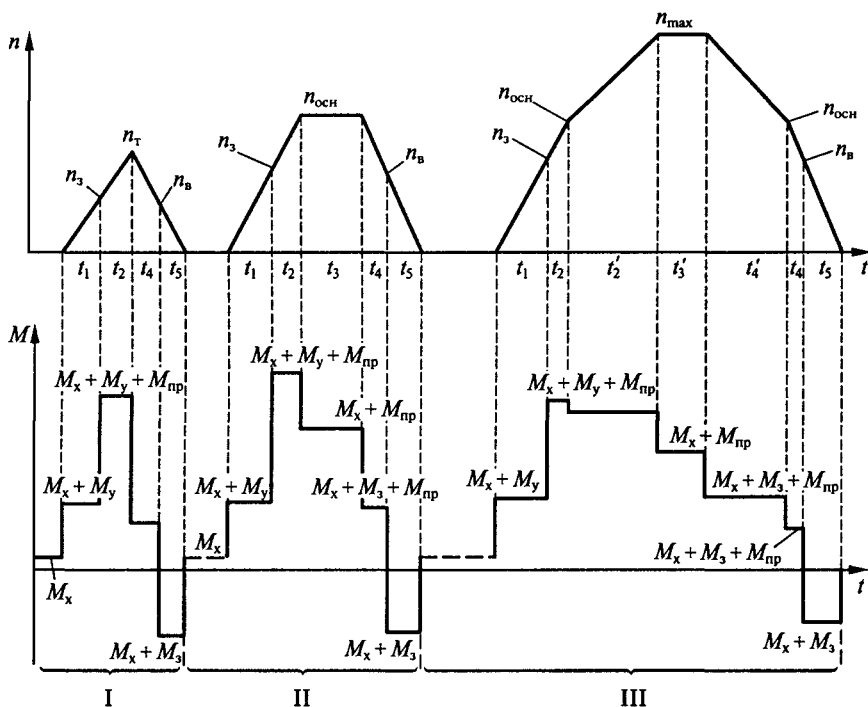


Рис. 4.42

В случае универсальных станов скорость захвата металла горизонтальными валками при движении металла от вертикальных валков к горизонтальным и скорость выброса металла из горизонтальных валков при движении его от горизонтальных валков к вертикальным принимают равными скорости прокатки.

Время паузы между пропусками, определяемое работой нажимного устройства, обычно равно 1,5...2 с. В случае кантовки время паузы может быть увеличено до 3,5...5 с. Время паузы между слитками определяется временем работы нажимного устройства по перемещению верхнего валка в верхнее положение и обычно принимается в пределах 5...6 с. Время ускорения без слитка  $t_1$ , со слитком до основной скорости  $t_2$  и со слитком выше основной скорости  $t'_2$  (см. рис. 4.42, III) определяются по формулам:  $t_1 = n_3/a$ ;  $t_2 = (n_{\text{осн}} - n_3)/a$ ;  $t'_2 = (n_{\text{max}} - n_{\text{осн}})/a'$ , где  $a$  и  $a'$  — ускорения до и выше основной скорости соответственно;  $n_{\text{max}}$  — максимальная установившаяся частота вращения при номинальном напряжении и ослабленном магнитном потоке двигателя, мин<sup>-1</sup>;  $n_{\text{осн}}$  — основная частота вращения двигателя (при номинальных напряжении и потоке), мин<sup>-1</sup>. Для треугольного графика скорости в формуле для  $t_2$  величина  $n_{\text{осн}}$  должна быть заменена на  $n_{\text{т}}$  (максимальная скорость для этого графика).

Время прокатки на основной скорости

$$t_3 = \frac{60L}{\pi D n_{\text{осн}}} - \frac{1}{n_{\text{осн}}} \left[ \frac{n_{\text{осн}}^2 - n_3^2}{2a} + \frac{n_{\text{осн}}^2 - n_{\text{в}}^2}{2b} \right]. \quad (4.76)$$

Время прокатки на установившейся максимальной скорости  $n_{\text{max}}$

$$t'_3 = \frac{60L}{\pi D n_{\text{max}}} - \frac{1}{n_{\text{max}}} \left[ \frac{n_{\text{осн}}^2 - n_3^2}{2a} + \frac{n_{\text{осн}}^2 - n_{\text{в}}^2}{2b} + \frac{n_{\text{max}}^2 - n_{\text{осн}}^2}{2} \left( \frac{1}{a'} + \frac{1}{b'} \right) \right], \quad (4.77)$$

где  $b$  и  $b'$  — замедления при частоте вращения двигателя до и выше основной скорости соответственно, рад/с<sup>2</sup>.

Время замедления со слитком при ослабленном магнитном потоке

$$t'_4 = (n_{\text{max}} - n_{\text{осн}})/b'. \quad (4.78)$$

Время замедления со слитком при номинальном магнитном потоке

$$t_4 = (n_{\text{осн}} - n_{\text{в}})/b. \quad (4.79)$$

Время замедления без слитка

$$t_5 = n_{\text{в}}/b. \quad (4.80)$$

Динамический момент двигателя (Н·м) в случае ускорения

$$M_y = Ja/9,55, \quad (4.81)$$

в случае торможения

$$M_z = Jb/9,55, \quad (4.82)$$

где  $J = J_d + J_{вп} + J_{сл}$  — полный момент инерции привода, равный сумме моментов инерции двигателя, прокатных валков, системы передачи и слитка, приведенных к валу двигателя (значением  $J_{вп} + J_{сл}$  ввиду его относительной малости пренебрегают).

Методы определения момента прокатки  $M_{пр}$  описаны выше. Момент двигателя определяется алгебраической суммой динамического момента, момента прокатки и момента трения (см. рис. 4.42). График моментов строится для всего цикла прокатки. По нему определяют эквивалентный момент, который сравнивают с номинальным моментом предварительно выбранного двигателя. В случае ослабления магнитного потока момент двигателя условно увеличивают пропорционально скорости. Таким образом, фактически расчет ведется по методу эквивалентного тока. Если расчетный средний квадратический момент превышает номинальный момент предварительно выбранного двигателя, то выбирают другой двигатель или меняют программу прокатки, уменьшая обжатие и увеличивая число пропусков.

Питание прокатных двигателей реверсивных станов осуществляется от полупроводниковых преобразователей.

Основным требованием, предъявляемым к реверсивным станам горячей прокатки, производящим заготовки для всех остальных станов прокатного производства, является максимальная производительность. Для уменьшения продолжительности цикла прокатки слитка необходимо по возможности сокращать время отработки заданного перемещения, определяемого длиной заготовки в каждом пропуске, и время паузы между пропусками.

Оптимальный по быстродействию закон изменения во времени скорости  $n$  в пределах номинальной, т. е. закон, позволяющий получить минимальное время отработки заданного перемещения при номинальном нагреве двигателя, представляет собой параболу, которой соответствует линейное во времени изменение динамического тока  $i_{дин}$  (рис. 4.43, а) [22]. Обычно стремятся получить линейное изменение скорости по времени, которому соответствует неизменный динамический ток (рис. 4.43, б). Это объясняется следующими причинами: линейное изменение скорости проще осуществить, чем параболическое; для достижения скорости захвата за минимальное время при заданной температуре нагревания оптимальным является линейный закон изменения скорости, а не параболический; небольшое преимущество параболического закона изменения скорости по сравнению с линейным (в идеальных условиях выигрыш во времени составляет 7%) становится



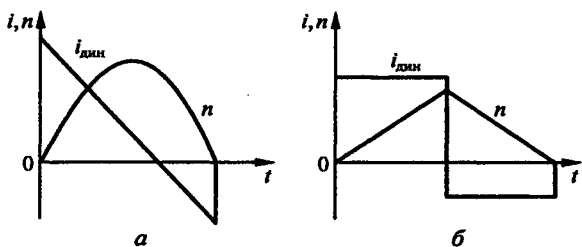


Рис. 4.43

меньше, если учесть ограничения, налагаемые на производную тока по условиям коммутации двигателя, а также на значения тока и скорости.

Широко распространены системы управления приводами реверсивных прокатных станов, основанные на принципе подчиненного регулирования. На рис. 4.44, *a* изображена схема двухзонного регулирования скорости реверсивной клетки с индивидуальным приводом горизонтальных валков для случая согласованного управления вентильными преобразователями [48]. Каждый из двигателей имеет автономную схему регулирования напряжения якоря и магнитного потока возбуждения.

Схема регулирования напряжения двигателя имеет два контура регулирования тока: по одному для каждой группы преобразователей, соответствующих работе двигателей в направлении «Вперед» и «Назад» в двигательном режиме. Каждый контур содержит свой ПИ-регулятор тока (РТВ, РТН); на вход его поступают сигналы: задания для тока якоря ( $I_{зт}$ ), обратной связи по току от соответствующей группы вентилях ( $I_{яв}$ ,  $I_{ян}$ ) и задания для уравнительного тока ( $I_{зут}$ ). Последний из сигналов обеспечивает согласование регулировочных характеристик групп вентилях через системы фазового управления СФУ поддержанием заданного уравнительного тока. Разделительные диоды на входе регуляторов тока обеспечивают автоматическое включение контура тока той группы вентилях, которая соответствует заданному направлению вращения.

Контур скорости содержит регулятор скорости РС. Делительное устройство  $I_{рс}/\Phi$  на выходе РС позволяет сохранять оптимальную настройку контура скорости при любом потоке двигателя. Регулятор мощности РМ изменяет максимальную уставку по току якоря в соответствии с перегрузочной способностью двигателей.

Схема регулирования возбуждения двигателя имеет контур регулирования потока с ПИ-регулятором РТВ и обратной связью по потоку двигателя и контур ЭДС двигателя с ПИ-регулятором ЭДС (РЭ). Задающий сигнал  $E_{ном}$  устанавливает ЭДС двигателя, по до-

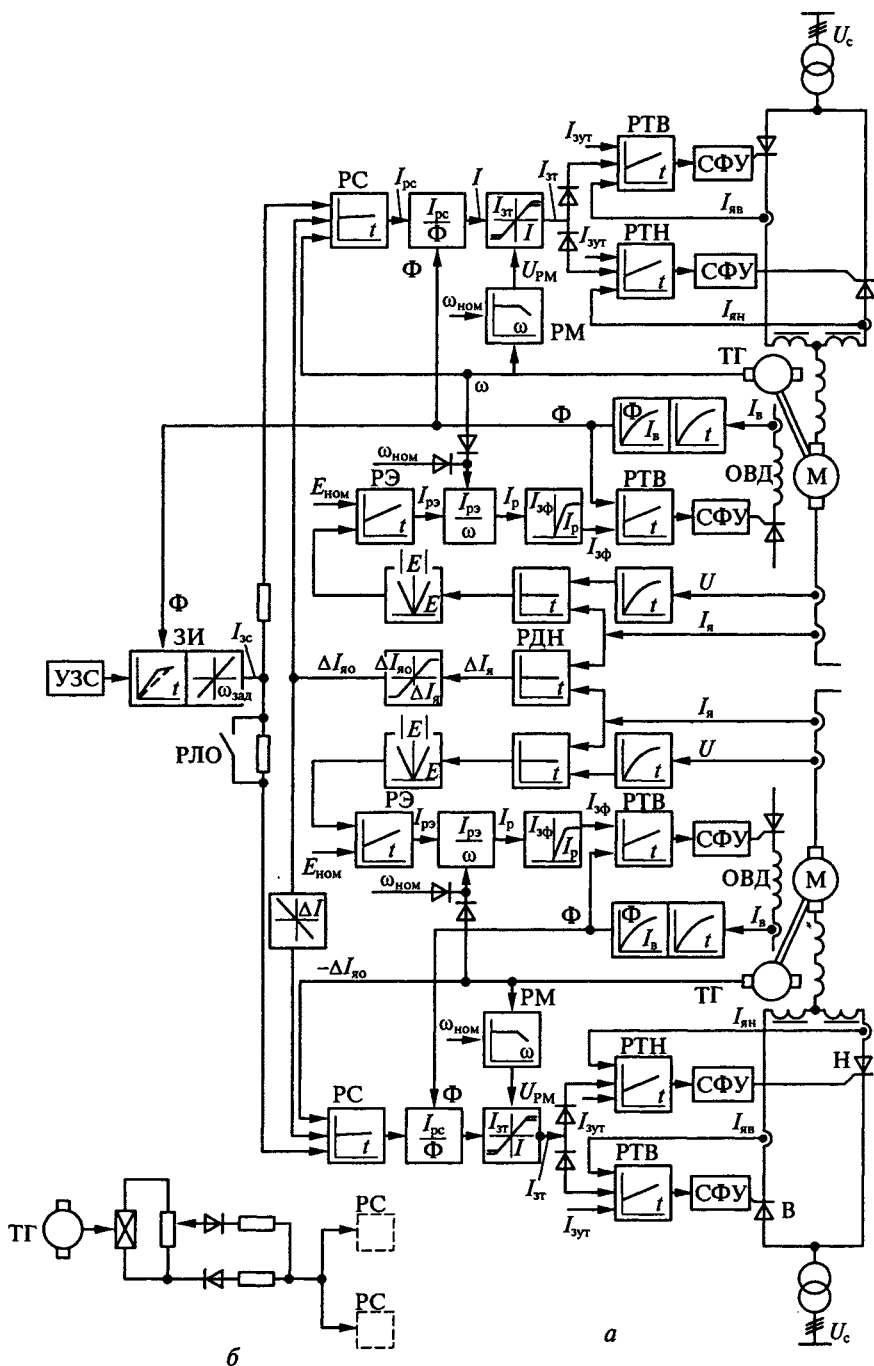


Рис. 4.44

стижении которой начинает ослабляться возбуждение двигателя. Благодаря делителю  $I_{рз}/\omega$  на выходе РЭ сохраняется оптимальная настройка контура ЭДС при скорости выше основной. Блок ограничения определяет максимальный магнитный поток, равный номинальному значению.

Выравнивание токов двигателей осуществляется подачей напряжения соответствующей полярности, пропорционального разности токов двигателей  $\Delta I_{я0}$ , на вход регуляторов скорости.

Устройство задания скорости УЗС, содержащее командоаппарат и устройство согласования формирует сигнал на входе задатчика интенсивности ЗИ. С помощью напряжения обратной связи по потоку  $\Phi$  достигается уменьшение темпа изменения выходного сигнала ЗИ по мере ослабления возбуждения, благодаря чему динамический ток при разгоне и торможении поддерживается постоянным.

Перед захватом металла скорость нижнего вала должна быть выше скорости верхнего вала, что достигается с помощью реле РЛО, управляемого оператором с поста управления и шунтирующего часть резистора на входе РС нижнего вала.

Схема управления вертикальными валками аналогична схеме для горизонтальных валков за исключением задающего узла. Узел задания скорости для вертикальных валков изображен на рис. 4.44, б. Задающий сигнал для скорости вертикальных валков поступает от тахогенератора ТГ горизонтального вала. Узел задания скорости обеспечивает необходимое соотношение скоростей вертикальных и горизонтальных валков.

Силовая схема вентильного электропривода горизонтальных валков слябинга включает в себя два реверсивных преобразователя (по числу двигателей), каждый из которых состоит из двух не-реверсивных преобразователей.

В схемах электроприводов реверсивных станков предусматриваются следующие защиты: максимально-токовая от мгновенной перегрузки по току; от пробоя вентилях; от аварийных токов в уравнительных контурах; от аварийных токов в якорной цепи двигателя; минимально-токовая от размыкания цепи обмотки возбуждения двигателя; от чрезмерного повышения напряжения на двигателе; от чрезмерного повышения скорости; от включения линейных автоматов при отключенном, но вращающемся двигателе при наличии напряжения на двигателе и на преобразователе. Защита выполняется с помощью электрических аппаратов, установленных в соответствующих цепях электрической схемы привода. Повышение скорости контролируется центробежным реле, установленным вместе с тахогенератором на валу двигателя.

Современной тенденцией в реализации привода валков (главного привода клетки) является применение двигателей переменного тока: синхронных или асинхронных с короткозамкнутым ротором. При этом используются комплектные преобразователи ча-

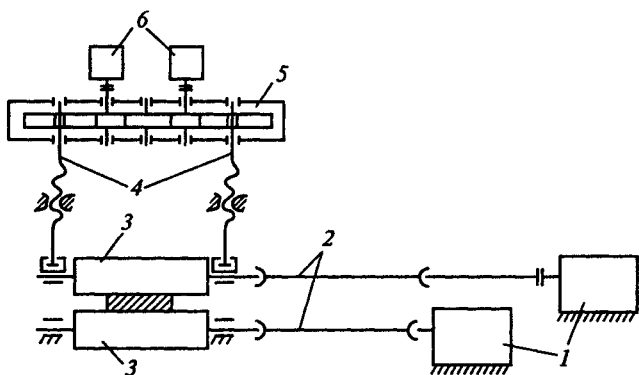


Рис. 4.45

стоты со звеном постоянного тока или непосредственные преобразователи частоты НПЧ (циклоконвертеры), которые применяются в безредукторных приводах с пониженной частотой питания (от 25 Гц и ниже).

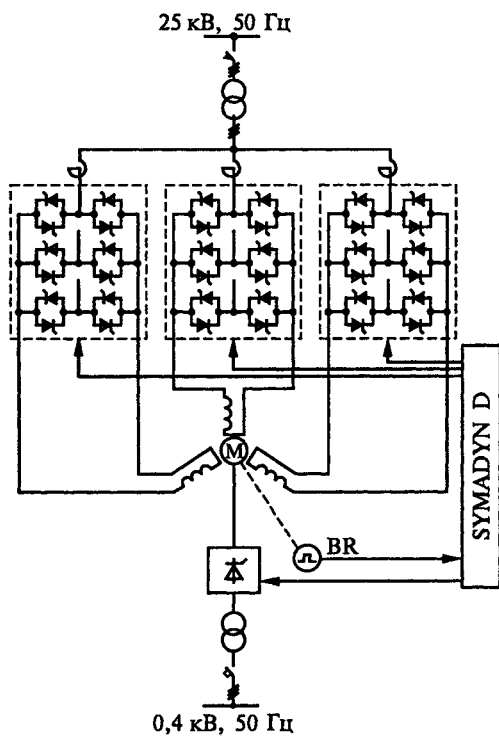


Рис. 4.46

Рассмотрим систему управления клетью толстолистового прокатного стана 2800. Кинематическая схема двухвалковой клетки (дуо) стана с индивидуальным приводом валков приведена на рис. 4.45, где 1 — двигатели, 2 — шпиндели, 3 — валки, 4 — нажимные винты, 5 — редуктор, 6 — двигатели нажимного устройства.

Кроме нажимного устройства, осуществляющего изменение раствора валков перед каждым пропуском (проходом) металла, клеть прокатного стана имеет ряд вспомогательных приводов с электрогидравлическим управлением для уравнивания верхнего валка, смены валков и т. п., схемы управления которыми не приводятся.

На рис. 4.46 приведена схема управления главным приводом клетки с синхронными двигателями для каждого валка мощностью 4000 кВт, частотой вращения  $40/80 \text{ мин}^{-1}$ , напряжением 923 В при использовании циклоконвертора фирмы «Siemens» (диапазон частот  $0 \dots 4/8 \text{ Гц}$ ). Фазовое управление силовыми тиристорными модулями осуществляется микропроцессорной системой SIMADYN D при коммутации тиристорных групп в функции положения ротора (датчик BR).

Возбуждение двигателя предусмотрено от комплектных тиристорных блоков с интерфейсом для управления от системы SIMADYN D.

Таким образом, управление приводом осуществляется по схеме вентильного двигателя.

Структурная схема системы управления главным приводом клетки в комплексе управления участка прокатного стана приведена на рис. 4.47.

Система управления SIMADYN D имеет модуль связи с промышленной сетью управления приводами Profibus DP и таким образом получает команды на режимы работы от системы програм-

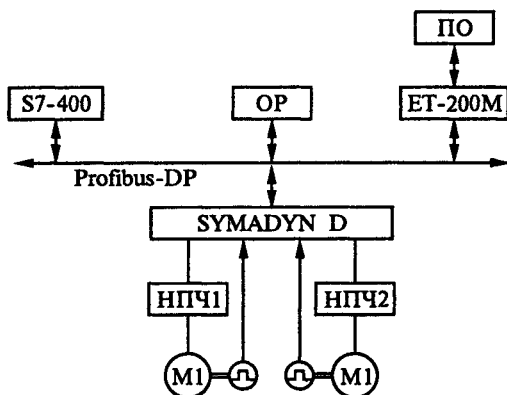


Рис. 4.47

мно-логического управления, реализованной на контроллере SIMATIC S7-400 и связанной через модули удаленного ввода-вывода ET-200 M с пультом оператора ПО типа AP и информационным терминалом (текстовая панель ОП оператора) на посту управления.

### 4.5.3. Управление кузнечно-прессовыми машинами

Функциональная схема системы управления прессом с маховичным приводом приведена на рис. 4.48, где 1 — стол, 2 — заготовка, 3 — молот, 4 — шарнир, 5 — кулисный механизм, 6 — электромагнитная муфта, 7 — маховик. Электропривод с М1 и БУ1 является главным электроприводом, а электроприводы с М2, М3, М4 и БУ2, БУ3, БУ4 — электроприводами подачи, выполняющими перемещение обрабатываемого изделия с механизмами стола относительно оси удара молота. Блок БУ5 управляет электромагнитной муфтой.

На рис. 4.49, а приведен характерный график изменения момента нагрузки на кривошипном валу в зависимости от угла поворота этого вала  $\varphi$  за цикл (от  $\varphi = 0$  до  $\varphi = 2\pi$ ). Для некоторых КПМ график нагрузки может состоять из большого числа участков вследствие чередования различных производимых операций. В большинстве случаев для КПМ график нагрузки имеет два участка, а при наличии более двух участков приводится к эквивалентному графику из двух участков.

Поскольку вследствие малости отношения  $\varphi_0/2\pi$  характер изменения  $M_c$  в пределах угла операции  $\varphi_0$  существенного значения не имеет, график нагрузки  $M_c = f(\varphi)$  может быть приведен к прямо-

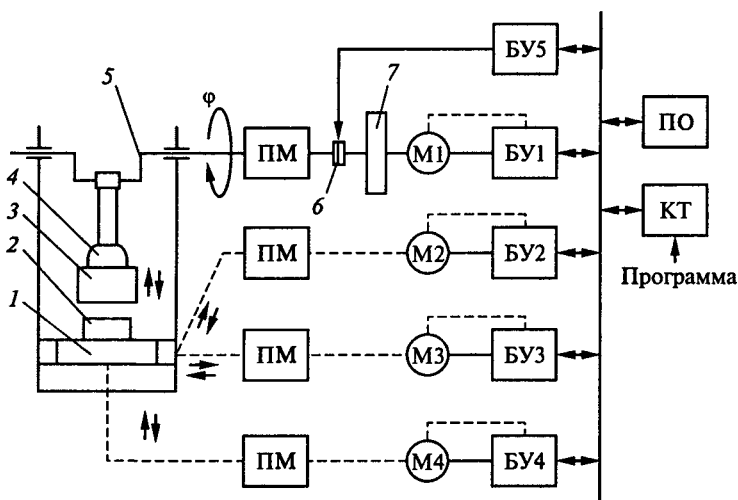


Рис. 4.48

угольному графику, изображенному на рис. 4.49, б. При этом  $M_{\text{ср}}$  является средним моментом в пределах  $\varphi_0$ .

При отсутствии маховика в таком приводе график момента двигателя должен по форме повторять график нагрузки и его мощность должна быть выбрана из условия обеспечения  $M_{\text{сmax}}$ . Поскольку  $M_{\text{сmax}} \gg M_{\text{сх}}$ , двигатель не полностью используется по нагреванию и работа его сопровождается колебаниями скорости и резкими изменениями момента и тока.

Для устранения нежелательных для двигателя и сети изменений момента и тока, а также снижения мощности в приводе устанавливается маховик, обеспечивающий уменьшение колебаний нагрузки и скорости. Являясь аккумулятором кинетической энергии, маховик при повышении нагрузки вследствие снижения скорости отдает часть накопленной при холостом ходе энергии, чем обеспечивает выполнение рабочей операции. Момент двигателя повышается незначительно, изменение тока существенно снижается, а колебания скорости привода и машины в целом уменьшаются.

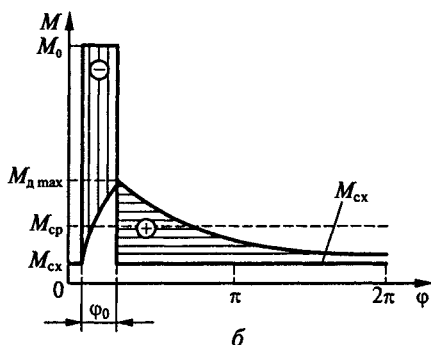
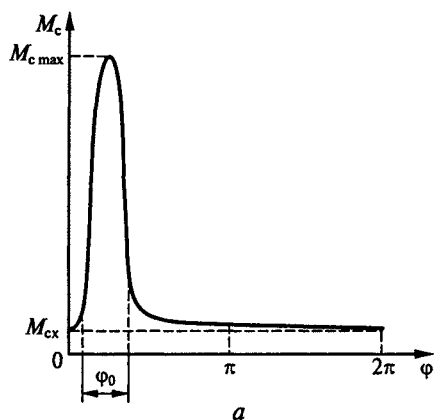


Рис. 4.49

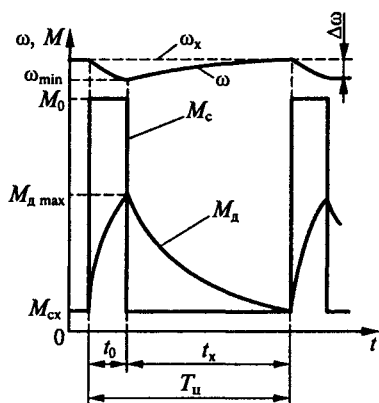


Рис. 4.50

Заштрихованная площадь графика  $M_c = f(\varphi)$  на рис. 4.49, б со знаком «-» соответствует энергии, отдаваемой маховиком при выполнении рабочей операции, а со знаком «+» — энергии, запасаемой при разгоне привода двигателем в период холостого хода.

Достигаемое при этом существенное уменьшение момента  $M_{d\max}$  по сравнению с безмаховиковым приводом позволяет снизить установленную мощность двигателя для большинства КПМ в 5... 15 раз, а в некоторых случаях и больше. Увеличение момента инерции

маховика приводит к снижению колебаний скорости и мощности двигателя.

Поскольку в механических КПМ маховик является узлом машины, т. е. размеры его ограничены конструктивными возможностями, а частота вращения определяется кинематикой и прочностными показателями материала маховика, то выбор системы «двигатель — маховик» может дать множество сочетаний для мощности двигателя и момента инерции маховика.

Оптимальное решение получается после расчета, основанного на наилучшем использовании двигателя по нагреванию, обеспечению допустимых колебаний скорости привода от  $\omega_x$  до  $\omega_{\min}$  и получению наименьших эксплуатационных затрат на машину в целом.

Приводам с оптимальными параметрами (мощностью  $P_d$ , скольжением  $s_n$ , моментом инерции  $J_0$ ) свойственны такие зависимости  $M_d = f_1(t)$  и  $\omega = f_2(t)$ , при которых за время  $t_x$  скорость и момент двигателя достигают значений скорости и момента холостого хода к началу следующего цикла (рис. 4.50).

## 4.6. Состав и свойства систем управления резательным оборудованием

### 4.6.1. Характеристика оборудования и электроприводов

Резательное оборудование в виде разнообразных ножниц, пил и станков используется в технологических комплексах пищевых, бумаго- и картоноделательных, деревообрабатывающих, металлургических и других производств. Наиболее широкое распространение и многообразие резательного оборудования имеется в прокатном производстве.



В прокатном производстве оборудование для резки металла (ножницы и пилы) относится к вспомогательной группе машин и механизмов, осуществляющей после получения проката заданной формы функции формирования готовой продукции (резки металла заданной длины, правки, укладки в пакеты и т.д.).

В зависимости от требований технологического процесса возможно резание в стационарном положении проката или при его движении. Ножницы и пилы оснащаются системами автоматизации, выполняющими следующие функции:

установка проката для резания на мерные длины в стационарном положении (безупорная или с передвижным упором с учетом температурного коэффициента расширения горячего металла);

резание на мерные длины движущегося проката (летучие ножницы и пилы);

регулирование скорости подачи дисковой пилы в зависимости от загрузки привода вращения диска, свойств материала диска и проката;

позиционное управление несколькими пилами для одновременного резания проката на мерные длины в стационарном положении.

Ножницы применяют для поперечного и продольного резания металла. Для резания горячего металла прямоугольного и квадратного сечения на мерные длины и для обрезания переднего и заднего концов его после прокатки на блюмингах, слябингах, заготовочных и сортовых станах применяют ножницы с параллельными ножами двух типов: с верхним резом, когда резание производится при движении верхнего ножа, и с нижним резом, когда резание происходит при движении нижнего ножа.

Ножницы с верхним резом более просты по конструкции, но имеют существенные недостатки: заусеницы, образующиеся на нижней кромке металла, мешают его продвижению по рольгангу, а отрезаемая часть металла вместе с ножом опускается ниже уровня рольганга, поэтому ножницы должны быть снабжены подъемно-качающимся столом.

Ножницы с нижним резом получили большое распространение для резания блюмов, слябов и сортового металла высотой более 30...60 мм.

Для резания проката небольшой ширины сечения (круг, квадрат и т.д.) применяют параллельные ножи, для резания листового проката один из ножей устанавливают наклонно (гильотинные ножницы). Угол наклона ножа (угол реза) обычно не превышает  $6^\circ$  (меньший угол обеспечивает лучшее качество резания, но большее усилие резания). Ножницы с наклонным ножом (рис. 4.51) состоят из горизонтального нижнего ножа 1 и наклонного верхнего ножа 2, имеющего привод от двигателя 6, снабженного ма-

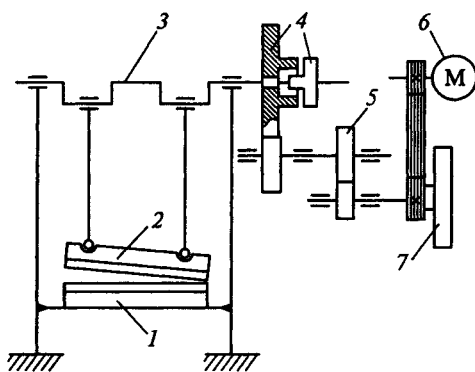


Рис. 4.51

ховиком 7, через редуктор 5, муфту сцепления 4 и коленчатый вал 3. Ножницы предназначаются для поперечного резания горячего и холодного листа, а также мелкого сортового проката пачками.

На рис. 4.52 приведена схема резания металла с нижним неподвижным ножом 1 и верхним подвижным наклонным ножом 2. Ножи имеют регулируемый боковой зазор  $\delta$ , определяемый сечением металла 3 и его свойствами. Отрезаемая часть металла смещается вместе с подвижным верхним ножом с помощью подъемно-качающегося стола (качающегося рольганга). Процесс резания обеспечивается возвратно-поступательным движением верхнего ножа при полном обороте кривошипного (эксцентрикового) вала привода ножниц. При увеличении ширины листа верхний нож должен делать больший ход, что требует увеличения эксцентриситета приводного эксцентрикового вала и, следовательно, момента резания. Этого недостатка лишены ножницы с катящимся резом, подвижный нож которых имеет дугобразную форму и сложное движение, обеспечивающее малый угол резания при небольшой дуге врезания в металл. На рис. 4.53 приведена кинематическая схема механизма резания ножниц с катящимся резом конструкции КО ВНИИ-МЕТМАШ. Эксцентриковый вал при резе поворачивается из положения 1 в положение 2 или обратно (при этом также происходит резание). Ножницы приве-

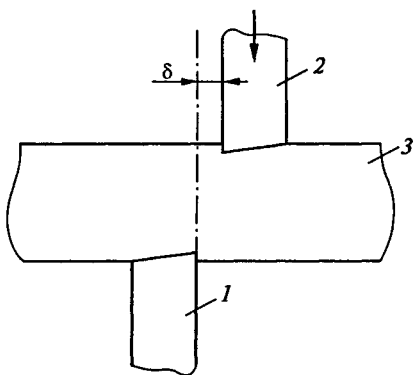
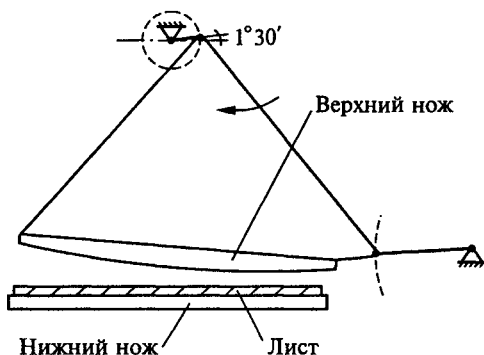


Рис. 4.52

Суппорт в исходном положении 1



Суппорт в исходном положении 2

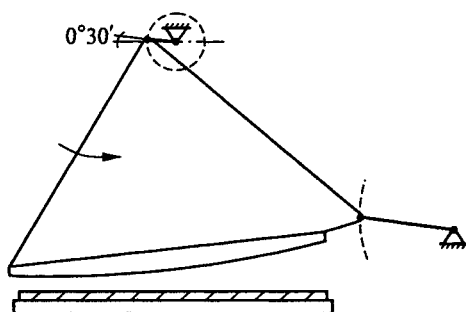
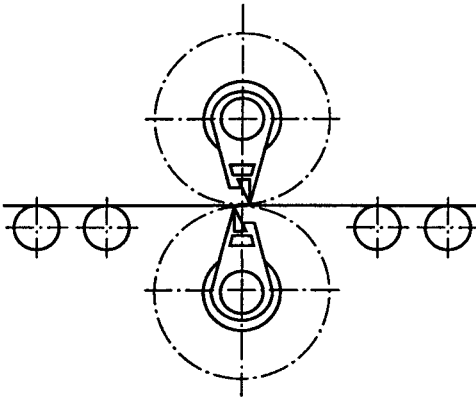


Рис. 4.53

денной конструкции применяются для поперечного резания листов, а также для продольного резания боковых кромок листов (сдвоенные кромкообрезные ножницы) на толстолистовых прокатных станах с толщиной листов 8...50 мм. Сдвоенные кромкообрезные ножницы (комплект неподвижных и подвижных ножей) можно настраивать на заданную ширину резания листов с автоматической шаговой подачей листа на рез (шаг подачи листа определяется длиной режущей кромки ножей).

Существуют барабанные летучие ножницы (рис. 4.54), применяющиеся для резания движущегося тонкого листа или мелкого сортового металла. Недостатком этого типа ножниц является непараллельность режущих кромок при резании, отражающаяся на качестве поверхности разреза. Поэтому при резании толстых листов применяют кривошипные летучие ножницы с поступательно-движущимися ножами.

При поперечном резании горячего и холодного проката на мерные длины (заготовки, готовые профили сложной формы) ис-



пользуют пилы, вращающийся пильный диск которых с помощью механизма подачи совершает возвратно-поступательное или качательное движение при резании. Используются салазковые, рычажные, маятниковые механизмы подачи. Пильный диск имеет отдельный привод, скорость которого устанавливают исходя из требования оптимального режима резания с учетом подачи, характеристик проката и свойств материала пильного диска.

В отечественной практике для резания горячего проката используют высокопроизводительные роторные пилы (рис. 4.55). Механизм подачи (водило) 2 за время резания проката 1 совершает полный оборот с остановкой в исходном положении. Вращение пильному диску 3 передается от отдельного двигателя, расположенного на оси вращения водила, через клиноременную передачу. Роторная пила закрыта кожухом 4.

Усилие резания для ножниц с параллельными ножами, работающими с прижимом,

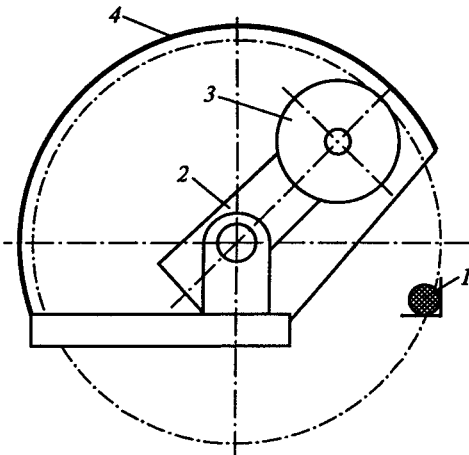


Рис. 4.55

$$F = \tau S, \quad (4.83)$$

где  $\tau$  — удельное сопротивление резанию, отнесенное ко всему поперечному сечению и зависящее от относительной глубины резания, МПа/мм<sup>2</sup>;  $S$  — площадь поперечного сечения разрезаемого металла, мм<sup>2</sup>.

Аналогично определяется усилие резания для ножниц с наклонным ножом, но в этом случае вместо площади поперечного сечения необходимо подставлять значение площади действительного среза.

Статический момент на валу двигателя в зависимости от усилия  $F$  и угла поворота кривошипа  $\alpha$  можно определить по формуле

$$M_c = \frac{1}{\eta i} Fr \sin \alpha, \quad (4.84)$$

где  $\eta$  и  $i$  — соответственно КПД и коэффициент редукции передаточного механизма;  $r$  — радиус кривошипа.

В ножницах с относительно небольшим усилием резания применяют маховичный электропривод, позволяющий снизить мощность приводного двигателя (см. рис. 4.51). Двигатель с маховиком 7 вращается непрерывно. Привод соединяется с механизмом через муфту сцепления 4. Во время паузы между резаниями муфта сцепления отключена. Перед резанием муфта включается, ножницы приходят в движение, производится резание, после чего муфта вновь отключается и ножницы останавливаются.

Для резания заготовок больших сечений (блюмов, слябов и т.д.) применяют ножницы с приводом, работающим в режиме запуска на каждый рез. Эти ножницы могут быть с редукторным или безредукторным приводом и работают с большой частотой включений в 1 ч, достигающей 600 и более. У ножниц с редукторным приводом очень важно использовать в процессе резания запас кинетической энергии, а следовательно, важна скорость в момент резания. Поэтому разгон до максимальной скорости за минимальное время при том же нагревании двигателя.

При резании металла максимальной толщины вал ножниц совершает полный оборот (круговой режим). При резании металла меньшей толщины в целях сокращения времени цикла кривошипный вал ножниц совершает меньше одного оборота за цикл с изменением направления вращения от цикла к циклу (качательный режим).

Электропривод ножниц для лучшего использования запаса кинетической энергии вращающихся частей должен иметь достаточно мягкую механическую характеристику, а также упорную характеристику (экскаваторную).

Для маховичного электропривода ножниц обычно применяются АД с повышенным скольжением. Возможна также реализация

подобного режима средствами управления в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе.

Часто для снижения момента инерции применяют два приводных электродвигателя, действующих на общий вал. Суммарная мощность двигателей в зависимости от типа ножниц, передаточного отношения от вала двигателя к валу механизма и других факторов колеблется от сотен до двух тысяч киловатт.

#### 4.6.2. Система управления ножницами с катящимся резом

Ножницы с катящимся резом служат для обрезки концов и поперечного резания на мерные длины листов, поступающих от клетки толстолистового прокатного стана. Механизм катящегося реза ножниц работает следующим образом. Подвижный суппорт 1 (рис. 4.56) ножниц с верхним ножом 2, имеющим дугообразную режущую кромку, совершает качательное движение с помощью коромысла 3 и эксцентрикового вала 4, приводимого в движение через суммирующий редуктор 5 от двух асинхронных двигателей 6 с короткозамкнутым ротором мощностью по 400 кВт. Нижний нож 9 закреплен на станине. Для контроля углового положения эксцентрика предусмотрен импульсный датчик 8. Эксцентриковый вал

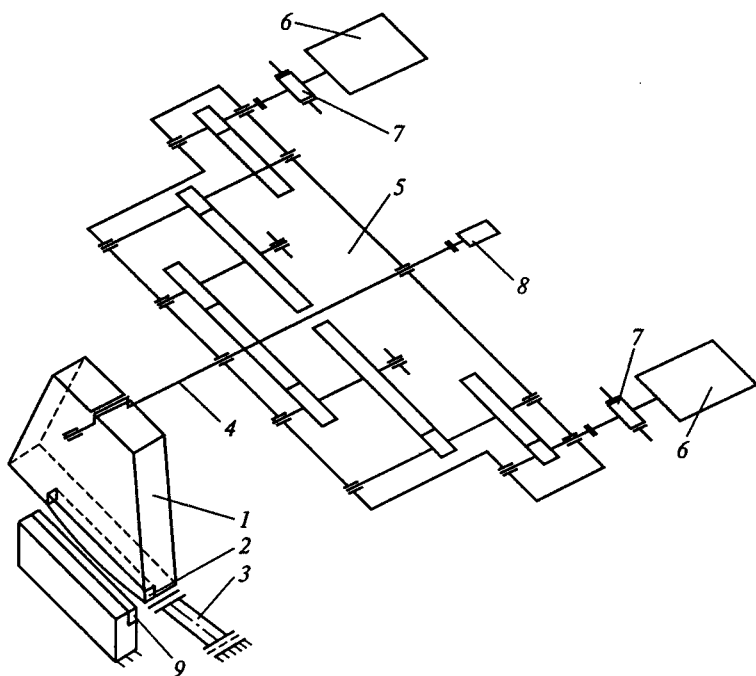


Рис. 4.56

поворачивается при резании на угол примерно  $200^\circ$  «вперед» из одного исходного положения в другое, а затем обратно для следующего резания после подачи листа на рез. Для фиксации эксцентрикового вала в исходных положениях предусмотрена установка электромагнитных тормозов 7.

Управление электроприводом механизма резания осуществляется от двух комплектных частотно-регулируемых преобразователей AB1 и AB2 Simovert Master Drives фирмы «Siemens» (рис. 4.57).

Электропривод обеспечивает:

выравнивание моментов с точностью 10 % при синхронной работе двух двигателей M1 и M2 по схеме электроприводов «ведущий—ведомый», связанных по сети Simolink волоконно-оптическим кабелем;

позиционное регулирование с установкой вала эксцентрика переменного в первое или второе исходное положение при каждом резе (реализуется с помощью стандартной программы для технологического модуля T300); в качестве реперной метки начала отсчета координаты используется нулевой импульс датчика BR в крайнем нижнем положении эксцентрика;

управление тормозными электромагнитами для фиксации суппорта ножниц в исходном положении (реле 1KV и 2KV).

Генераторное торможение двигателей осуществляется с рекуперацией энергии в сеть переменного тока. При этом закрывается трехфазный выпрямительный мост с тиристорами, работаю-

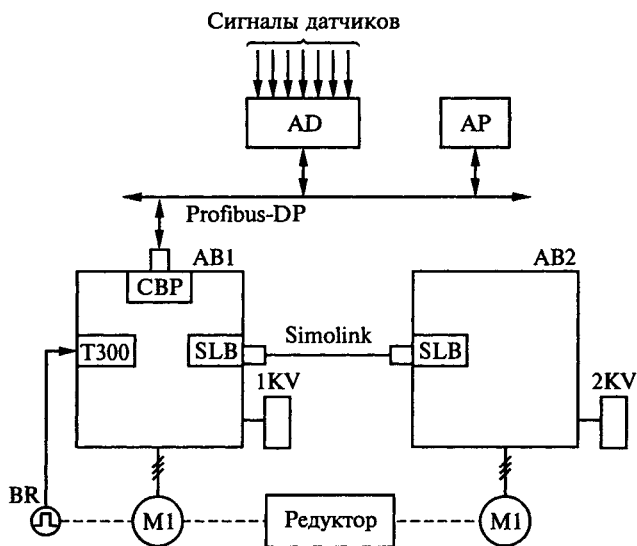


Рис. 4.57

щими в режиме ключей, и открывается инверторный мост с автотрансформатором, повышающим напряжение от ЭДС двигателя на 20 % для компенсации потерь в цепи при рекуперации энергии.

Ведущий электропривод АВ1 получает задание по сети Profibus-DP от контроллера АД участка ножниц SIMATIC S7-400, причем задание формируется в программе по сигналу пульта оператора АР с учетом разрешающих сигналов блокировок:

при зажатом положении верхней и нижней кассет с ножами и наличии давления масла в редукторе привода (сигналы реле давления и электроконтактного манометра);

при остановленных рольгангах у ножниц;

при нахождении тележки уборки обреза под ножницами (сигнал датчика исходного положения тележки).

Пульт оператора имеет модули расширения (удаленного ввода-вывода) контроллера и связан с ним по сети Profibus-DP.

### 4.6.3. Система управления летучими ножницами

Летучие ножницы, предназначенные для резания движущегося проката (полос, заготовок), имеют рабочий орган, выполненный в виде двух барабанов или рычажных механизмов, снабженных синхронно вращающимися ножами (см. рис. 4.54).

Электропривод летучих ножниц, как правило, выполняется позиционным с обработкой рассогласования положения ножей и требуемого положения реза на прокате за период вращения ножей с обеспечением условия согласования горизонтальной составляющей скорости ножей и линейной скорости проката. Схема позиционного электропривода

постоянного тока с аналоговыми регуляторами тока, скорости в блоке БУС и цифровым регулятором положения РП с аналоговым выходом приведена на рис. 4.58.

При позиционировании ножей летучих ножниц используются варианты алгоритмов управления, осуществляющих оптимизацию по условиям минимизации динамических моментов, тепловых потерь в двигателе, времени отработки рассогласования или времени работы с заданными динамическими моментами.

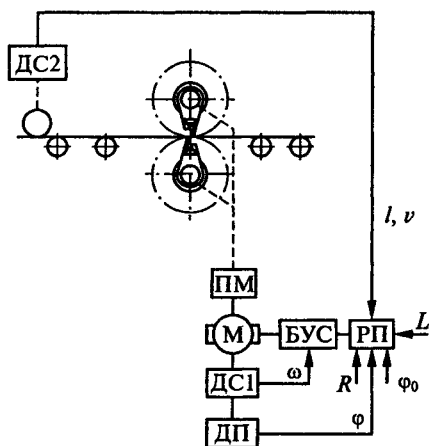


Рис. 4.58



Соответствующие законы управления электроприводом, приведенные ниже, формируются в зависимости от следующих параметров объекта управления:  $l$  — текущего значения длины проката от начала отсчета;  $L^*$  — заданного значения мерной длины проката;  $L_0$  — длины окружности вращения ножей с радиусом  $R$ ;  $v$  — линейной скорости проката;  $i$  — передаточного числа редуктора привода;  $\varphi$  — текущего углового положения исполнительного органа (ножей);  $\varphi_0$  — угла начала резания, определяемого высотой сечения проката;  $\omega$ ,  $\varepsilon$  — текущих значений соответственно угловой скорости и ускорения исполнительного органа;  $\omega_0$  — «синхронного» значения угловой скорости ножей (при равенстве окружных скоростей ножей и проката);  $J$  — суммарного момента инерции на валу привода;  $M$  — момента электродвигателя.

**Позиционный электропривод при постоянном ускорении (замедлении)  $\varepsilon = \text{const}$ .** Отработка рассогласования между положением исполнительного органа и заданной точкой встречи с прокатом, определяемой мерной длиной  $L$ , начинается при  $\varphi > \varphi_0$  и происходит по треугольному или трапецеидальному графику с остановкой, определяемой средним значением скорости

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{2v(\pi - \varphi_0)}{L}, \quad (4.85)$$

где  $L = L^* - 2R \sin \varphi$  — путь, проходимый прокатом за время свободного вращения исполнительного органа.

Варианты отработки рассогласования приведены на рис. 4.59.

В зоне контакта с прокатом  $-\varphi_0 \dots 0 \dots +\varphi_0$  задание скорости должно меняться по закону

$$\omega_3 = k\omega_0 / \cos \mu,$$

где  $k = 1 \dots 1,1$  коэффициент обгона, определяемый динамическим падением скорости при нагрузке.

До момента контакта с прокатом производится разгон привода до скорости  $\omega = k\omega_0 / \cos \varphi_0$ , после выхода из зоны контакта с про-

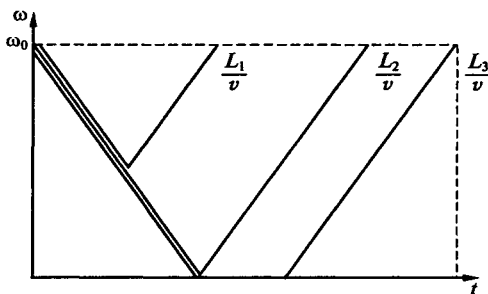
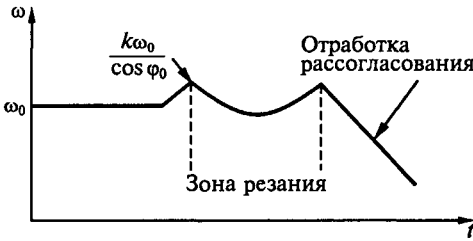


Рис. 4.59



катом начинается отработка рассогласования для следующей заданной мерной длины (рис. 4.60).

**Позиционный электропривод при  $\varepsilon = \text{const}$  и минимальном изменении скорости в процессе отработки рассогласования.** По этому условию скорость задается следующим образом (отработка по трапецеидальному графику, рис. 4.61):

$$\omega_3 = \frac{v}{R} - \frac{\varepsilon L}{2v} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon L}{2v}\right)^2 - \frac{\varepsilon L}{R} + 2\varepsilon(\pi - \varphi_0)}, \quad (4.86)$$

**Позиционный электропривод с регулируемым ускорением (замедлением)  $\varepsilon = f(L)$ .** Отработка рассогласования осуществляется по треугольному графику при задании

$$\varepsilon = \frac{4v^2}{L} \left[ \frac{1}{R} - \frac{2}{L}(\pi - \varphi_0) \right], \quad (4.87)$$

где  $L = L^* - 2R \sin \varphi$ .

Максимальное ускорение (замедление)

$$\varepsilon_{\max} = \frac{v^2}{2R^2(\pi - \varphi_0)} \quad (4.88)$$

обеспечивает получение мерной длины

$$L_{\max}^* = L_{\max} + 2R \sin \mu_0, \quad (4.89)$$

где  $L_{\max} = 4R(\pi - \varphi_0)$ .

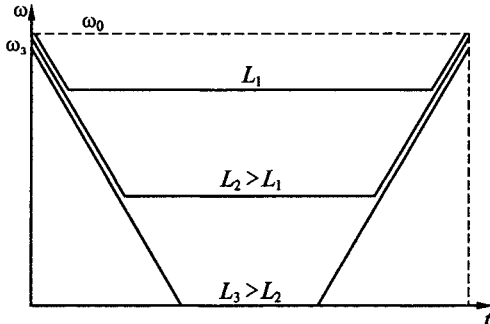
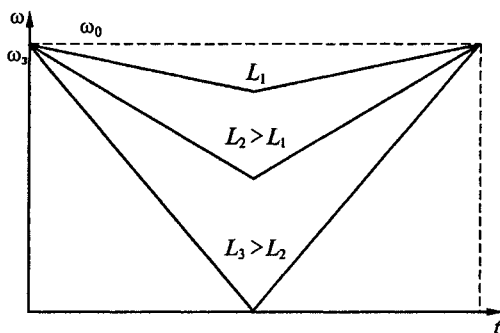


Рис. 4.62



В этом варианте возможно дополнительно снижать нагрузки при обработке рассогласования (рис. 4.62).

**Позиционный электропривод с оптимизацией по минимуму тепловых потерь в двигателе.** В этом случае применяют методы классического вариационного исчисления при минимизации функционала

$$Q = \int_0^{L/v} \varepsilon(t) dt. \quad (4.90)$$

Оптимальное ускорение описывается линейной зависимостью

$$\varepsilon_{\text{опт}} = a_1 + 2a_2t, \quad (4.91)$$

а оптимальная скорость обработки рассогласования

$$\omega_{\text{опт}} = a_0 + a_1t + a_2t^2, \quad (4.92)$$

где коэффициенты  $a_0$ ,  $a_1$  и  $a_2$  определяются из граничных условий скорости и пути обработки рассогласования.

Оптимальное управление редко используют из-за относительной сложности реализации и значительных динамических нагрузок.

#### 4.6.4. Система управления барабанными ножницами для поперечного резания картона

Барабанные ножницы для поперечного резания картона предназначены для работы в составе непрерывной линии по производству картона. Рассмотрим линию производства трехслойного гофрокартона (рис. 4.63).

Технологический процесс начинается с подачи верхнего и среднего слоев картона с раскатов 1 в гофрирующий пресс 2. Клееносыящий вал гофрпресса осуществляет склеивание среднего гофрированного слоя с верхним. Нижний слой картона подается по направляющим валикам к клееносыящему валу 3, где приклеи-

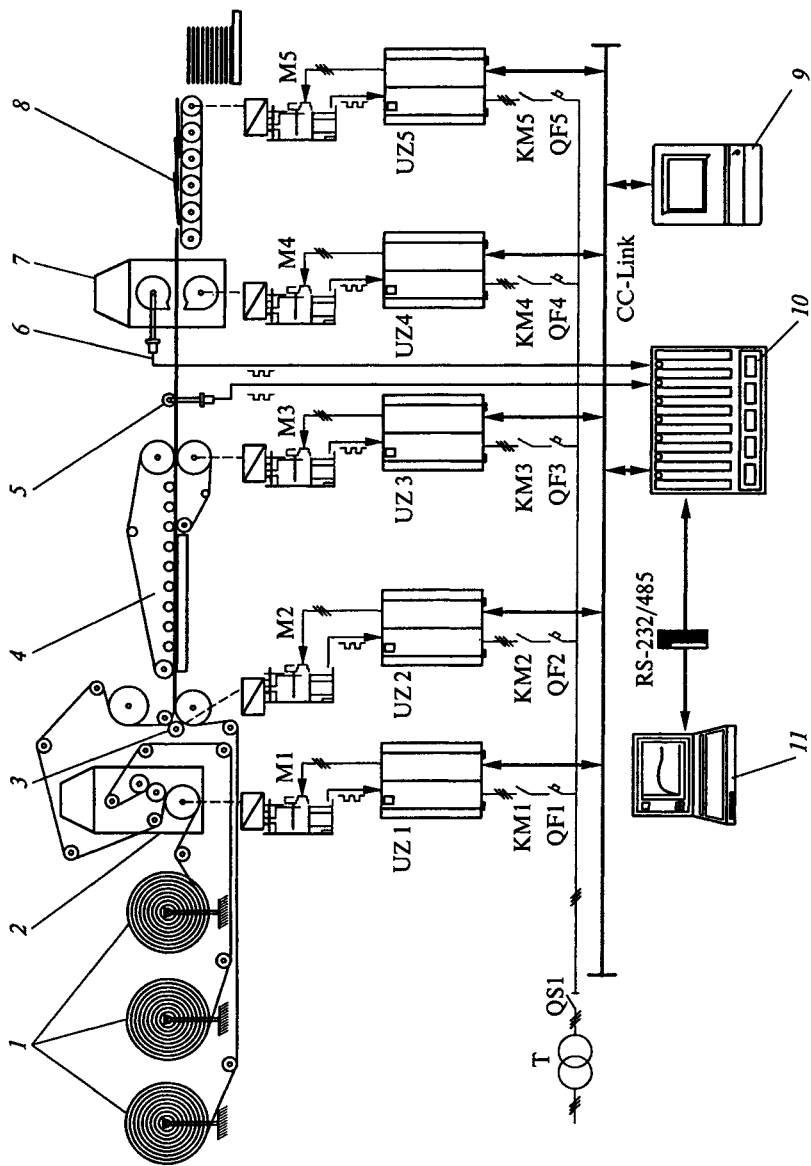


Рис. 4.63

вается к среднему слою. На сушильном столе 4 склеенное полотно сушится, после чего поступает на станок поперечного резания (СПР) 7, где осуществляется его подвод к ножевым валам станка и резание на заданные форматы. Ножевые валы СПР функционируют по принципу летучих ножниц. Отрезанные листы гофрокартона попадают на приемное устройство 8.

Скорость современных непрерывно-поточных гофролиний достигает 300...400 м/мин. Диапазон изменения формата отрезаемых листов обычно составляет 1 : 5, а отклонение отрезаемого формата от заданного не должно превышать  $\pm 1$  мм. Пределы задания и точность резания потребительских форматов определяются динамическими характеристиками системы управления электроприводом ножевых валов СПР и особенностями механической конструкции станка.

На рис. 4.63 приведен пример реализации системы автоматического управления линией гофрокартона на базе комплектных электроприводов переменного тока и компьютерных средств автоматизации фирмы «Mitsubishi Electric».

Комплектные электроприводы секций состоят из преобразователей частоты UZ1...UZ5 Mitsubishi FR-A 540 и асинхронных электродвигателей M1...M5 с импульсными датчиками скорости (энкодерами). Алгоритмы управления процессом резания и скоростями электроприводов реализуются на программируемом контроллере 10 Mitsubishi A2SH.

Для обеспечения работы системы автоматического управления электроприводом ножевых валов СПР на измерительном колесе, расположенном после сушильного стола, установлен датчик координаты и скорости полотна 5, а на оси одного из ножевых валов установлен датчик координаты и скорости ножа 6.

Человеко-машинный интерфейс системы управления представлен постом оператора 9 Mitsubishi MAC-E700, на котором осуществляются задания скорости линии, опережения приводов линии относительно сушильной секции, форматов отрезанных листов, а также индикация скоростей и нагрузок приводов линии, фактического формата отрезанного листа, количества листов, попавших в допустимый диапазон ошибки резания, и не попавших при заданном формате, индикация рабочих режимов и состояния механизмов линии, отображение аварийных сообщений.

Для связи между программируемым контроллером, электроприводами и постом оператора используется промышленная сеть CC-Link.

Программирование системы, настройка и визуализация переходных процессов при регулировании технологических переменных в процессе резания полотна картона осуществляются с пульта инженера 11, представляющего собой портативный компьютер со специализированным программным обеспечением.

Система управления гофролинией (рис. 4.64) включает в себя систему последовательного ведения приводов линии по скорости и систему управления СПР. На рис. 4.64 приняты следующие обозначения: 1 — гофрпресс; 2 — клеенаносящий вал; 3 — сушильный стол; 4 — измеритель полотна; 5 — ножевые валы; 6 — приемное устройство.

Система последовательного ведения предназначена для автоматического согласования скоростей регулируемых приводов линии в процессе технологических изменений рабочей скорости и в режимах пуска и останова линии. Задание скорости линии осуществляется в блоке БЗ заданием скорости ведущего привода сушильного стола 3. Для приводов, входящих в состав цепи последовательного ведения, задается опережение относительно предыдущей секции в пределах  $\pm 10\%$  с точностью  $0,01\%$ . Диапазоны задания скорости и опережения — настраиваемые. Расчет и задание опережения приводов линии производятся в блоке последовательного ведения БПВ. Информация о суммарном задании скорости и опережения каждого привода поступает на вход контура скорости преобразователя частоты FR-A540. Применение векторного управления и импульсного датчика ИД в цепи обратной связи по скорости обеспечивает поддержание заданной скорости приводов с точностью  $\pm 0,01\%$  в статическом режиме работы, а также высокую динамику приводов линии в переходных режимах.

Система управления СПР реализует алгоритмы управления движением ножевых валов для обеспечения точного резания картонного полотна на заданные форматы.

Обеспечение точного резания возможно при выполнении двух кинематических условий: совпадение начала режущей кромки ножа с заданной границей отрезаемого полотна; во время резания линейные скорости кромки ножа и полотна должны находиться в заданном соотношении

$$v_n = k_v v_{п}, \quad (4.93)$$

где  $k_v$  — коэффициент превышения скорости ( $k_v = 1,02 \dots 1,07$ ).

Поскольку резание происходит при каждом обороте ножей, то для обеспечения заданной длины отрезаемого полотна движение ножей от момента предыдущего реза до последующего должно происходить неравномерно, с замедлениями и ускорениями в зависимости от требуемого формата.

Система управления электроприводом станка решает две основные задачи: расчет заданных значений положения, скорости, ускорения ножа в зависимости от координаты картонного полотна; расчет управляющего воздействия на контур скорости электропривода ножевых валов.

При выполнении первой задачи необходимо выбрать такой закон регулирования координат ножа, чтобы максимально облегчить

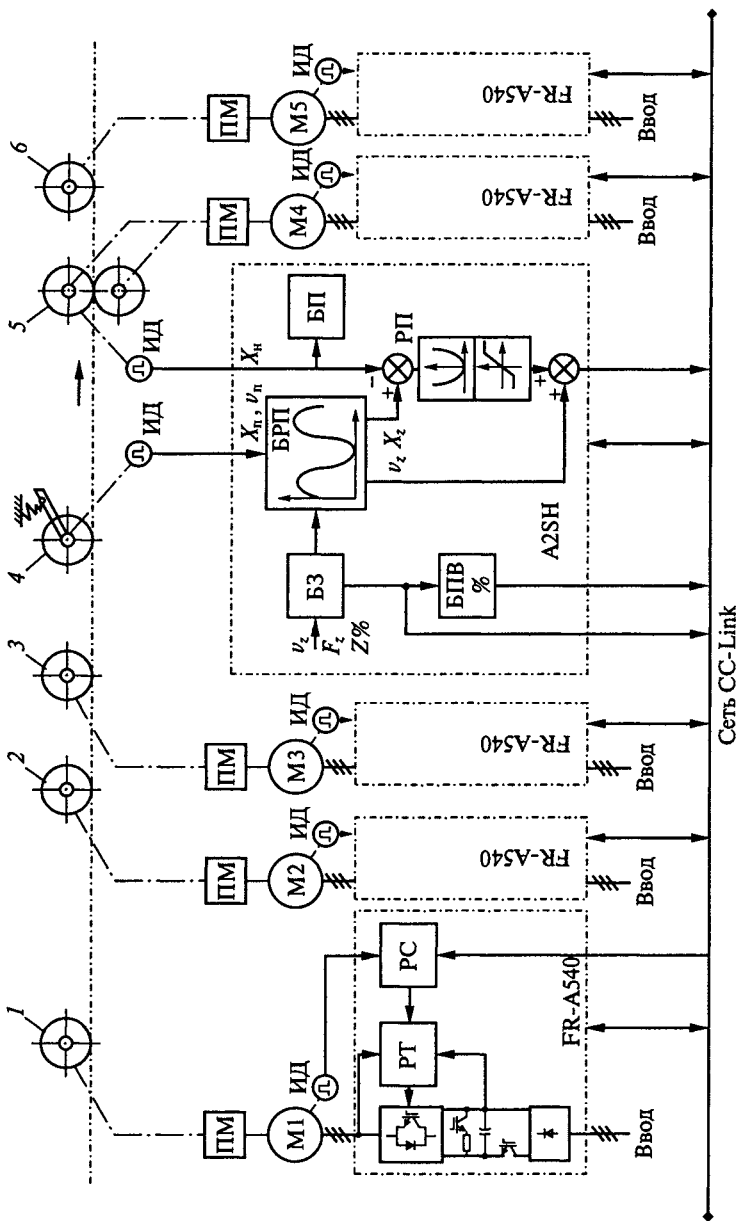


Рис. 4.64

работу регулятора положения РП ножа на момент выполнения резания и обеспечить более мягкий режим работы механической части электропривода. Для этого путь ножа за цикл работы (один оборот) делят на зоны регулирования и синхронизации. В зоне регулирования изменяется скорость ножа, в зоне синхронизации скорость ножа поддерживается постоянной, определяемой по условию (4.93), а кромка полотна синхронизируется с положением ножа. Резание полотна происходит в зоне синхронизации. При этом одну часть зоны синхронизации нож проходит перед моментом резания, после него следует вторая часть зоны синхронизации.

Размер зоны синхронизации до реза выбирают в зависимости от длительности переходной характеристики регулятора положения ножа; размер зоны синхронизации после момента резания определяется временем, необходимым для выполнения расчетов, определяющих параметры следующего момента резания.

Расчет координат ножа в начале и в конце зоны регулирования обеспечивается условием синхронизации скорости ножа со скоростью полотна по соотношению (4.93).

Выполнение этого условия при движении ножа в зоне регулирования позволяет входить в зону синхронизации с минимальными отклонениями положения и скорости. В качестве расчетной базы в зоне регулирования выбран закон, определяющий координату положения ножа  $X_z$  и его скорость  $v_z$  в зависимости от текущей координаты кромки полотна  $X_n$  и его скорости  $v_n$ :

$$\begin{aligned} X_z &= X_n k_v + (L_b - k_v F_z) P X(y); \\ v_z &= v_n (k_v + (L_b - k_v F_z) \beta P v(y)), \end{aligned} \quad (4.94)$$

где  $y = \beta x$  — относительная координата полотна в зоне синхронизации;  $\beta = 1/(F_z - l_c/k_v)$ ;  $F_z$  и  $L_b$  — соответственно заданный и базовый форматы;  $l_c = v_n k_v \tau$  — длина зоны синхронизации;  $\tau$  — заданное время движения ножа в зоне синхронизации;  $P X(y)$ ,  $P v(y)$  — полиномы, удовлетворяющие граничным условиям зоны синхронизации.

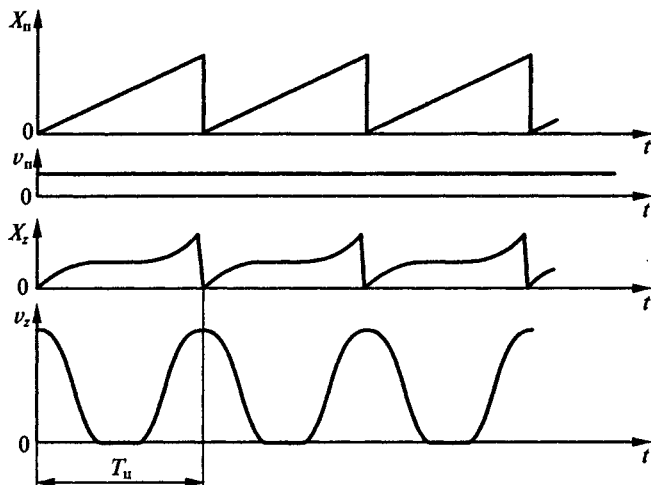
Расчет скорости и координаты ножа осуществляет блок расчета полиномов БРП. Входными величинами БРП являются значения скорости и координаты полотна, поступающие от измерителя полотна 4. На выходе БРП формируются задания на координату  $X_z$  и скорость  $v_z$  ножа.

На рис. 4.65 представлены рассчитанные задания на координату  $X_z$  и скорость  $v_z$  ножа, а также измеренная координата  $X_n$  и скорость  $v_n$  полотна для формата больше базового. За базовый формат  $L_b$  принята длина окружности, определяемая радиусом барабана с ножами.

Расчет длины отрезанного листа, а также расчет и формирование задания системе на новый цикл  $T_{ц}$ , осуществляются по сиг-



Рис. 4.65



налу от блока прерывания БП (см. рис. 4.64), на который поступает сигнал прохождения нулевой метки импульсного датчика ножевых валов, соответствующий завершению очередного цикла резания.

Система управления построена по принципу подчиненного управления с последовательной коррекцией задания. Входным сигналом регулятора положения РП является ошибка положения ножа, рассчитанная исходя из задания на положение  $X_z$  и сигнала обратной связи по координате ножа  $X_n$ . Регулятор положения РП осуществляет расчет ошибки по положению; его характеристика имеет вид пропорционального звена с квадратичной зависимостью от ошибки. Заданием скорости является сигнал с выхода регулятора положения, просуммированный с рассчитанным заданием на скорость привода ножей  $v_z$ . ПИ-регулятор скорости РС и обратная связь по скорости привода ножей реализованы в преобразователе частоты.

## 4.7. Состав и свойства систем управления горнодобывающим и нефтегазовым оборудованием

### 4.7.1. Характеристика машин для подземных и наземных разработок и их электроприводов

Горнодобывающее оборудование разнообразно по своему функциональному назначению в технологическом процессе и включает в себя как типовое для различных групп, так и специфическое оборудование, характерное только для этой группы. К первому относятся насосы, вентиляторы, компрессоры, конвейеры, подъемные машины и др.; ко второму — угольные и проходчес-

кие комбайны, разнообразные экскаваторы, буровые станки, карьерный транспорт (автомобильный, троллейвозный) и др.

Специфичность заключается: в условиях работы оборудования; как правило, в большой мощности электроприводов и их питании от временных линий электропередачи или автономных источников; в больших динамических нагрузках электроприводов и механизмов; в частой работе механизмов на упор; в необходимости обеспечения высокой надежности.

Для машин и механизмов, применяемых в подземных выработках шахт, при выборе электрооборудования необходимо учитывать наличие пыли, влаги, возможность работы во взрывоопасной атмосфере, ограничение размеров электрооборудования при одновременном требовании повышения прочности.

Добычные и проходческие комбайны применяют для разработки и проведения выработок по породам невысокой прочности, главным образом угля, сланца, калийных солей. Комбайны имеют следующие рабочие части: исполнительный орган, разрушающий горную породу; погрузочное устройство, обеспечивающее перемещение и погрузку отбитого материала на транспортное средство; подающую часть, служащую для перемещения комбайна и подачи исполнительного органа на забой.

Исполнительный орган комбайнов имеет вид барабана или шнека, на котором закрепляются резцы. В качестве исполнительного органа применяют также буровые или отбойно-резцовые коронки. У проходческих комбайнов непрерывного действия исполнительные органы выполнены в виде фрезерных дисков с резцами.

Погрузочное устройство у комбайнов имеет вид скребковой цепи с консольными скребками. Применяют также нагребающие лапы, шнеки, ковши.

Комбайны передвигаются вдоль забоя по раме конвейера, используя для перемещения тяговую цепь, закрепленную в двух концах. При перемещении комбайна цепь проходит по зубцам звездочки подающей части. Применяется также гусеничный механизм перемещения или механизм подачи, выполненный в виде гидравлических домкратов.

Добычные и проходческие комбайны выполняются многодвигательными, т. е. имеют отдельные двигатели для каждого исполнительного органа.

Требования к электрическим приводам комбайнов определяются характером процессов разрушения и отделения горной породы от забоя и ее транспортирования. Разрушение горной породы происходит в результате движения исполнительного органа, снабженного режущим инструментом, со скоростью резания  $v_p$  и его подачи на забой со скоростью подачи  $v_n$ . Толщина стружки прямо пропорциональна скорости подачи и обратно пропорциональна скорости резания.

Исследования процесса резания горных пород показали, что для определенных условий существуют оптимальные соотношения скоростей резания и подачи, обеспечивающие минимальные энергетические затраты и минимальный выход мелких фракций, что особенно важно для получения угля высокой сортности. Это характерно не только для угольных комбайнов, но и для других машин, применяемых при добыче полезных ископаемых (роторных и одноковшовых экскаваторов, драг).

Оптимальное соотношение скоростей резания и подачи даже на одном и том же пласте не остается неизменным, так как пласт большей частью неоднороден.

Нагрузка на исполнительном органе комбайна формируется под действием усилий, возникающих при резании полезного ископаемого отдельными резцами, а у комбайнов с барабанным или шнековым исполнительным органом также и в результате транспортирования отбитого полезного ископаемого. Усилия резания зависят от большого числа факторов, многие из которых носят случайный характер (сопротивляемость угля разрушению, характер распределения трещиноватости и твердых включений, неравномерность подачи, вибрации исполнительного органа и отдельных резцов и др.). Вследствие хрупкости массива процесс резания сопровождается сколом отдельных элементов различного размера, что приводит к изменению усилия резания в широких пределах. Таким образом, неоднородность механических свойств и строения горных пород является основной причиной случайного характера изменения усилий при резании.

Составляющие усилия, связанные с транспортированием и погрузкой отбитой горной породы, также носят случайный характер из-за неравномерности материала по размерам, неодинаковой интенсивности его поступления, заштыбовки исполнительного или транспортирующего органа, повторного измельчения уже отбитого материала и др.

Существенно влияет на неравномерность нагрузки исполнительного органа и характер подачи комбайна. Комбайн движется по почве или раме конвейера, поэтому сопротивление движению определяется силами трения, значения которых непостоянны. Это объясняется тем, что у комбайнов с канатной подачей канат представляет собой упругий элемент, у комбайнов с цепной подачей изменение стрелы провеса цепи и ее колебания существенно влияют на усилие подачи (ввиду большого собственного веса цепи). В момент трогания комбайна с места трение покоя заменяется трением движения, сопротивление движению падает и под действием силы упругости растянутого каната или силы натяжения цепи движение комбайна становится скачкообразным. Натяжение каната или цепи уменьшается, что приводит к остановке комбайна. По мере поворота барабана или звездочки

подающей части, канат или цепь снова натягиваются и т.д. По мере перемещения комбайна с уменьшением длины каната или натянутой части цепи подача его делается более равномерной.

У комбайнов с гусеничным механизмом перемещения скорость подачи тоже неравномерна из-за ограниченного числа зубьев ведущей звездочки, неровностей почвы и других причин.

В наземных разработках месторождений используются разнообразные экскаваторы. Для крупных разработок с высокой производительностью используются многоковшовые роторные экскаваторы. Бóльшее распространение имеют одноковшовые экскаваторы.

Современный одноковшовый экскаватор — маневренная и подвижная горная машина, предназначенная для землеройных работ на строительстве и разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. Экскаватор имеет комплект электрифицированных механизмов, рассчитанных на длительную работу в тяжелых условиях. Эти машины при ковше объемом 2,5 м<sup>3</sup> и более изготавливают в виде электрических лопат и драглайнов.

Основное отличие между экскаваторами-лопатами и драглайнов заключается в конструктивной связи ковша с рабочим оборудованием и способе экскавации грунта. Ковш лопат соединен с подвижной рукоятью, а ковш драглайнов подвешен на канатах. Драглайны оборудуются длинными направляющими стрелами, а наиболее крупные из них с ковшами объемом 6 м<sup>3</sup> и более — шагающим механизмом передвижения.

Для транспортирования полезных ископаемых используют автосамосвалы и троллейбусы, оснащенные тяговыми электроприводами. Мощность тяговых электроприводов такого транспорта может достигать 1...3 МВт. Распространены тяговые электроприводы, выполненные по схеме «синхронный генератор — выпрямитель — электродвигатель постоянного тока». Вращение синхронного генератора осуществляется от дизельного двигателя. Электродвигатель совмещается с конструктивными частями колеса и вместе с управляющими средствами выполняется в виде механотронного модуля «мотор-колесо». Основное направление совершенствования тяговых электроприводов — создание электропривода переменного тока по схеме «синхронный генератор — преобразователь частоты — бесконтактный электродвигатель переменного тока».

Для горного оборудования перспективны следующие электроприводы переменного тока:

для насосов и вентиляторов — электропривод по схеме бесконтактного асинхронно-вентильного каскада (при модернизации действующего оборудования) или с асинхронным короткозамкнутым электродвигателем и частотным управлением;

для комбайнов — электропривод с асинхронным короткозамкнутым электродвигателем специального исполнения и частотным управлением;

для подъемных машин — электропривод с низкооборотными асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями и преобразователем частоты типа циклоконвертора. Для перспективных многоконтактных подъемных машин — электропривод на базе специального (встроенного) вентильного двигателя переменного тока;

для буровых станков — электропривод с асинхронным короткозамкнутым электродвигателем и частотным управлением с преобразователем типа ШИМ-инвертора;

для автосамосвалов — электропривод на базе тяговых асинхронных или вентильных электродвигателей по схеме «мотор-колесо» специального торцевого исполнения;

для экскаваторов — электроприводы на базе асинхронного короткозамкнутого электродвигателя с частотным управлением; преобразователь частоты типа ШИМ-инвертора с обеспечением специальных тормозных режимов (активный выпрямитель).

Рассмотрим теперь особенности оборудования, основные типы и параметры электроприводов механизмов, используемых в нефтяной и газовой промышленности.

Основным потребителем электроэнергии в нефтяной и газовой промышленности является оборудование: для разведочного и эксплуатационного бурения нефтяных и газовых скважин (буровые установки); для добычи нефти и газа (насосные и компрессорные установки, электрообезвоживающие и электрообессоливающие установки); для транспортирования нефти и газа.

Общая характеристика основных механизмов приведена в табл. 4.2 [48].

Наиболее сложные и разнообразные системы электропривода в нефтяной и газовой промышленности характерны для буровых установок, выполняющих бурение скважин глубиной от нескольких сот метров до 5...6 тыс. м и более.

Электрооборудование буровой установки размещается на открытой площадке или в неотапливаемых помещениях временного типа (климатические исполнения — У, ХЛ; категории размещения — 1 и 2). Длительность использования основных механизмов в рабочих режимах до 2500 ч в год. Периодически проводятся демонтаж, транспортирование и монтаж оборудования в составе крупных блоков механического оборудования или по агрегатно.

С целью разведки и освоения нефтяных и газовых месторождений в пределах морских акваторий и на шельфе применяют специализированные стационарные и мобильные буровые установки для морского бурения с автономным электропитанием электроприводов исполнительных механизмов.

В соответствии с международными соглашениями в определенной зоне, находящейся рядом с устьем скважины, на морских

Таблица 4.2

Оборудование	Вид механизма	Режим работы электропривода (см. п. 1.5)	Установленная мощность электроприводов, кВт
Механизмы для бурения скважин	Буровая лебедка	S4	250... 2900
	Буровой насос	S1	320... 1200
	Роторный стол	S1	75... 400
	Вспомогательные механизмы	S1, S2, S3	1... 75
	Электробур	S1	76... 230
Механизмы для насосной эксплуатации скважин	Глубинно-насосные штанговые установки	S6	1,7... 55
	Погружные бесштанговые насосы	S1	10... 95
	Установки для депарафинизации скважин	S1	1,7... 10
Механизмы для компрессорной и фонтанной эксплуатации	Компрессорные станции	S1	100... 280
	Насосные станции внутрипромысловый перекачки	S6	20... 140
	Установки для закачки воды в пласт	S1	250... 1000
Установки для внутрипромысловой обработки нефти	Установки для обезвоживания нефти	S1	2... 300 кВт · А
	Установки для обессоливания нефти	S1	2... 300 кВт · А
Установки для транспортировки нефти и газа	Компрессорные станции	S1	4000... 4500
	Насосные станции (главные насосы)	S1	1250... 8000
	То же (подпорные насосы)	S1	800... 1600

буровых установках устанавливают взрывозащищенное электрооборудование. На электрооборудование, обеспечивающее «живучесть» плавучих установок, полностью распространяются правила Морского Регистра, на остальное электрооборудование, обеспечивающее работоспособность технологического оборудования, эти правила распространяются частично (монтаж, заземление, покрытия и т. п.).

#### 4.7.2. Системы управления экскаваторами типа «прямая лопата» и драглайн

В состав механического оборудования экскаватора типа «прямая лопата» (далее экскаватор-лопата или просто лопата) (рис. 4.66) входят: рабочее оборудование, поворотная платформа 4 и ходовая тележка 3. Рабочее оборудование включает в себя стрелу 5, рукоять 2 с ковшом 1 и механизм открывания днища ковша. Механизм передвижения экскаватора расположен на ходовой тележке.

Экскаватор питается переменным трехфазным током от карьерной или строительной сети электроснабжения. Через кольцевой токоприемник электроэнергия передается в высоковольтный распределительный шкаф, расположенный на поворотной платформе.

Повышение производительности экскаватора и снижение динамических перегрузок в механизмах достигнуто применением электроприводов постоянного тока по системе ТП-Д (тиристорный преобразователь — двигатель [17]). На рис. 4.66 обозначены: ПП — приемный пункт; К — кабель гибкий; КТП — кольцевой токоприемник; КРУ — комплектное распределительное устройство; Т1 и Т2 — главный и вспомогательный трансформаторы; КТУ-П, КТУ-Н и КТУ-В/Х — соответственно комплектные тиристорные устройства электроприводов подъема, напора и поворота (вращения)/хода; КЗА — коммутационно-защитная аппаратура; МП, МН, МВ и МХ — электроприводы подъема, напора, поворота и хода соответственно.

В электрической схеме главных электроприводов использован пятиобмоточный силовой трансформатор Т1. Группа двигателей каждого из главных механизмов получает питание от соответствующего комплектного тиристорного преобразователя (КТУ), все силовые ТП — реверсивные. Электродвигатели хода подключаются контакторами к преобразователю привода поворота, когда последний не работает. Управление всеми электроприводами осуществляет машинист экскаватора с пульта управления, который включает в себя аппаратуру ручного управления и информационно-диагностические средства.

Рабочее оборудование шагающих драглайнов (рис. 4.67) содержит стрелу 1, ковш 3, подъемный 2 и тяговый 4 канаты, соединенные с соответствующими лебедками через головной блок и блок наводки. Разгрузка ковша осуществляется его опрокидыванием с помощью разгрузочного каната 5. Основное и вспомогательное механическое и электрическое оборудование расположено на вращающейся платформе 7, где смонтирован механизм передвижения с двумя опорными лыжами 6.

Подвод электрической энергии к платформе экскаватора выполнен аналогично подводу у экскаваторов-лопат. Электротехническое оборудование управления сосредоточено в шкафах и на

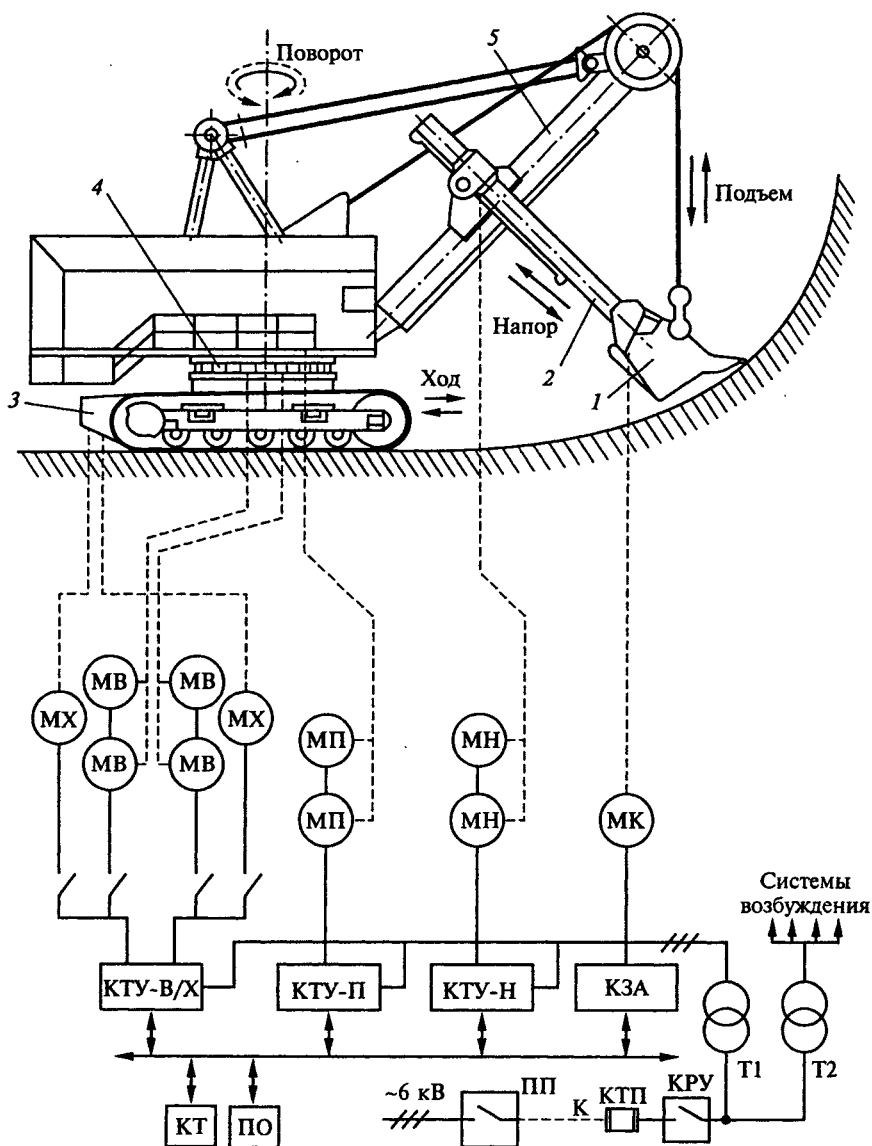


Рис. 4.66

пульты, установленных в кузове экскаватора и частично — в кабине машиниста.

Электрооборудование экскаваторов отличается специфичностью, большим разнообразием и значительной концентрацией мощностей. Так, на платформе экскаватора сосредоточены: группа



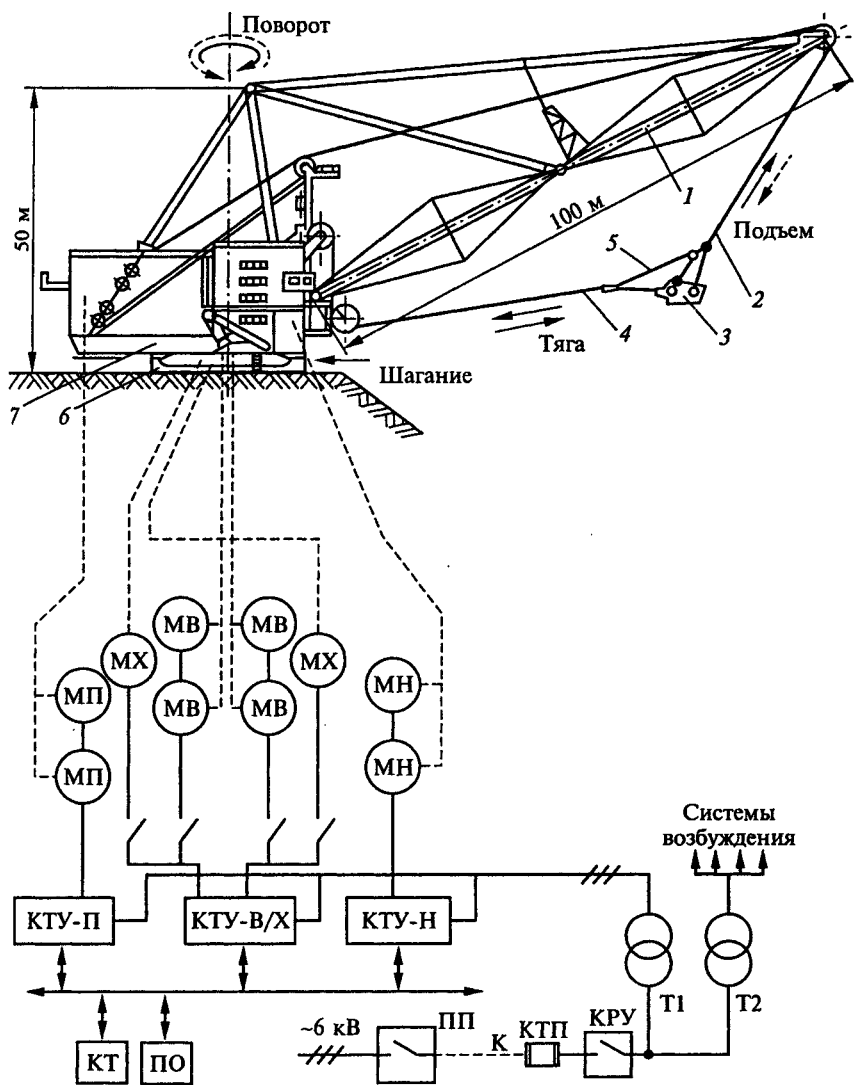


Рис. 4.67

мощных электрических машин, силовое преобразовательное оборудование, высоковольтная система электроснабжения, различные вспомогательные электроприводы, системы автоматического и дистанционного управления, электрооборудование освещения, вентиляции, обогрева и кондиционирования воздуха и др. Наиболее сложное из них относится к электроприводам главных рабочих механизмов и однозначно определяет эксплуатационные по-

казатели экскаватора — производительность, маневренность и удобство управления, надежность и долговечность.

Совокупность электротехнических изделий, располагаемых на экскаваторе, вместе с внешним подключаемым высоковольтным оборудованием системы электроснабжения объединяют в электротехнический комплекс.

Применяемые для экскаваторов электротехнические изделия должны обладать повышенной перегрузочной способностью и механической прочностью. Оборудование должно удовлетворять конкретным требованиям, которые наиболее существенны для определенных категорий экскаваторов, включая условия серийного или индивидуального производства, динамические, конструктивные или экономические факторы, показатели надежности, стоимость и т. д.

К главным механизмам относят те, которые непосредственно осуществляют процесс экскавации грунта: подъемный, поворотный, напорный лопат или тяговый драглайнов.

Процесс экскавации заключается в разработке горного массива, т. е. его разрушении с циклическими режимами копания в забое, и транспортировании ковша к месту разгрузки. Продолжительность цикла малых машин с ковшами объемом 2,5... 5 м<sup>3</sup> составляет 5... 32 с и растет одновременно с увеличением геометрических размеров ковша и рабочего оборудования. Цикл включает в себе следующие технологические операции: копание, подъем груженого ковша с одновременным поворотом платформы к месту выгрузки, разгрузка и возвращение порожнего ковша в забой.

Оперативное перемещение ковша характеризуется трехкоординатной системой воздействия со стороны главных электроприводов. Периодически, по мере отработки забоя, возникает необходимость перемещения экскаватора, что выполняет механизм хода или шагания. Условно к главным относится маломощный электропривод механизма открывания днища ковша, необходимый для разгрузки лопат.

Электропривод подъемного механизма предназначен для управления скоростью и направлением перемещения ковша в вертикальной плоскости. Основными являются следующие технологические функции для лопат: подъем ковша в процессе копания в забое, подъем или опускание ковша для разгрузки в транспорт или отвал и опускание ковша при возвращении в забой. Основные функции для драглайна: поддержание малого натяжения канатов при черпании грунта в забое, подъем ковша после заполнения к голове стрелы, удержание в процессе разгрузки и опускание снова в забой.

Механизм состоит из подъемной лебедки и канатов. Реверсивная лебедка приводится в движение индивидуальными двигате-

лям через редуктор. Режим работы двигателей — интенсивный повторно-кратковременный. Конструктивное исполнение двигателей — горизонтальное с двумя концами вала для соединения с муфтой редуктора и установки тормозного шкива. Имеются образцы экскаваторов с безредукторным тихоходным электроприводом, на валах двигателей которого непосредственно установлены барабаны подъемной лебедки. При использовании двигателей постоянного тока регулирование скорости двигателей ведется изменением напряжения якорей при питании от индивидуальных преобразователей. Для ускоренного опускания ковша к подошве забоя после разгрузки применяется ослабление возбуждения. При использовании асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором применяется частотное регулирование скорости. Ускоренное опускание также выполняется при ослабленном потокосцеплении. Оперативное торможение привода, включая режимы удержания груженого ковша, — электрическое. Привод оборудован стояночным колодочным тормозом и концевым командоаппаратом ограничения пути для исключения «переподъема» ковша.

В группе главных электроприводов электропривод подъема является основным в соответствии с заданным значением нагрузки, скоростью подъема ковша и производительностью экскаватора.

Электропривод напорного механизма лопаты обеспечивает управление скоростью и направлением поступательного перемещения рукояти с ковшом в горизонтальной плоскости. Он предназначен для управления положением ковша при копании в забое, выводе из забоя, перемещении к транспортному средству или отвалу и возвращении в забой. С помощью электропривода оператор задает необходимое напорное усилие на забой, выбирает степень заглубления ковша и трассу копания. Существенна роль электропривода при коррекции положения ковша во время разгрузки в кузов транспортного средства и иных маневрах, требующих точного управления.

Механизм состоит из напорной лебедки и канатов в канатном варианте или зубчатой плоской передачи в реечном варианте. Реверсивная лебедка или реечная передача приводятся в движение индивидуальными двигателями через редуктор. Режим работы двигателя и конструктивное исполнение аналогичны электроприводу подъема. Для защиты механизма от чрезмерных динамических нагрузок привод может быть оборудован муфтой предельного момента, содержащей эластичное и фрикционное звенья.

Оперативное торможение — электрическое с применением стояночного тормоза колодочного типа. Ограничение рабочего хода рукояти обеспечивается механическими упорами, а для смягчения ударов при неправильном маневрировании ковшом дополнительно используется интенсивное торможение по сигналу концевых командоаппаратов.

Электропривод тягового механизма драглайна обеспечивает управление скоростью и направлением поступательного перемещения ковша в горизонтальной плоскости подобно электроприводу напора лопаты. С помощью электропривода обеспечиваются черпание грунта в забое, натяжение канатов для отрыва ковша и поддержание его наклонного положения при перемещении к транспортному средству или отвалу. Электропривод также обеспечивает разгрузку ковша и возвращение в забой.

Механизм состоит из тяговой лебедки и канатов. Реверсивная лебедка приводится в движение индивидуальными двигателями через редуктор. Режим работы аналогичен режиму подъемных механизмов. Обычно с целью унификации электродвигатели подъема лебедки и тяги выбирают одного типа. Для разгрузки ковша на ходу без снижения скорости подъема необходимо ослабить тормозящий момент тяговых канатов. Такая операция достигается увеличением скорости травления.

Особенность привода — ударный характер нагружения и резкие стопорения при черпании в тяжелых грунтах. Из-за больших усилий и моментов установка механических предохранительных муфт исключена. Оперативное торможение — электрическое. Привод оборудуется стояночным колодочным тормозом и концевым командоаппаратом ограничения пути «перетяга» во избежание поломки блока наводки упряжью ковша.

Электропривод поворотного механизма обеспечивает управление скоростью и направлением вращательного движения полноповоротной платформы экскаватора с установленным на ней рабочим оборудованием. Электропривод предназначен для вывода ковша из забоя путем вращения платформы, перемещения к месту разгрузки и обратно. При точной разгрузке ковша в транспортное средство необходима полная остановка платформы, разгрузка в отвал выполняется на ходу, т.е. в процессе реверса платформы. Особенность механизма состоит в изменении момента инерции в значительных пределах.

Механизм состоит из редуктора с большим передаточным числом и выходных валов-шестерен, которые вращаются по неподвижному зубчатому венцу, расположенному на ходовой тележке лопат или опорных базах драглайнов. Привод, как правило, многодвигательный. Реверсивный режим работы с плавным нарастанием ускорения и управляемой скоростью обеспечивается индивидуальными двигателями, управляемыми от индивидуальных преобразователей. Ряд крупных драглайнов изготовлен с тихоходным электроприводом поворота.

На валах электродвигателей поворотного механизма установлены стояночные колодочные тормоза с дистанционным электропневматическим или электромагнитным управлением. Конструктивное исполнение двигателей — вертикальное с двумя концами вала.

Электроприводы механизмов перемещения экскаватора отличаются большим разнообразием, обусловленным конструктивным исполнением механизмов. Наиболее распространен электропривод с индивидуальными двигателями. Механизм перемещения состоит из редуктора, тормоза и бортовых передач гусеничного хода. Механизм шагания драглайнов — эксцентрикового типа с двумя опорными лыжами большой площади. Привод шагания драглайнов выполняется электрогидравлическим с высоковольтными короткозамкнутыми АД.

Основные параметры электроприводов перечисленных механизмов экскаватора следующие: режим работы — S8; частота включений в 1 ч — не более 1000 (для поворотного механизма — 500, для механизмов хода и электромеханического шагания — 100); кратность перегрузки по моменту — 2...2,5; диапазон регулирования скорости — 10:1 (для механизмов хода и электромеханического шагания — 5:1).

На большинстве действующих экскаваторов установлены электроприводы, выполненные по системе Г—Д (генератор—двигатель постоянного тока) [17, 21, 47].

Преобразовательный электромашинный агрегат имеет обычно синхронный или асинхронный электродвигатель и три генератора постоянного тока. От каждого генератора получает питание группа электродвигателей одного из главных механизмов, соединенных последовательно, параллельно или по смешанной схеме. Электродвигатели хода обычно питаются от одного из главных генераторов, когда соответствующий главный механизм не действует. Необходимое изменение угловой скорости двигателей обеспечивают регулированием тока возбуждения генератора и соответственно напряжения, подаваемого на электродвигатели. В некоторых случаях для дополнительного повышения скорости (выше номинальной) уменьшают ток возбуждения электродвигателя. Напряжение генератора должно автоматически регулироваться так, чтобы при малых нагрузках развивалась наибольшая угловая скорость электродвигателя, а при увеличении момента нагрузки скорость быстро снижалась вплоть до нуля при резком стопорении привода. Для этого система возбуждения генератора должна иметь высокое быстродействие, что реализовать весьма непросто, поскольку обмотка возбуждения обладает большой электромагнитной постоянной времени.

Системы автоматического регулирования (САР), обеспечивающие требуемые алгоритмы управления, выполняют в виде общеизвестных систем «подчиненного» регулирования с регуляторами тока якоря и напряжения (или ЭДС) двигателя.

Электроприводы главных механизмов должны обеспечивать высокопроизводительную работу экскаватора при одновременном ограничении нагрузок механического и электрического оборудо-

вания. Этим требованиям наиболее полно отвечает экскаваторная механическая характеристика (см. рис. 3.24).

Применительно к копающим механизмам при рабочих перегрузках по моменту на валу обеспечивается незначительное снижение скорости двигателя (по сравнению со скоростью холостого хода). Когда момент двигателя достигает момента отсечки  $M_{отс}$ , скорость двигателя уменьшается до нуля при стопорном режиме. Значение стопорного момента  $M_{ст}$  близко к предельно допустимому по условиям прочности механизма и перегрузочной способности двигателя. Участок характеристики, на котором момент меньше  $M_{отс}$  называют рабочим, а участок, на котором он больше  $M_{отс}$ , — участком ограничения момента.

Применение ТП и электродвигателей постоянного тока с малым динамическим моментом инерции и пониженной частотой вращения в сочетании с САР, обеспечивающей оптимальную форму механической характеристики и высокое быстродействие, позволяет придать экскаватору новые качества.

Как известно, в тиристорном преобразователе в соответствии с принципом его действия при уменьшении выходного напряжения по сравнению с номинальным ухудшаются энергетические показатели системы: снижается коэффициент мощности, увеличивается содержание высших гармоник напряжения питающей сети. Это — главные недостатки тиристорного электропривода постоянного тока. Действие указанных факторов нейтрализуется применением фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ).

Перспективным для экскаватора является применение частотно-регулируемого электропривода переменного тока, в частности ПЧ с неуправляемым входным выпрямителем, промежуточным звеном постоянного тока и выходным инвертором регулируемой частоты с формированием синусоидального выходного напряжения методом широтно-импульсной модуляции. Использование неуправляемого входного выпрямителя позволяет кардинально улучшить энергетические показатели преобразователя: получить коэффициент мощности, близкий к 1, и минимальное содержание высших гармоник.

Недостатком ШИМ-преобразователя является сложность реализации тормозных режимов, необходимых, например, при спуске грузов. Для рекуперации энергии в сеть требуется дополнительный инвертор (аналогичный тиристорному выпрямителю). Простым решением является рекуперативно-резисторное торможение, при котором энергия спуска выделяется в резисторах и преобразуется в теплоту.

Современным решением, использующим полностью управляемые полупроводниковые элементы, является преобразователь частоты с активным выпрямителем, система управления которого обеспечивает режимы рекуперации и поддержания значений напряжения и коэффициента мощности.

Основные недостатки, препятствующие широкому применению частотного электропривода в экскаваторах: повышенная сложность оборудования и недостаточная отработка изделий для тяжелых условий эксплуатации; дополнительная сложность в обеспечении тормозных режимов, необходимых в реверсивных электроприводах (в частности, при спуске грузов); повышенная стоимость по сравнению с электроприводами постоянного тока.

### 4.7.3. Системы управления буровыми станками

К главным механизмам буровых станков относятся буровые насосы (на морских буровых установках также цементировочные насосы), ротор и буровая лебедка. У буровой лебедки следует различать систему, обеспечивающую привод лебедки при подъеме колонны бурильных труб из скважины, и систему, обеспечивающую торможение при спуске колонны, которые в общем случае можно рассматривать как самостоятельные системы.

Для питания электроприводов станков используются следующие источники электроэнергии: высоковольтная электрическая линия для электрических буровых установок и автономная электростанция для установок, предназначенных для неэлектрифицированных районов. Электродвигатели на каждой конкретной установке должны, как правило, выполняться на одинаковое напряжение.

Главные электроприводы работают не одновременно, в основных рабочих режимах действуют буровые насосы и ротор (режим бурения) или буровая лебедка в режиме спускоподъемных операций (СПО), причем потребляемая электроприводами мощность в большой степени зависит от текущей глубины бурения. С учетом этого мощность главных электроприводов сбалансирована так, чтобы максимальная потребляемая мощность в режимах бурения и СПО была одного порядка и не превышала мощность источника энергии.

**Электропривод насоса.** Технологические функции буровых насосов в случае роторного бурения состоят в создании потока промывочной жидкости (бурового раствора) через бурильные трубы к забою скважины и через затрубное пространство от забоя к устью скважины, что необходимо для выноса от забоя на поверхность частиц разбуренной породы. В случае турбинного бурения промывочная жидкость, кроме того, приводит во вращение турбобур с долотом на конце, т.е. служит рабочим материалом для турбины турбобура.

Необходимая мощность привода насоса при разных методах бурения различна. Поскольку каждая буровая установка должна обеспечивать возможность бурения любым из указанных методов, мощность выбирают из условий турбинного бурения (так как для роторного бурения требуется меньшая мощность); на установках

различных классов эта мощность от 300 до 1200 кВт на один насос. Номинальная частота вращения двигателя насоса обычно 750... 1000 мин<sup>-1</sup>. Буровые насосы представляют собой насосы поршневого типа. Мощность двигателя определяется для основного расчетного режима, соответствующего наибольшему давлению насоса, т. е. наименьшему диаметру поршня. При других диаметрах поршня режимы работы насоса рассчитывают так, чтобы мощность привода оставалась неизменной.

**Электропривод ротора.** Буровой ротор предназначен для приведения во вращение колонны бурильных труб. При роторном бурении это необходимо непосредственно для вращения долота, при турбинном бурении — для вспомогательных целей. Необходимая мощность привода ротора на установках различных классов — от 75 до 600 кВт. Стандарты на буровые установки регламентируют мощность и номинальный момент на вращающемся столе ротора, а также максимальную частоту вращения (при малых нагрузках) и максимальный момент (при нулевой частоте вращения).

Выбор вида привода и его характеристик выполняют с учетом следующих требований и технологических особенностей работы:

привод ротора должен быть реверсивным;

в основных рабочих режимах ротор должен вращаться в одном (прямом) направлении; обратное направление вращения необходимо только в некоторых вспомогательных режимах, поэтому допустим реверс после оперативных переключений с кратковременным перерывом питания;

режим работы — длительный, причем момент нагрузки может быть постоянным или колебаться в некоторых пределах (вплоть до максимального);

при регулировании частоты вращения ниже номинальной привод должен обеспечивать возможность длительной работы при номинальном моменте нагрузки, при регулировании частоты выше номинальной — при постоянной номинальной мощности, однако привод ротора работает при меньших моменте и мощности, в связи с чем автоматическое обеспечение указанных условий не требуется;

пусковые характеристики привода не регламентируются, необходимо лишь, чтобы момент на роторе не превышал максимального, который составляет обычно 1,5... 1,6 номинального;

требуемый статизм механической характеристики в пределах номинальной нагрузки должен быть не более 5... 10 % номинальной частоты вращения;

требования к плавности регулирования частоты вращения зависят от расчетной глубины бурения (плавное регулирование необходимо на установках глубокого бурения, а на прочих установках допустимо ступенчатое изменение частоты вращения);

специфическим является требование ограничения момента инерции привода.



Ротор приводит во вращение длинную упругую колонну труб. Для уменьшения динамических нагрузок в трубах при заклинивании долота привод должен иметь возможно меньший момент инерции.

В зависимости от класса буровой установки для привода ротора рекомендуется применять: для установок глубокого и сверхглубокого бурения — глубоко регулируемый электропривод ротора; для прочих буровых установок — нерегулируемый электропривод со ступенчатым изменением частоты вращения ротора с помощью механической коробки передач; возможно также применение группового привода ротора от трансмиссии буровой лебедки.

Основными заданными параметрами электропривода ротора являются мощность и момент ротора. По этим данным определяется номинальная угловая скорость ротора. Буровой ротор всегда имеет встроенный конический редуктор. Между приводным валом ротора и двигателем в общем случае имеется редуктор (одноили многоскоростной). Мощность, угловая скорость и момент ротора и двигателя связаны следующими соотношениями:

$$P_{\text{дв}} = P_{\text{р}}/\eta_{\text{р}}\eta_{\text{ред}};$$

$$\omega_{\text{дв}} = \omega_{\text{р}}i_{\text{р}}i_{\text{ред}};$$
(4.95)

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{р}}/i_{\text{р}}i_{\text{ред}}\eta_{\text{р}}\eta_{\text{ред}},$$
(4.96)

где  $P_{\text{дв}}$ ,  $P_{\text{р}}$  — соответственно мощности двигателя и ротора, кВт;  $\eta_{\text{р}}$ ,  $\eta_{\text{ред}}$  — соответственно КПД ротора и редуктора;  $M_{\text{дв}}$ ,  $M_{\text{р}}$  — момент на валу двигателя и ротора, Н·м;  $\omega_{\text{дв}}$ ,  $\omega_{\text{р}}$  — соответственно угловые скорости двигателя и ротора, рад/с;  $i_{\text{р}}$ ,  $i_{\text{ред}}$  — соответственно передаточные числа ротора и редуктора.

Одной из основных задач расчета является выбор передаточного числа редуктора ротора ( $i_{\text{р}}$  задано). Для нерегулируемого привода передаточное число высшей передачи определяют по (4.95) с учетом того, что в этом случае должна быть обеспечена максимальная скорость ротора  $\omega_{\text{рmax}}$  при номинальной скорости двигателя. Передаточное число низшей передачи находят по формуле (4.96) с учетом того, что должен быть обеспечен максимальный требуемый момент ротора  $M_{\text{рmax}}$  при максимально допустимом кратковременном моменте двигателя. Из конструктивных соображений производят выбор промежуточных значений передаточного числа редуктора (коробки скоростей).

Для регулируемого привода передаточное число высшей передачи определяют по (4.95), причем скорость двигателя принимают максимальной. Затем по (4.96) находят момент двигателя при том же  $i_{\text{р}}$  и максимальном моменте на роторе и проверяют выполнение условия

$$M_{\text{двmax}} \leq M_{\text{двдоп}}.$$
(4.97)

Если это условие не выполняется, то необходимо использовать двухскоростную коробку передач. Передаточное число низшей передачи находят по (4.96) при условии, что должно выполняться условие (4.97).

**Электропривод лебедки.** Буровая лебедка предназначена для подъема и спуска бурильной колонны, производимых периодически для замены породоразрушающего долота. На установках разных классов установленная мощность привода лебедки 250... 2500 кВт.

Вид привода и его характеристики должны выбираться с учетом следующих требований и технологических особенностей работы лебедки в режиме подъема:

режим работы привода — повторно-кратковременный. При подъеме колонну делят на отдельные отрезки — свечи длиной 25... 37,5 м каждая, которые поднимают последовательно одну за другой с перерывами, необходимыми для выполнения вспомогательных операций. Относительная продолжительность включения (ПВ) составляет в среднем 30... 40 %, длительность одного цикла 1,5... 3 мин. Перегрузка двигателя по току в рабочем периоде принимается обычно равной 1,2... 1,3 номинального тока;

реверс двигателя в основных рабочих режимах не требуется, он необходим только в редких вспомогательных режимах и может осуществляться путем оперативных переключений. Если двигатель используется также в качестве тормозной машины при спуске колонны, то привод должен быть реверсивным (изменение знака скорости), однако статический момент нагрузки определяется «протягивающим грузом» и не меняет знака, т.е. привод работает в I и IV квадрантах;

желательно более полное использование мощности привода при изменении момента нагрузки в широких пределах (до 20 раз), поэтому характеристика привода должна быть близкой к кривой постоянной мощности. Требуемый диапазон регулирования скорости до 10: 1;

привод должен иметь такие пусковые характеристики, чтобы обеспечивался плавный, но достаточно интенсивный разгон лебедки. Значение максимального момента двигателя должно быть 1,8... 2,2 номинального момента;

жесткость механической характеристики должна быть такой, чтобы статизм не превышал 5... 8 % номинальной частоты вращения. При регулируемом приводе формируется обычно экскаваторная механическая характеристика;

привод лебедки должен обеспечивать остановку крюка талевого системы с точностью  $\pm(30... 40)$  мм, что соответствует 0,05... 0,15 оборота вала двигателя (в зависимости от передаточного отношения между барабаном лебедки и валом двигателя);

на установках глубокого бурения привод лебедки должен быть двухдвигательным по соображениям резервирования, причем мак-

симальное расчетное усилие на крюке должно обеспечиваться при работе одного двигателя.

В зависимости от класса буровой установки для привода лебедки рекомендуется применять: для установок глубокого и сверхглубокого бурения — глубоко регулируемый редукторный или безредукторный электропривод с аварийной механической передачей в зависимости от ряда дополнительных требований; для прочих буровых установок — регулируемый электропривод с диапазоном регулирования до 10 : 1.

Система торможения буровой лебедки должна воспринимать энергию, развиваемую бурильной колонной при спуске в скважину, и обеспечивать регулирование скорости спуска в заданных пределах. Для этой цели используются электрические машины различных типов, в первую очередь специально создаваемые для этого электромагнитные тормоза индукционного или порошкового типа. Рационально использовать в качестве тормозных машин приводные двигатели лебедки. Мощность тормозной машины на установках разных классов составляет от 200 до 1500 кВт. Действующие стандарты регламентируют скорости спуска колонны номинальной массы и незагруженного талевого блока, остальные параметры выбираются при проектировании.

Тормозные режимы реализуются с учетом следующих требований и технологических особенностей работы лебедки при спуске колонны:

режим торможения — повторно-кратковременный, приблизительно такой же, как для привода лебедки в режиме подъема;

основное направление вращения соответствует спуску колонны, однако возможно вращение в обратном направлении. Приводной двигатель при спуске работает в IV квадранте в режиме динамического или рекуперативного торможения. Последнее допускается на установках, получающих питание от электрической сети;

диапазон регулирования скорости спуска выше номинальной достигает 2 : 1. Желательно получение малых скоростей спуска вплоть до нулевой, однако допустимо принимать минимальную скорость примерно 0,3 номинальной. Желательно наиболее полно использовать мощность системы торможения, поэтому зависимость скорости спуска от момента нагрузки при скорости больше номинальной должна быть близкой к кривой постоянной мощности;

система торможения должна обладать запасом тормозного момента примерно 1,5 номинального значения для обеспечения достаточно интенсивного замедления;

требования к точности остановки те же, что и для привода лебедки в режиме подъема.

В зависимости от класса буровой установки рекомендуется применять системы торможения: для установок глубокого и сверхглубо-

бокого бурения — с использованием приводных двигателей лебедки в качестве тормозных машин; для установок бурения на средние глубины — с электромагнитными индукционными тормозами; для установок бурения на небольшие глубины — с электромагнитными ферропорошковыми тормозами, которые могут дополнительно выполнять функции регуляторов подачи долота при бурении.

За основной расчетный режим принимается режим подъема буровой колонны номинальных длины и массы.

Формулы для расчета мощности и моментов являются общими для различных видов привода. Предварительный выбор номинальной мощности двигателя (или суммарной мощности двигателей) осуществляется по заданной мощности на барабане  $P_6$  в основном расчетном режиме:

$$P_{\text{дном}} \approx P_{6\text{ном}}/\delta_0, \quad (4.98)$$

где  $\delta_0$  — перегрузка двигателя в основном расчетном режиме.

Моменты на валу барабана при подъеме и спуске колонны соответственно:

$$M_6 = GD_6 k_{\text{погр}}/2i_{\text{тс}}\eta_{\text{тс}}\eta_{\text{тр}}; \quad (4.99)$$

$$M_6 = GD_6 k_{\text{погр}}\eta_{\text{тс}}\eta_{\text{тр}}/2i_{\text{тс}}, \quad (4.100)$$

где  $M_6$  — момент на валу барабана, Н·м;  $G$  — масса колонны в воздухе, Н;  $D_6$  — расчетный диаметр барабана, м;  $k_{\text{погр}} = 0,85 \dots 0,9$  — коэффициент потери массы при погружении колонны в раствор;  $i_{\text{тс}}$ ,  $\eta_{\text{тс}}$  — соответственно передаточное число и КПД талевого системы;  $\eta_{\text{тр}} = 0,85$  — коэффициент, учитывающий трение колонны о стенки скважины.

Моменты на валу двигателя при подъеме и спуске колонны соответственно:

$$M_{\text{д}} = M_6/i_k\eta_k; \quad (4.101)$$

$$M_{\text{д}} = M_6\eta_k/i_k, \quad (4.102)$$

где  $M_{\text{д}}$  — момент на валу двигателя или суммарный момент двигателей при многодвигательном приводе, Н·м;  $i_k$ ,  $\eta_k$  — передаточное число и КПД  $k$ -й передачи соответственно.

Линейная скорость движения крюка подъемной системы, т.е. скорость движения колонны, связана с угловой скоростью барабана следующим образом:

$$v = D_6\omega_6/2i_{\text{тс}}. \quad (4.103)$$

**Электропривод бурового станка СБШ-250.** Функциональная схема электропривода показана на рис. 4.68. Буровой станок состоит из машинного отделения 4, смонтированного на гусеничном ходу 5, кабины 7 и мачты 1, закрепленной на машинном отделении посредством специальных опор 3. Для подъема мачты в рабочее положение и опускания в транспортное положение служат два

гидравлических цилиндра 2. Приведение станка в горизонтальное положение осуществляется с помощью трех гидравлических домкратов 6.

Для приведения в действие всех механизмов в процессе выполнения основных и вспомогательных операций на станке имеются системы электрического и гидравлического приводов.

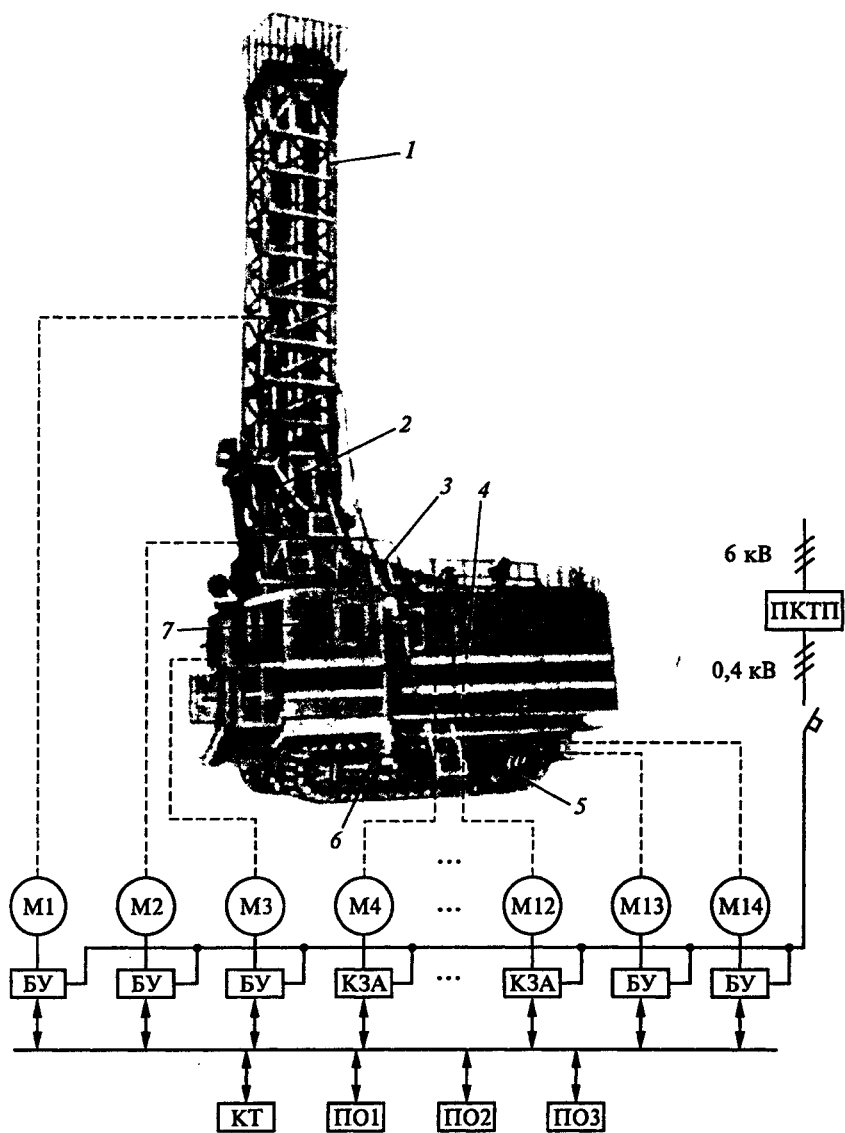


Рис. 4.68

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

Для выноса из забоя на поверхность частиц разбуренной породы (буровой мелочи) в станке, кроме насосов, используются винтовые компрессоры для создания воздушно-водяной системы.

Основными являются электроприводы ротора М1, лебедки М2, М3, насоса М4, компрессора М5, М6.

Гусеничный ход станка обеспечивается электроприводами М13, М14. Электроприводы М1... М3, М13, М14 являются регулируемые, управление ими осуществляется от блоков БУ. Остальные электроприводы — нерегулируемые. Питание их осуществляется через коммутационно-защитную аппаратуру КЗА.

Электроприводы маслонасосов гидравлических систем станка, а также вентиляторов охлаждения двигателей и проветривания помещений (М7... М12) относятся к вспомогательными электроприводами станка.

В станке применен унифицированный гусеничный ход, предназначенный для комплектации самоходных буровых станков и другого горного оборудования.

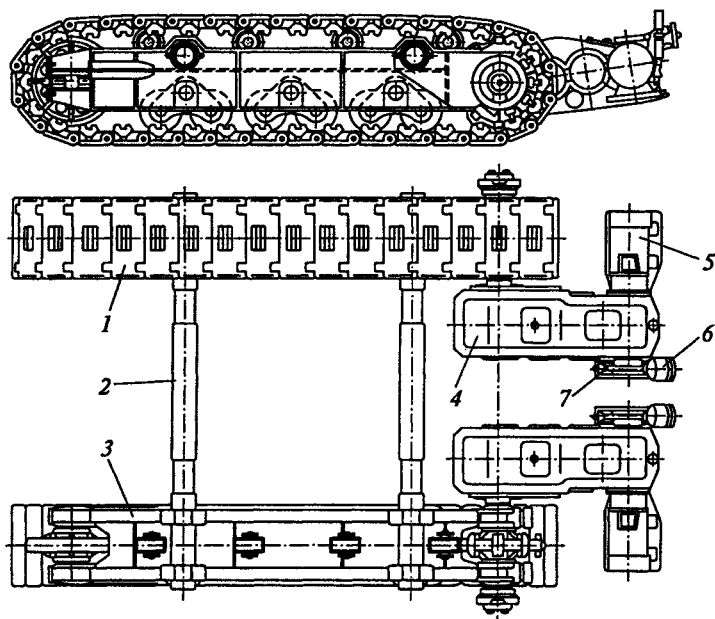


Рис. 4.69

Гусеничный ход (рис. 4.69) состоит из двух гусеничных тележек 1, соединенных двумя осями 2. Каждая тележка состоит из гусеничной ленты и рамы 3, в которой смонтированы на осях ведущее и ведомое колеса, поддерживающие и опорные катки с балансирами. Степень натяжения гусеничных лент регулируется натяжными устройствами. Привод гусеницы состоит из четырехступенчатого бортового редуктора 4 и электродвигателя 5. Для механического торможения гусениц служат электромагнитные колодочные тормоза, имеющие электромагниты 6 и колодочные механизмы 7, захватывающие установленные на редукторе шкивы.

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

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

На станке имеются три пульта (пульта оператора ПО1, ПО2, ПО3 — см. рис. 4.68): управления процессом бурения, управления компрессором и выносной пульт управления ходом. Основной пульт, с помощью которого оператор (машинист) осуществляет управление процессом бурения и контроль за ходом этого процесса, находится в кабине машиниста. На пульте расположены: кнопки управления двигателями водяных насосов, ротора и лебедки; универсальные переключатели управления схемой гидропривода; выключатели управления подогревом воды, воздуха и масла; кнопка дистанционного отключения вводного автомата; устройства отображения данных о напряжении питающей сети и на двигателях, а также о токах двигателей, давлении масла, воды и воздуха в системах, осевом давлении на забой.

В кабине расположен также пульт управления винтовым компрессором, в комплект которого входят: кнопки управления двигателями компрессора, вентилятора, насоса перекачки масла, а также подогревом масла в маслобаке; приборы, показывающие температуру и давление масла и воздуха в компрессоре тумблер подачи напряжения на пульт; тумблер включения защиты компрессора от перегрева и резкого изменения давления; кнопка снятия сигнала при срабатывании защиты, а также сигнальная арматура.

Шкафы управления расположены в машинном отделении станка и предназначены для размещения вторичной (исполнительной) аппаратуры управления.

*Привод ротора (бурового става)* (рис. 4.70) осуществляется от электродвигателя 6 через редуктор 4 и резинокордовую зубчатую

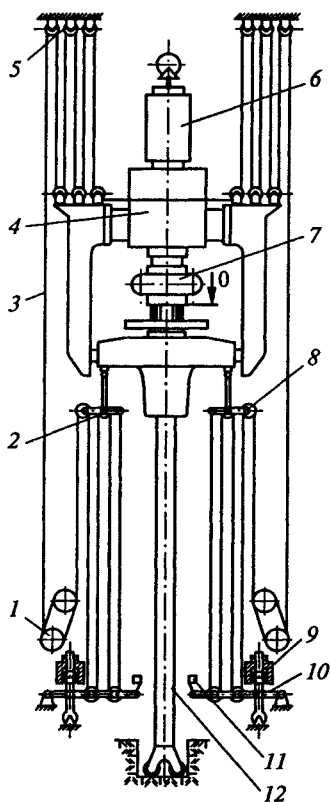


Рис. 4.70

муфту 7. Электродвигатель и редуктор подвешены на канатах системы подачи и перемещаются по направляющим мачты вслед за опорным узлом 2 бурового става.

*Механизм подачи колонны* (см. рис. 4.70) состоит из двух лебедок, натяжного устройства, верхних блоков и каната подачи.

Усилие подачи создается лебедками 1 и передается на опорный узел 2 через канат 3, огибающий последовательно несколько раз канавки приводных барабанов лебедок. Тяговое усилие передается на канат под действием силы трения, возникающей в канавках барабанов. Натяжение сбегających ветвей канатов при бурении создается весом буровой колонны 12, а при подъеме става — натяжным устройством 10 под действием веса рычагов 11 и усилия пружин 9. Подача выполняется одним канатом, концы которого закреплены на правой и левой блочных обоймах опорного узла 8. Огибая последовательно блоки опорного узла 8, блоки натяжных устройств 10, барабаны лебедок 1 и верхние блоки 5, канат образует четыре пятикратных полиспаста, два

из которых расположены ниже головки бурового снаряда, а два — выше. При бурении нижние полиспасты создают усилие подачи, а верхние обеспечивают подвеску вращателя и синхронную подачу его вслед за опорным узлом.

При включении механизма подачи на подъем вначале поднимается только вращатель, а затем, после выбора зазора в каретках, подхватывается опорный узел с буровым ставом и дальнейший подъем производится совместно.

Привод лебедки (рис. 4.71, а) осуществляется от электродвигателя 2 и обеспечивает вращение барабанов 3 лебедки с нужной скоростью. Применяется и комбинированный привод (рис. 4.71, б) от электродвигателя 2 и гидродвигателя 5. Гидродвигатель, развивающий большое тяговое усилие при малой скорости подачи, включают при бурении или извлечении прихваченного в скважине бурового инструмента. Электродвигатель включают при производстве спускоподъемных операций, выполняемых на большой скорости.



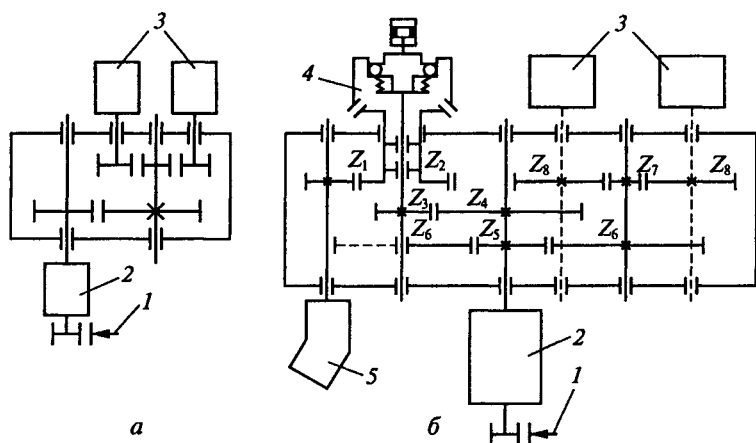


Рис. 4.71

Гидропривод также осуществляет спускоподъемные операции, если необходимо получить малую скорость передвижения головки бурового снаряда, например, при посадке штанги на долото перед свинчиванием их между собой.

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

Основным составляющим элементом приводов, обеспечивающим регулирование частоты вращения ротора, лебедки и гусеничного хода является низковольтное комплектное устройство, включающее в себя тиристорный преобразователь. Комплектное тиристорное устройство КТУ входит в состав низковольтного комплектного устройства НКУ для управления главными электроприводами буровых станков и их модификаций, оборудованных системой ТП-Д (тиристорный преобразователь — двигатель).

В КТУ входят два выпрямителя: силовой реверсивный тиристорный для питания якорной цепи электропривода (выпрямитель якоря); нереверсивный тиристорный для питания обмотки возбуждения двигателя (выпрямитель возбуждения).

В шкафу КТУ установлены:

два силовых тиристорных блока, представляющие собой групповые радиаторы с установленными на них тиристорами и образующие силовую схему одного мостового реверсивного тиристорного выпрямителя для питания якорной цепи электропривода;

один силовой тиристорный блок, образующий силовую схему одного мостового нереверсивного тиристорного выпрямителя для питания цепей возбуждения двигателя;

сетевой токоограничивающий реактор выпрямителя якоря;

автоматический выключатель со стороны переменного тока выпрямителя якоря;

автоматический выключатель со стороны постоянного тока выпрямителя якоря;

автоматический выключатель со стороны переменного тока выпрямителя возбуждения;

блок управления, регулирования и защиты главных приводов;

электроизмерительные приборы, сигнальные лампы и другое вспомогательное оборудование.

Степень защиты шкафа IP22 по ГОСТ 14254—96.

Выпрямитель якоря работает по принципу раздельного управления силовыми комплектами тиристоров с запирающим неработающим комплектом (без уравнивающих токов) и подключается к питающей сети через токоограничивающий реактор и автоматический выключатель, осуществляющий защиту комплектного устройства от токов короткого замыкания. Якорь электродвигателя соответствующего механизма («Бурение», «Подача», «Ход») подключается к зажимам постоянного тока через автоматический выключатель.

Схема управления выпрямителем якоря выполнена по принципу двухконтурной системы подчиненного регулирования параметров с П-регулятором частоты вращения и ПИ-регулятором тока. Обмотка возбуждения электродвигателя соответствующего механизма подключается непосредственно к шинам постоянного тока возбудителя. Схема управления выпрямителем возбуждения выполнена в виде одноконтурной системы регулирования параметров с П-регулятором тока возбуждения.

При подаче трехфазного напряжения питания 380 В частотой 50 Гц на вход КТУ загорается сигнальная лампа «Сеть основная». Одновременно силовое напряжение поступает на устройство фазировки, расположенное на панели с аппаратурой.

Сигнальная лампа «Фазировка» служит для выдачи светового сигнала на двери шкафа о фазировке силовой питающей сети. Эта лампа должна гореть при прямой последовательности фаз.

Для основных электроприводов буровых станков также перспективны системы частотно-регулируемых электроприводов переменного тока с программируемыми контроллерами и интеллектуальными технологическими модулями.

## 4.8. Состав и свойства систем управления оборудованием, предназначенным для транспортирования и обработки гибких материалов

### 4.8.1. Характеристика оборудования и электроприводов

Оборудование входит в состав большого числа АТК непрерывно-поточных производств разнообразных отраслей промышленности — металлургической, целлюлозно-бумажной, текстильной, химической и др. (см. п. 4.1). К таким комплексам относятся: непрерывные станы горячей и холодной прокатки, бумагоделательные машины, линии по обработке полимерных материалов, машины текстильного производства и др.

Непрерывные прокатные станы имеют несколько рабочих клетей (см. гл. 5), в которых одновременно происходит прокатка металла. Металл движется в одном направлении, последовательное его обжатие происходит в каждой рабочей клетке. Все клетки, разматыватель и устройство намотки в рулон (моталка) оснащаются электроприводами.

При одновременной прокатке металла в нескольких клетях количество металла, выходящего из предыдущей клетки, должно равняться количеству металла, входящего в следующую клетку. Через каждую клетку проходит в единицу времени одно и то же количество металла. Для  $n$ -клетьевого стана

$$F_1 v_1 = F_2 v_2 = \dots = F_i v_i = \dots = F_n v_n, \quad (4.104)$$

где  $F_i$  — сечение металла перед входом в  $i$ -ю клетку;  $v_i$  — скорость движения металла перед входом в  $i$ -ю клетку,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Скорость движения металла после обжатия в клетке [12]

$$v_i = \frac{\omega_i d_i}{2} (1 + S_i), \quad (4.105)$$

где  $\omega_i$ ,  $d_i$  — соответственно угловая скорость и диаметр рабочих валков  $i$ -й клетки;  $S_i$  — коэффициент опережения по скорости.

Если предположить, что связь между валками двух соседних клеток через металл отсутствует, то скорость выхода металла из  $i$ -й клетки

$$v_{\text{вых } i} = \frac{\omega_i d_i}{2} (1 + S_i), \quad (4.106)$$

а скорость выхода металла из  $(i + 1)$ -й клетки

$$v_{\text{вых } i+1} = \frac{\omega_{i+1} d_{i+1}}{2} (1 + S_{i+1}). \quad (4.107)$$

Следовательно,

$$\frac{\omega_{i+1}}{\omega_i} = \frac{v_{\text{вых}i+1}}{v_{\text{вых}i}} \frac{d_i (1 + S_i)}{d_{i+1} (1 + S_{i+1})}. \quad (4.108)$$

В установившемся режиме  $F_{\text{вых}i} v_{\text{вых}i} = F_{\text{вых}i+1} v_{\text{вых}i+1}$ . Принимая во внимание, что  $F_{\text{вых}i} = F_{\text{вх}i+1}$ , и обозначив  $F_{\text{вх}i+1}/F_{\text{вых}i+1}$  (отношение, характеризующее вытяжку металла в клетке) через  $\lambda_{i+1}$ , получим

$$\frac{\omega_{i+1}}{\omega_i} = \lambda_{i+1} \frac{d_i (1 + S_i)}{d_{i+1} (1 + S_{i+1})}. \quad (4.109)$$

Условие (4.109) соответствует режиму свободной прокатки, когда металл большого сечения не испытывает усилий натяжения и сжатия, а металл малых сечений прокатывается с образованием петли, имеющей постоянную длину. При этом  $v_{\text{вых}i} = v_{\text{вх}i+1}$ .

Если прокатка происходит с постоянным натяжением металла между клетями, то

$$\frac{\omega_{i+1}}{\omega_i} = \lambda_{i+1} \delta \frac{d_i (1 + S_i)}{d_{i+1} (1 + S_{i+1})}, \quad (4.110)$$

где  $\delta > 1$  — постоянный коэффициент, зависящий от заданного натяжения.

Из формул (4.109) и (4.110) следует, что скорости рабочих валков клетей должны быть разными и зависеть от ряда параметров, определяемых технологией прокатки и свойствами металла.

Нормальный режим прокатки обеспечивается при стабилизации соотношения скоростей валков всех клетей прокатного стана. Наряду с этим необходимо обеспечить одновременное регулирование скорости всех электроприводов для того, чтобы получать требуемые заправочные и рабочие скорости прокатного стана.

В бумагоделательной машине (см. гл. 5) часть групп приводных валов связана ленточной сеткой, которая движется по замкнутому тракту. Такие устройства применяются там, где бумага не имеет механической прочности. В другой части групп приводных валов связь происходит только через бумажное полотно.

Бумагоделательная машина в общей сложности может иметь несколько десятков электроприводов, обеспечивающих непрерывное движение бумаги при ее превращении из жидкой массы в плотное полотно, намотанное в рулон. После окончания намотки рулона бумажное полотно переводится на новый тамбурный вал и происходит намотка следующего рулона. Этот процесс непрерывно повторяется, и бумагоделательная машина работает длительное время в непрерывном режиме.

Для электроприводов бумагоделательных машин характерны те же основные особенности, что и для электроприводов непрерыв-

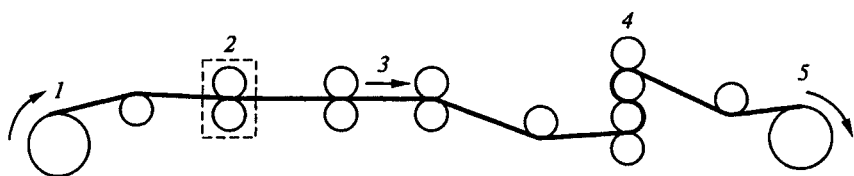


Рис. 4.72

ных прокатных станов. Но если в прокатных станах линейные скорости движения металла возрастают от первой клетки до последней, то в бумагоделательных машинах возрастает линейная скорость движения бумаги только на первых секциях. В сушильной части вследствие усадки бумаги скорость уменьшается. Окончательная обработка бумаги происходит при примерно постоянной линейной скорости.

В линиях по производству и обработке магнитных, рентгеновских, кино- и фотопленок применяют секции, аналогичные по своему функциональному назначению секциям бумагоделательных машин (рис. 4.72). На сматываемую с рулона 1 полимерную пленку наносится покрытие с помощью специальных валков 2, вращающихся в ванне с раствором. Толщина слоя покрытия зависит от соотношения скорости движущейся ленты и скорости валков. Далее пленка проходит сушильные камеры 3, после чего происходит ее вспомогательная обработка в каландрах 4. Готовая пленка наматывается в рулон 5.

Для всех рассмотренных машин основные требования к АСУ ЭП являются общими. Нужна длительная стабилизация с определенной точностью линейной скорости движения обрабатываемого полотна и связанная с этим необходимость стабилизации соотношения скоростей отдельных секций исходя из условий технологического процесса и поддержания заданных натяжений в межсекционных промежутках. Необходимо плавное регулирование скорости движения обрабатываемого полотна, а следовательно, и соответствующее этому автоматическое регулирование соотношения скоростей секций установки в диапазонах, зависящих от требований технологического процесса и свойств обрабатываемого полотна. Необходима подрегулировка скорости отдельных секций с зависимым или независимым управлением скоростью соседних секций. Системы управления электроприводами следует рассматривать как системы, взаимосвязанные через непрерывно движущееся полотно (металл, бумагу, полимерную пленку, ткань и др.).

Соотношения скоростей отдельных секций устанавливаются, как правило, относительно ведущей секции, в которой обеспечивается только стабилизация скорости. К таким ведущим секциям относятся, например, сушильные секции бумагоделательных машин, первая клетка непрерывных прокатных станов, механизмы нанесе-

ния покрытий в линиях по обработке полимерной пленки и др. Системы управления ведомыми секциями обеспечивают необходимую их синхронизацию с ведущей секцией.

Совместно с системами управления скоростью в многодвигательных промышленных установках применяют системы стабилизации натяжений, межсекционных петель полотна, системы управления устройствами размотки полотна из рулона и намотки в рулон и др. Средствами электропривода обеспечивается и регулирование технологических переменных, определяющих качество обработки материала (толщины, гладкости поверхности, веса единицы площади и др.)

#### **4.8.2. Системы управления скоростью и соотношением скоростей механизмов, взаимосвязанных ленточным материалом**

Многодвигательные электроприводы промышленных установок выполняются с использованием электродвигателей переменного и постоянного тока. Силовая часть многодвигательных электроприводов может быть выполнена по схеме с общим преобразователем на все или на группу электроприводов или с индивидуальными управляемыми преобразователями (УП) на каждый электропривод (см. гл. 2).

Многодвигательные электроприводы с индивидуальными УП применяются без ограничений по мощности и обеспечивают более гибкое управление промышленными установками при широком диапазоне регулирования скорости. Для чистовой обработки металлов в прокатных станах применяют электроприводы с двухзонным регулированием скорости. Электроприводы могут также выполняться реверсивными, если прокатка металлической полосы происходит сначала в одном, а затем в обратном направлении. Для большинства других промышленных установок применяют неревверсивные электроприводы с однозонным регулированием скорости.

Локальные системы управления каждым электродвигателем выполняются по типовым схемам (см. гл. 2). Взаимосвязь локальных систем осуществляется по цепи нагрузки через общее обрабатываемое полотно и по цепи управления для задания общей скорости электроприводов и соотношения скоростей электроприводов отдельных секций (см. гл. 3).

Взаимосвязь локальных систем управления электроприводами через общее обрабатываемое полотно имеется в тех случаях, когда движение полотна в межсекционном промежутке происходит с определенным значением натяжения  $F$ . Основные соотношения, характеризующие взаимосвязь электроприводов через полотно, могут быть установлены на основании схемы, представленной на рис. 4.73, а.

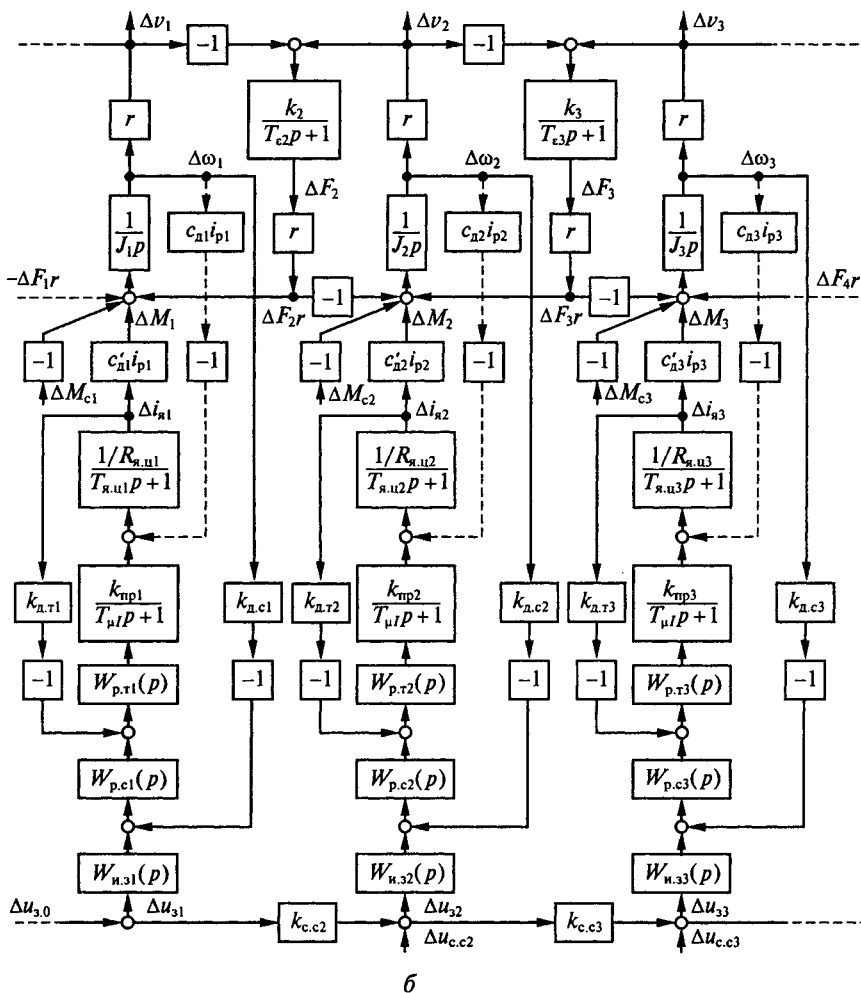
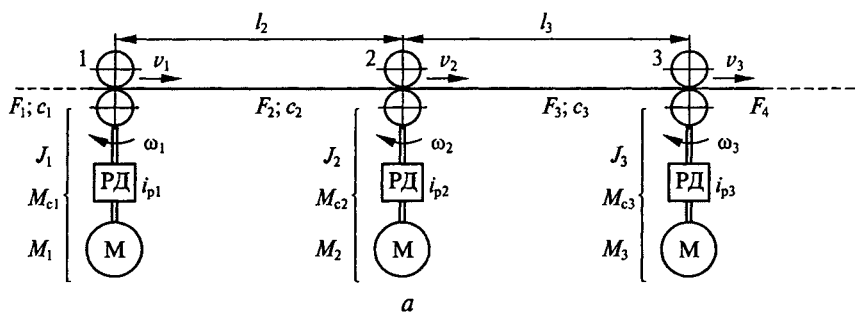


Рис. 4.73

Для простоты рассмотрения предполагается, что радиусы всех приводных валов одинаковы:

$$r_1 = r_2 = r_3 = r, \quad (4.111)$$

а упругие деформации в кинематической цепи «двигатель — приводной вал» каждого из электроприводов отсутствуют в рассматриваемой полосе частот.

Схема, показанная на рис. 4.73, *a*, является частью более общей схемы, поэтому действие на полотно приводных валов, предшествующих валу 1 и следующих за валом 3, учтено в виде их реакций  $F_1$  и  $F_4$ .

При рассмотрении динамических процессов в натянутом в межсекционном промежутке полотне делаются следующие допущения: полотно однородно и имеет по всей длине одинаковую толщину и ширину;

масса материала не влияет на его деформацию;

деформация в полотне имеет упругий характер, причем равномерно распределяется по поперечному сечению;

волновые процессы, связанные с распределением деформации по длине, несущественны;

проскальзывание движущегося полотна относительно приводных валов отсутствует.

Состояние полотна на участке растяжения длиной  $l_2$  (см. рис. 4.73, *a*) описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{d\varepsilon_2}{dt} = [v_2 - v_1(1 + \varepsilon_2)] \frac{1}{l_2}, \quad (4.112)$$

где  $\varepsilon_2 = \Delta l_2 / l_2$  — относительное удлинение ( $\Delta l_2$  — абсолютное значение растяжения);  $v_1$  и  $v_2$  — линейные скорости полотна в начале и в конце участка растяжения.

Натяжение, возникающее в материале,

$$F_2 = c_2 \Delta l_2 = c_2 l_2 \varepsilon_2, \quad (4.113)$$

где  $c_2$  — коэффициент жесткости полотна при растяжении.

Подставляя в (4.113) значение  $\varepsilon_2$  из уравнения (4.112) и записывая уравнение равновесия моментов в электроприводе 1 для случая, когда параметры электропривода приведены к приводному валу, получим систему уравнений

$$\begin{aligned} M_1 - M_{c1} + (F_2 - F_1)r - J_1 \omega_1 p &= 0; \\ v_1 &= \omega_1 r; \\ F_2 &= \frac{c_2}{p} [v_2 - v_1(1 + \varepsilon_2)]; \\ \varepsilon_2 &= F_2 / (c_2 l_2), \end{aligned} \quad (4.114)$$



где  $M_1$  и  $M_{c1}$  — моменты электродвигателя и сопротивлений, приведенные к приводному валу;  $J_1$  — приведенный момент инерции;  $p = d/dt$ .

Аналогично для электроприводов 2 и 3 (см. рис. 4.73, а):

$$\begin{aligned} M_2 - M_{c2} + (F_3 - F_2)r - J_2\omega_2 p &= 0; \quad v_2 = \omega_2 r; \\ F_3 &= \frac{c_3}{p} [v_3 - v_2(1 + \varepsilon_3)]; \quad \varepsilon_3 = F_3 / (c_3 l_3); \\ M_3 - M_{c3} + (F_4 - F_3)r - J_3\omega_3 p &= 0; \quad v_3 = \omega_3 r. \end{aligned} \quad (4.115)$$

В уравнениях (4.114) и (4.115) не учитываются коэффициенты внутреннего демпфирования  $\theta_2$  и  $\theta_3$  гибкого полотна. При движении полотна эффект замещения колеблющегося полотна неколеблущимся полотном на участке растяжения между двумя валами оказывает значительно большее демпфирующее влияние по сравнению с внутренним демпфированием полотна. Для малых скоростей движения полотна эти эффекты могут быть равноценными, тогда в уравнениях (4.114) и (4.115) следует записать:

$$F_2 = \left( \frac{c_2}{p} + \theta_2 \right) [v_2 - v_1(1 + \varepsilon_2)]; \quad (4.116)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{l_2} \frac{1}{c_2 + b_2 p} F_2; \quad (4.117)$$

$$F_3 = \left( \frac{c_3}{p} + \theta_3 \right) [v_3 - v_2(1 + \varepsilon_2)]; \quad (4.118)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{l_3} \frac{1}{c_3 + b_3 p} F_3. \quad (4.119)$$

Системы уравнений (4.114) и (4.115) являются нелинейными из-за наличия произведений  $v_1\varepsilon_2$  и  $v_2\varepsilon_3$ . Рассматривая для ССС переходные процессы в приращениях координат относительно начальных значений, можно записать системы уравнений в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta M_1 - \Delta M_{c1} + (\Delta F_2 - \Delta F_1)r - J_1\Delta\omega_1 p &= 0; \quad \Delta v_1 = \Delta\omega_1 r; \\ \Delta F_2 &= \frac{c_2}{p} [\Delta v_2 - \Delta v_1(1 + \varepsilon_{2\text{нач}}) - v_{1\text{нач}}\Delta\varepsilon_2]; \quad \Delta\varepsilon_2 = \frac{\Delta F_2}{c_2 l_2}; \\ \Delta M_2 - \Delta M_{c2} + (\Delta F_3 - \Delta F_2)r - J_2\Delta\omega_2 p &= 0; \quad \Delta v_2 = \Delta\omega_2 r; \\ \Delta F_3 &= \frac{c_3}{p} [\Delta v_3 - \Delta v_2(1 + \varepsilon_{3\text{нач}}) - v_{2\text{нач}}\Delta\varepsilon_3]; \quad \Delta\varepsilon_3 = \frac{\Delta F_3}{c_3 l_3}; \\ \Delta M_3 - \Delta M_{c3} + (\Delta F_4 - \Delta F_3)r - J_3\Delta\omega_3 p &= 0; \quad \Delta v_3 = \Delta\omega_3 r. \end{aligned} \quad (4.120)$$

где  $v_{1\text{нач}}$ ,  $v_{2\text{нач}}$  — начальные значения линейных скоростей движения полотна;  $\epsilon_{2\text{нач}}$ ,  $\epsilon_{3\text{нач}}$  — начальные значения относительных удлинений.

В связи с тем что начальные значения относительных удлинений  $\epsilon_{2\text{нач}}$ ,  $\epsilon_{3\text{нач}}$  значительно меньше 1, можно в уравнениях системы (4.120) считать справедливыми приближенные равенства:

$$(1 + \epsilon_{2\text{нач}}) \approx 1; (1 + \epsilon_{3\text{нач}}) \approx 1. \quad (4.121)$$

Структурная схема трех электроприводов постоянного тока, взаимосвязанных движущимся полотном, полученная на основании системы уравнений (4.120) с учетом (4.121) и дополненная структурными схемами локальных систем управления, взаимосвязанных по цепям задания общей скорости и соотношений скоростей, показана на рис. 4.73, б. На схеме приняты следующие обозначения:  $T_{\epsilon_2} = l_2/v_{1\text{нач}}$ ;  $T_{\epsilon_3} = l_3/v_{2\text{нач}}$  — постоянные времени, характеризующие скорость процесса изменения удлинения полотна на участках  $l_2$  и  $l_3$ ;  $k_2 = (c_2 l_2)/v_{1\text{нач}}$ ;  $k_3 = (c_3 l_3)/v_{2\text{нач}}$ ;  $i_{p1}$ ,  $i_{p2}$ ,  $i_{p3}$  — передаточные числа редукторов. Обозначения элементов структурных схем локальных систем управления применены такие же, как и в гл. 2, с учетом принятой на схеме рис. 4.73, а нумерации электроприводов. Для частотно-регулируемых ЭП с АД структурная схема аналогична. Различие заключается только в электромагнитных контурах регулирования моментов. В рассматриваемых системах следует применять векторное управление моментом двигателей.

### 4.8.3. Управление наматыванием и сматыванием материала при косвенном и непосредственном контроле натяжения [5]

В машинах и механизмах, предназначенных для перематывания полосовых материалов (листовой металл, бумага, различные пленки и т. п.), необходимо регулировать усилие в полосе, т. е. натяжение. В большинстве случаев точность поддержания натяжения (или регулирования его по заданному закону) влияет на качество продукта.

На рис. 4.74, а показана кинематическая схема намоточного устройства. Узел 1 представляет собой валки последней клетки стана холодной прокатки, последнюю секцию бумагоделательной машины или другой узел механизма, из которого полоса 2 выходит с постоянной скоростью. На намоточном устройстве она наматывается в рулон 3. Валки узла 1 и рулон приводятся во вращение электродвигателями, оборудованными собственными автоматическими системами управления. Система управления электроприводом валков узла 1 осуществляет обычно стабилизацию скорости. Задачей электропривода намоточного устройства является регулирование или поддержание натяжения. Если производится раз-

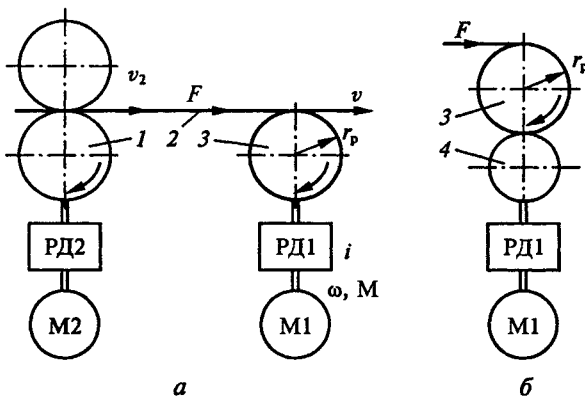


Рис. 4.74

матывание рулона, полоса движется в направлении, противоположном показанному на рис. 4.74, а, и двигатель намоточного устройства работает в режиме торможения.

Поскольку момент, развиваемый двигателем намоточного устройства, прикладывается к валу, на который наматывается полоса, скорость двигателя  $M1$ , которая должна обеспечиваться в каждый данный момент времени, определяется скоростью движения полосы  $v$  и текущим значением радиуса рулона  $r_p$ . В ряде механизмов, обычно когда устройство работает только в режиме намотки, момент двигателя прикладывается к несущему валу 4, на который опирается наматываемый рулон 3 (рис. 4.74, б). В этом случае при изменении радиуса  $r_p$  не требуется изменения скорости двигателя и при  $v = \text{const}$  задача системы управления электроприводом наматывающего устройства сводится к стабилизации скорости или момента.

Момент на валу наматывающего устройства

$$M = M_{\text{пол}} + M_{\text{пот}} + M_{\text{деф}} + M_{\text{дин}}, \quad (4.122)$$

где  $M_{\text{пол}}$  — полезный момент, т.е. момент, необходимый для создания заданного натяжения  $F$ ;  $M_{\text{пот}}$  — момент, необходимый для преодоления потерь в системе «двигатель—механизм»;  $M_{\text{деф}}$  — момент, затрачиваемый на деформацию изгиба полосы при наматывании рулона;  $M_{\text{дин}}$  — динамический момент, обусловленный ускорением и замедлением намоточного устройства при разгоне и торможении и изменением угловой скорости рулона, связанной с изменением его радиуса.

В зависимости от условий работы соотношения между этими моментами могут меняться. Полезный момент определяется значением усилия  $F$  и в ряде случаев значительно превышает значение момента потерь, что позволяет пренебречь влиянием после-

днего на работу системы. Момент  $M_{\text{деф}}$  тем меньше, чем тоньше перематываемая полоса металла; он практически равен 0 для материалов, имеющих малую жесткость, например для бумаги. Динамический момент будет рассмотрен ниже.

В процессе наматывания полезный момент

$$M_{\text{пол}} = Fr_p, \quad (4.123)$$

т. е. при постоянном усилии натяжения ( $F = \text{const}$ ) он прямо пропорционален радиусу рулона.

Полезная мощность

$$P_{\text{пол}} = Fv \quad (4.124)$$

при постоянном натяжении полотна независимо от радиуса пропорциональна скорости полосы.

Если двигатель вращает вал, на который наматывается рулон, через редуктор, то его скорость

$$\omega = vi/r_p, \quad (4.125)$$

где  $i$  — передаточное число редуктора.

Следовательно, при данном значении  $v$ , диапазон регулирования скорости двигателя равен диапазону изменения радиуса рулона.

Различают два способа управления натяжением: по регулируемому параметру, когда натяжение измеряется с помощью измерителя натяжения, выходное напряжение которого на входе замкнутой системы сравнивается с заданным значением; по косвенно определенному значению натяжения, т. е. по одной из величин, меняющихся в функции  $F$ , или по их комбинации.

Системы с косвенным измерением натяжения широко распространены, хотя их недостатком является необходимость введения поправки для учета статических потерь ( $M_{\text{пот}}$ ), а при перематывании толстой полосы — и момента, необходимого для изгиба полосы при наматывании и размотке ( $M_{\text{деф}}$ ). Последняя составляющая поддается учету, а вот учет потерь вследствие их неопределенности и сложной зависимости от многих факторов часто затруднителен. При работе с большими значениями натяжений потери составляют небольшую часть общей мощности и их изменение не заметно влияет на точность поддержания натяжения. При малых значениях натяжения роль потерь возрастает и погрешность от их неточного учета может оказаться значительной. С этой точки зрения наиболее перспективным является использование систем с прямым измерением натяжения.

Обычно даже натянутая полоса, проходящая между валками узла  $I$  и намоточным устройством (см. рис. 4.74,  $a$ ), провисает под действием собственного веса. Изменение натяжения приводит к изменению положения полосы в пространстве, что позволяет ис-

пользовать в качестве датчиков натяжения устройства, измеряющие отклонение положения полосы от заданного и преобразующие его в электрический сигнал. Другим распространенным способом измерения натяжения является измерение давления на подшипники со стороны валика, который огибает натянутая полоса. Давление преобразуется в электрический сигнал, например, с помощью магнитоупругого датчика, принцип действия которого основан на изменении магнитных свойств сердечника из электро-технической стали под действием давления на сердечник.

Выражения (4.123) и (4.124) могут служить основой для оценки возможностей построения системы с косвенным измерением натяжения. Если пренебречь разницей между моментом на валу двигателя и полезным моментом, считая, что влияние трех последних слагаемых в выражении (4.122) ничтожно мало или будет скомпенсировано, а также пренебречь потерями вращения электродвигателя  $M_1$ , то электромагнитный момент двигателя

$$M_{эм} = Fr_p/i \quad (4.126)$$

или

$$M_{эм} = c_d \Phi i_d. \quad (4.127)$$

В результате сравнения этих выражений может быть сформулирован наиболее распространенный закон косвенного регулирования натяжения: при заданном постоянном натяжении  $F$  надо поддерживать постоянным якорный ток, меняя поток возбуждения двигателя пропорционально радиусу рулона.

Другой способ косвенного регулирования натяжения состоит в регулировании полезной мощности, которая должна поддерживаться постоянной при данной скорости и натяжении и изменяться при изменении  $v$  или заданного натяжения. Для этого измеряют и регулируют электромагнитную мощность двигателя, воздействуя на напряжение преобразователя; эта мощность считается примерно равной полезной. В ряде случаев для уменьшения значения мощности двигателя наматывающего устройства целесообразно применять комбинированное управление, когда при изменении радиуса рулона от минимального значения до 65... 80 % максимального скорость двигателя изменяется за счет воздействия на его магнитный поток при постоянном напряжении, а оставшаяся часть диапазона изменения радиуса рулона «покрывается» за счет изменения напряжения при постоянном магнитном потоке двигателя.

В зависимости от назначения механизма и характера технологического процесса разгон и торможение могут быть или не быть рабочими режимами. Например, на бумагоделательной машине заправка бумаги на наматывающее устройство производится на полной рабочей скорости и нет необходимости поддерживать натяжение постоянным в процессе изменения скорости в широких преде-

лах. На других механизмах (например, на станах холодной прокатки, продольно-резательных станках для бумаги и др.) заправка полосы производится при неподвижном механизме или на низкой заправочной скорости. В процессе разгона и торможения осуществляется перематывание полосы и должно поддерживаться заданное натяжение. В этом случае при разработке системы управления натяжением необходимо знать закон изменения динамического момента. Динамический момент на валу двигателя М1 (см. рис. 4.74, а)

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (4.128)$$

где  $J$  — момент инерции вращающихся частей наматывающего устройства вместе с рулоном, приведенный к двигателю;  $\omega$  — угловая скорость двигателя.

Учитывая, что  $v = \omega r_p / i$ , и, следовательно,

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{i}{r_p} \frac{dv}{dt} - \frac{vi}{r_p^2} \frac{dr_p}{dt}, \quad (4.129)$$

можно записать:

$$M_{\text{дин}} = M_{\text{дин1}} + M_{\text{дин2}}.$$

Составляющая  $M_{\text{дин1}}$  обусловлена необходимостью создания ускорения  $dv/dt$  при данном радиусе рулона  $r_p$ :

$$M_{\text{дин1}} = \frac{Ji}{r_p} \frac{dv}{dt}. \quad (4.130)$$

Значение  $J$  в этой формуле зависит от  $r_p$ .

Составляющая  $M_{\text{дин2}}$ , обусловленная изменением  $r_p$ , определяется выражением

$$M_{\text{дин2}} = -\frac{Jvi}{r_p^2} \frac{dr_p}{dt}. \quad (4.131)$$

Момент инерции рулона включает в себя неизменный момент инерции вращающихся частей механизма и двигателя  $J'$  и меняющийся с изменением радиуса рулона момент инерции наматываемого (разматываемого) рулона:

$$J'' = mr^2/i^2, \quad (4.132)$$

где  $m$  — масса материала в рулоне, кг;  $\rho$  — радиус инерции рулона.

Масса

$$m = q \cdot 10^3 \pi (r_p^2 - r_{p\text{min}}^2) B, \quad (4.133)$$

где  $q$  — удельная плотность, т/м<sup>3</sup>;  $r_p$  — текущий радиус вала, на который наматывается материал;  $B$  — ширина материала.

Квадрат радиуса инерции рулона

$$\rho^2 = (r_p^2 + r_{p\min}^2)/2.$$

Тогда

$$J = J' + J'' = \frac{q \cdot 10^3 \pi B}{2i^2} r_p^4 + J_0. \quad (4.134)$$

Здесь

$$J_0 = J' - q \cdot 10^3 \pi B r_{p\min} / (2i^2). \quad (4.135)$$

Составляющие динамического момента на основании (4.130) и (4.131) будут определяться в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} M_{\text{дин1}} &= \left( \frac{q \cdot 10^3 \pi B}{2i} r_p^3 + \frac{J_0 i}{r_p} \right) \frac{dv}{dt}; \\ M_{\text{дин2}} &= - \left( \frac{q \cdot 10^3 \pi B}{2i} r_p^2 v + \frac{J_0 v i}{r_p^2} \right) \frac{dr_p}{dt}. \end{aligned} \quad (4.136)$$

Связь между радиусом рулона и скоростью перематывания может быть установлена, если записать выражение для изменения объема рулона  $\Delta Q_p$  за время  $t$ , в течение которого радиус рулона меняется от  $r_{p\text{нач}}$  до  $r_p$ :

$$\Delta Q_p = \pi (r_p^2 - r_{p\text{нач}}^2) B. \quad (4.137)$$

Эту величину можно выразить также и через толщину полосы  $\delta$ , ее ширину  $B$  и длину перематанного за время  $t$  материала

$$l = \int_0^t v dt;$$

$$\Delta Q_p = B \delta \int_0^t v dt. \quad (4.138)$$

Из (4.137) и (4.138) следует, что текущее значение радиуса рулона

$$r_p = \sqrt{r_{p\text{нач}}^2 + \frac{\delta}{\pi} \int_0^t v dt}, \quad (4.139)$$

а его производная

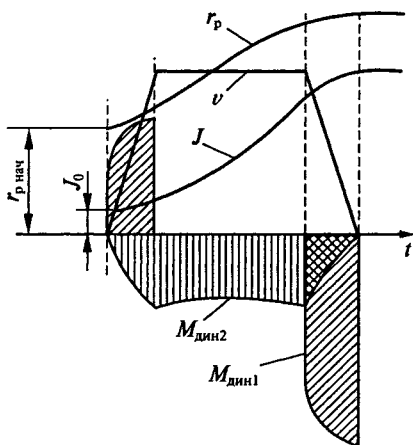


Рис. 4.75

$$\frac{dr_p}{dt} = \frac{\delta v}{2\pi \sqrt{r_p^2 \text{нГ} + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)' \int_0^t v dt}} = \frac{\delta v}{2\pi r_p}. \quad (4.140)$$

После подстановки (4.140) в уравнение для  $M_{\text{дин}2}$  из системы уравнений (4.136) получим

$$M_{\text{дин}2} = - \left( \frac{q \cdot 10^3 \pi B}{2i} r_p + \frac{J_0 i}{r_p^3} \right) \frac{\delta}{2\pi} v^2. \quad (4.141)$$

При разматывании, когда знак  $dr_p/dt$  отрицателен, знак  $M_{\text{дин}2}$  меняется на обратный.

Выражения (4.134...4.141) позволяют при известных  $r_{p \text{нач}}$ ,  $\delta$ ,  $J_0$ ,  $q$ ,  $B$  и заданном характере изменения скорости во времени рассчитать зависимости изменения радиуса рулона, момента инерции и динамических моментов от времени (рис. 4.75).

#### 4.8.4. Системы управления соотношениями скоростей и натяжений материала

В прокатном производстве получение тонкостенных фасонных профилей (двутавровые балки, швеллеры с параллельными полками и др.) на сортовых станах горячей прокатки возможно только в непрерывных группах клетей без образования петли металла. Средства непосредственного измерения усилий растяжения или сжатия металла при его одновременном нахождении в нескольких клетях отсутствуют вследствие невозможности установить датчики горизонтальных усилий. Наиболее перспективным является метод косвенного измерения и регулирования межклетьевых натяжений, основанный на использовании модели объекта с доступными измерениям энергосиловыми параметрами прокатки (токи или моменты движений главных приводов, усилия нажатия металла на валки).

Вычислительный алгоритм косвенного измерения межклетьевых удельных натяжений  $\sigma_i$  реализуется при непрерывном измерении моментов приводов  $M_i$  и усилий прокатки  $F_i$  с фиксированием этих значений после захвата металла каждой клетью (фиксированные значения отмечены \*):

$$\Delta M_i = M_{\Phi i} - M_i + (R_i/R_{i-1}) \Delta M_{i-1}; \quad (4.142)$$

$$M_{\Phi i} = M_{\Phi i}^* (F_i/F_i^*); \quad (4.143)$$

$$M_{\Phi i}^* = M_{i-1}^* - \Delta M_{i-1}^* (R_i/R_{i-1}); \quad (4.144)$$

$$\sigma_i = \Delta M_i / (Q_i R_i), \quad (4.145)$$



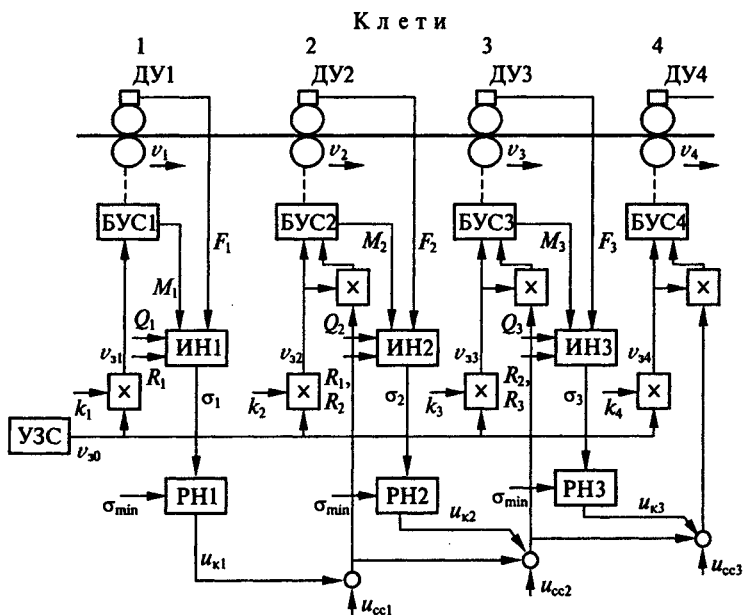


Рис. 4.76

где  $i$  — номер клетки;  $\Delta M_i$  — изменение момента привода, вызванного усилием натяжения;  $M_i$ ,  $M_{\phi i}$  — соответственно полный момент привода и момент, затрачиваемый на деформацию металла (собственно прокатку);  $R_i$  — радиус вала;  $Q_i$  — сечение проката.

После захвата металла клетью 1 (рис. 4.76) (до захвата клетью 2) можно измерить  $M_1^*$  и  $F_1^*$ . После захвата металла клетью 2 (до захвата клетью 3) производится измерение текущих значений  $M_1$  и  $F_1$  и фиксированных  $M_2^*$  и  $F_2^*$ , а также вычисления

$$\Delta M_1 = M_{\phi 1} - M_1; \quad (4.146)$$

$$M_{\phi 1} = M_{\phi 1}^* (F_1 / F_1^*); \quad (4.147)$$

$$\sigma_1 = \Delta M_1 / (Q_1 R_1). \quad (4.148)$$

После захвата металла клетью 3 (до захвата клетью 4) производится измерение текущих значений  $M_1$ ,  $F_1$ ,  $M_2$ ,  $F_2$  и фиксированных  $M_3^*$  и  $F_3^*$ , а также вычисления

$$\Delta M_1 = M_{\phi 1} - M_1; \quad M_{\phi 1} = M_{\phi 1}^* (F_1 / F_1^*); \quad (4.149)$$

$$\sigma_1 = \Delta M_1 / (Q_1 R_1); \quad (4.150)$$

$$\Delta M_2 = M_{\phi 2} - M_2 + (R_2 / R_1) \Delta M_1; \quad (4.151)$$

$$M_{\phi 2} = M_{\phi 2}^*(F_2/F_2^*); \quad (4.152)$$

$$M_{\phi 2}^* = M_2^* - \Delta M_1^*(R_2/R_1); \quad (4.153)$$

$$\sigma_2 = \Delta M_2/(Q_2 R_2), \quad (4.154)$$

причем  $\Delta M_1^*$  — значение  $\Delta M_1$ , зафиксированное в момент измерения  $M_2^*$ . Измерения значений межклетевых натяжений в остальных межклетевых промежутках выполняют аналогично описанному.

Одновременно с появлением межклетевых натяжений начинают действовать соответствующие контуры регулирования с отработкой рассогласования по схеме согласованного управления скоростным режимом клеток. Принцип согласованного управления скоростным режимом клеток, в соответствии с которым задается соотношение скоростей клеток, следует из условия сохранения секундного объема металла:

$$\omega_i/\omega_{i-1} = \lambda_i R_{i-1}(1 + S_{i-1})/[R_i(1 + S_i)], \quad (4.155)$$

где  $\lambda_i$  — вытяжка  $i$ -й клетки;  $S_i$  — опережение металла в зоне деформации.

При относительном изменении скорости одной из клеток относительное изменение скорости второй клетки должно быть таким же.

В схеме системы управления непрерывной группой клеток с регулированием соотношений скоростей и межклетевых натяжений (см. рис. 4.76) измерители натяжений ИН1...ИН3 в соответствии с изложенным выше алгоритмом вычисляют значения удельных натяжений  $\sigma_1... \sigma_3$ . Измерение усилий выполняется с помощью датчиков усилий ДУ1...ДУ3. Заданные значения удельных натяжений  $\sigma_{\min}$  обеспечивают минимальные уровни натяжений, не приводящие к деформациям металла в межклетевом промежутке. Регуляторы натяжения РН1...РН3 формируют сигналы коррекции значений  $u_{k1}... u_{k3}$ , приводящие к изменению скоростей клеток и соответственно межклетевых натяжений. Сигналы коррекции  $u_{ki}$  суммируются с сигналами задания соотношения скоростей  $u_{cc1}... u_{cc3}$  и через модуль преобразования МП формируют абсолютное значение скорректированной скорости клетки. Регуляторы натяжений, как правило, должны иметь интегральные составляющие в алгоритме регулирования.

#### 4.8.5. Система управления продольно-резательным станком

При перематке бумажного полотна с рулона Р1 (рис. 4.77, а) на несколько рулонов Р2 происходит продольное резание полотна на мерные полосы дисковыми ножами Н. Число ножей на единицу меньше числа полос бумаги. Управление линейной скорос-

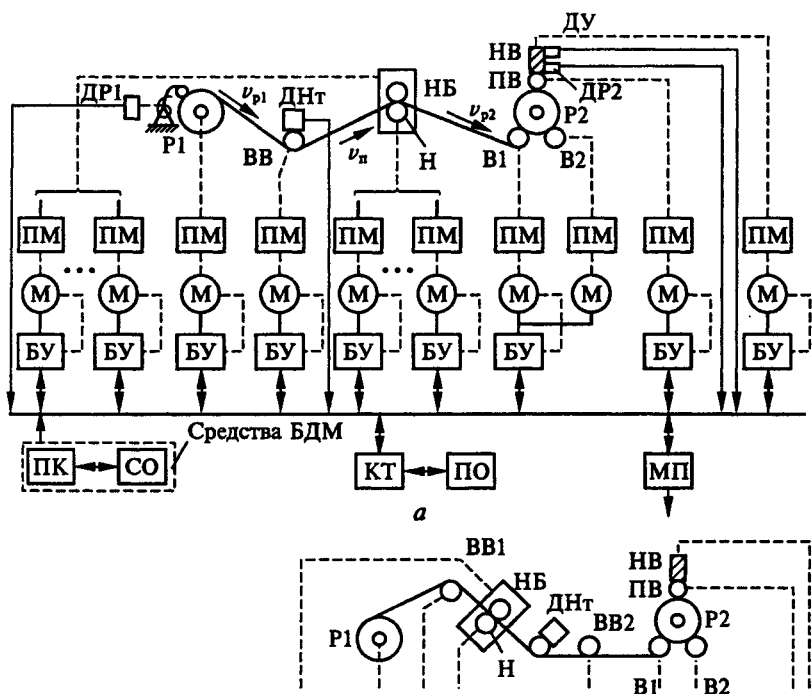


Рис. 4.77

б

тью движения полотна  $v_n$  производится с помощью механизма периферического наката, имеющего валы В1 и В2 постоянного диаметра, к которым с помощью прижимного вала ПВ и нажимного винта НВ прижимаются рулоны Р2.

Для того чтобы обеспечить оптимальную скорость резания  $v_p$ , все ножи Н синхронно вращаются с частотой  $\omega_n$ , при которой  $v_p = v_n - r_n \omega_n$ , где  $r_n$  — радиусы ножей. Для большей стабилизации скорости движения полотна в зоне резания применяют вращающийся бумаговедущий вал ВВ или два бумаговедущих вала ВВ1, ВВ2 (рис. 4.77, б). Нужная ширина полос разрезанной бумаги обеспечивается с помощью механизмов позиционирования ножей, находящихся в ножевом блоке НБ.

Для контроля технологических переменных используются датчики: радиусов рулонов ДР1 и ДР2 (см. рис. 4.77, а), натяжения полотна ДНт, усилия прижатия ДУ. Скорость движения полотна контролируется датчиками скорости комплектных электроприводов.

Система управления продольно-резательным станком включает в себя следующие сепаратные системы управления: натяжением полотна; скоростью полотна и, соответственно, частотами вращения валов ВВ, В1 и В2, ПВ и ножей; усилием нажимных винтов; положением ножей.

Системы управления натяжением и скоростью движения полотна  $v_n$  выполнены как двухконтурные с регуляторами токов и соответственно с регулятором натяжения и регулятором скорости. В режиме заправки полотна временно включается система управления частотой вращения рулона P1.

Продольно-резательный станок является типичным технологическим агрегатом циклического действия, в котором реализуются два вида алгоритмов управления: регулирование электромагнитных, механических и технологических переменных с заданной точностью, определяющейся технологией и производительностью; реализация этапов технологического цикла, сводящаяся к выработке задающих воздействий на отдельные системы управления.

Временные диаграммы изменений скорости  $v_n$  и натяжения  $F_n$  в течение цикла  $T_n$  показаны на рис. 4.78. Этапами цикла являются:  
 разгон механизмов станка до скорости заправки полотна  $v_{n,запр}$ ;  
 заправка полотна на тамбурные валы рулонов P2;  
 кратковременная остановка станка для переключения системы управления рулоном P1 от управления скоростью на управление натяжением;

натяжение полотна до заданных значения  $F_{n,з}$ ;

разгон механизмов станка с натянутым полотном до рабочей номинальной скорости  $v_{n,н}$ ;

обработка полотна при заданных скорости резания  $v_{p,з}$  и натяжении  $F_{n,з}$ ;

остановка станка после того, как на рулонах P2 будет намотано полотно заданной длины  $l_{п.з}$ .

После удаления намотанных рулонов P2 цикл повторяется. Работа станка продолжается до тех пор, пока не завершится перемотка рулона P1, т. е. радиус рулона  $r_{p1}$  не станет равным радиусу тамбурного вала  $r_{т.в1}$ . Далее устанавливается новый рулон P1 и работа станка продолжается.

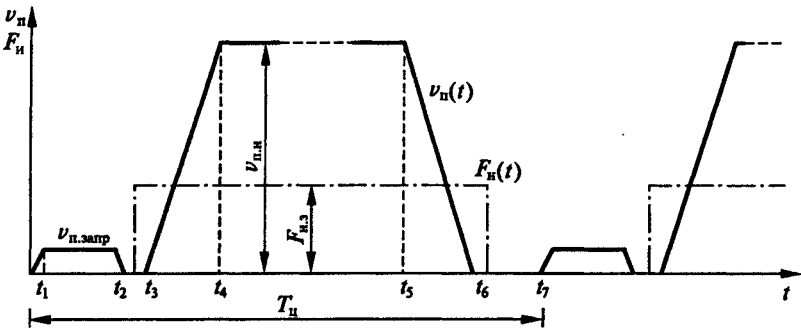


Рис. 4.78

Схема алгоритма управления станком, предусматривающая режим аварийного торможения в случае обрыва полотна, показана на рис. 4.79. Реализация алгоритмов управления этапами технологического цикла возможна только в том случае, когда реализова-

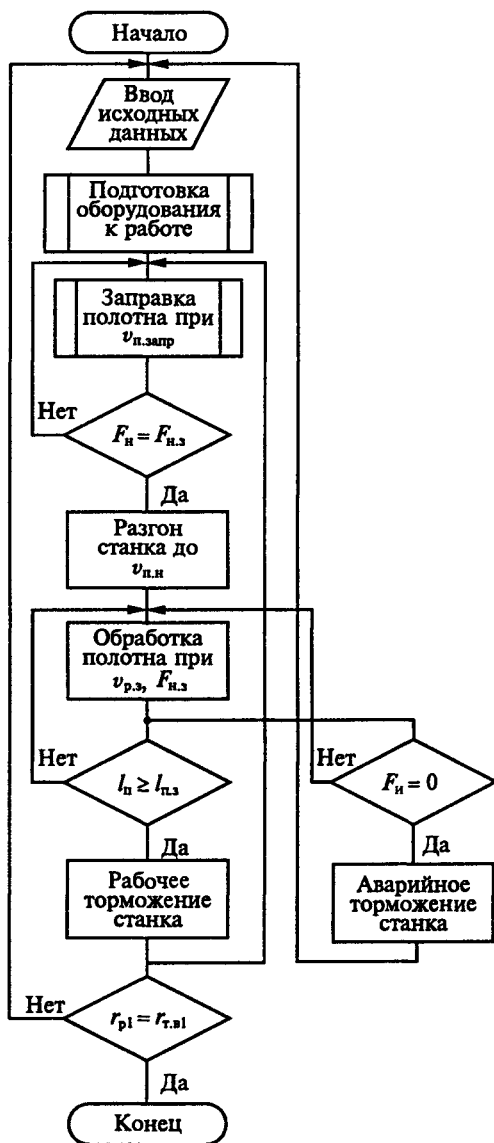


Рис. 4.79

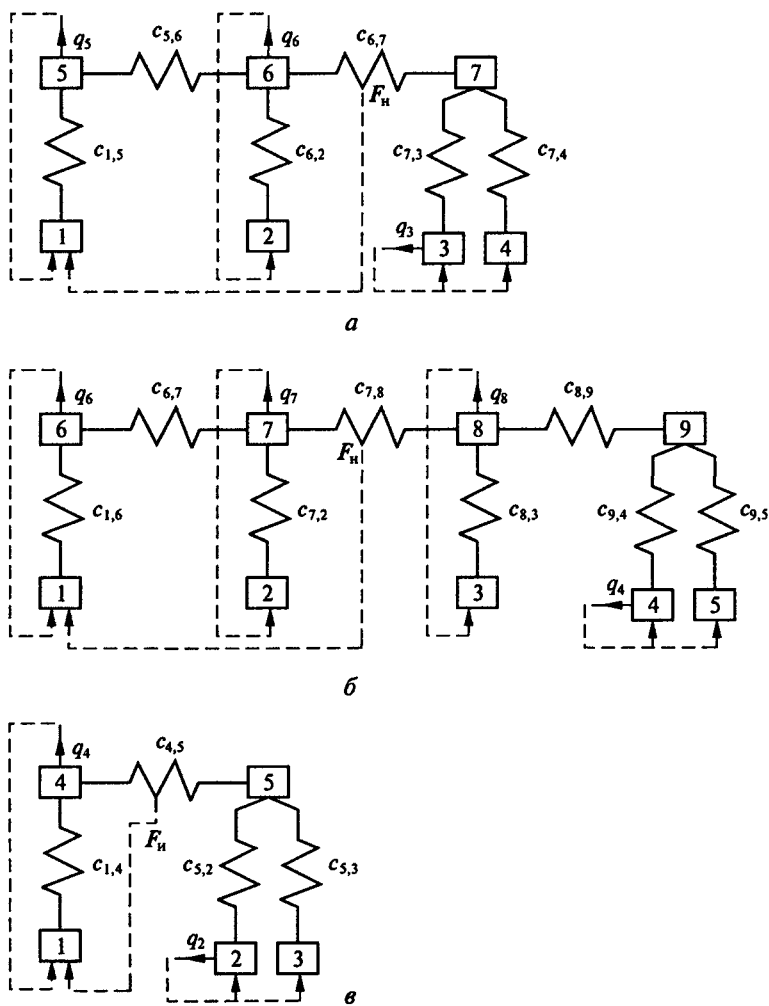


Рис. 4.80

но управление всеми переменными, обозначенными выше, в соответствии с заданием.

Центральной задачей управления переменными является стабилизация переменных  $v_n$  и  $F_n$  на этапе обработки полотна с учетом взаимосвязей механизмов станка через натянутое полотно.

Основные возмущения в зоне резания возникают при вращении рулонов. Они описываются волновыми процессами:

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^S (c_k \sin \omega_k t + c'_k \cos \omega_k t), \quad (4.156)$$

где  $\omega_k$  — преимущественный спектральный состав возмущений.

Изменяющиеся случайным образом коэффициенты  $c_0, c_k, c_k'$  отражают меру неопределенности в описании возмущений.

Частоты  $\omega_k$  являются переменными, так как при изменении радиусов рулонов  $r_{p1}$  и  $r_{p2}$  соответственно меняются частоты вращения рулонов  $\omega_{p1}$  и  $\omega_{p2}$ .

Упомянутая центральная задача решается использованием динамической декомпозиции, алгоритмов управления переменными, имеющими интегральные составляющие, и применением активных механических узлов, обеспечивающих снижение возмущений в зоне резания.

Динамическая декомпозиция выполняется так же, как изложено в п. 1.6. Управление переменными осуществляется с использованием И-, ПИ-, ПИД-регуляторов. Активными механическими узлами являются бумаговедущие валы (см. рис. 4.77, а, б) с сепаратными системами регулирования их скоростей.

Механические модели систем станка совместно с контурами регулирования производных обобщенных координат и упругой силы (натяжения) в зоне резания показаны на рис. 4.80. Система с одним ведущим валом (см. рис. 4.80, а) подавляет возмущения, идущие от рулона P1 (см. рис. 4.77). Система с двумя ведущими валами (см. рис. 4.80, б) подавляет возмущения, идущие от рулонов P1 и P2. Такие системы применяют при повышенных требованиях к качеству резания. При отсутствии ведущих валов (см. рис. 4.80, в) зона резания открыта для возмущений и все возможности по уменьшению динамических ошибок по скорости и натяжению могут быть связаны только с регуляторами. Эти возможности сохраняются и в двух других вариантах систем станка.

У станка, не имеющего ведущих валов, вместо ВВ с системой регулирования скорости (см. рис. 4.77, а) имеется пассивный вал, обеспечивающий совместно с ДНт измерение натяжения в зоне резания.

Механическая модель станка (схемы) с учетом упругих свойств электроприводов и натянутого неподвижного полотна показана на рис. 4.81, а, б ( $c$  — жесткость;  $b$  — коэффициент демпфирования). Все параметры системы приведены к вращательным движениям и механизмам станка. При движении полотна, кроме внутреннего демпфирования, проявляется скоростное демпфирование, и усилие натяжения  $F_n$  определяется по формулам:

$$F_n = \left( \frac{c_n}{p} + b_n \right) [v_{p2} - v_{p1} (1 + \varepsilon)]; \quad \varepsilon = \frac{1}{L_n} \frac{1}{c_n + b_n p} F_n, \quad (4.157; 4.158)$$

где  $\varepsilon$  — относительное удлинение полотна (остальные переменные объяснены в п. 4.8.2).

Поскольку на раскате применяются безредукторные приводы, упругими деформациями в приводе 1 можно пренебречь. Механи-

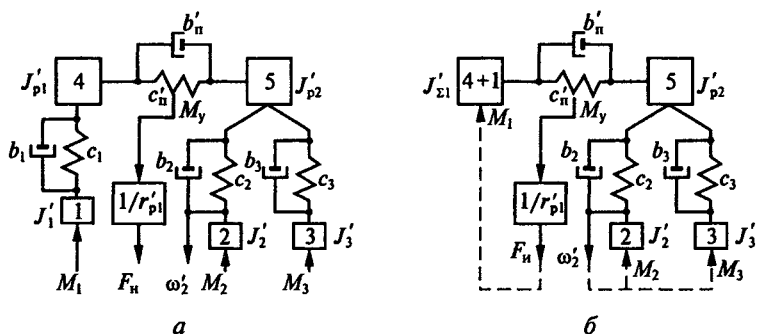


Рис. 4.81

ческая модель для этого случая с учетом обратных связей по натяжению  $F_n$  и частоте вращения  $\omega'_2$  вала В1 показана на рис. 4.81, б. Расчет собственных частот колебаний механической системы выполняется на ПК. Предварительную оценку значений частот колебаний получают из приближенных формул, которые могут быть записаны при условии  $J'_2 \approx J'_3 \ll J_{p2}$ .

Взаимосвязанная электромагнитная подсистема может быть рассмотрена только применительно к приводам рулонов Р2, в которых управление электроприводами валов В1 и В2 производится от одного управляемого преобразователя. В системе применяется регулирование тока преобразователя  $i_\Sigma$ . Эквивалентная схема электромагнитной подсистемы совместно с контуром регулирования тока преобразователя показана на рис. 4.82.

Структурная схема системы управления станком приведена на рис. 4.83. Математические описания системы выполнены аналогично описаниям, приведенным в п. 4.8.2. Исходными данными к синтезу системы являются данные станка, комплектных электроприводов и датчиков, параметры упругих свойств полотна и механической части приводов, режимы работы станка, характеристики управляющих и возмущающих воздействий.

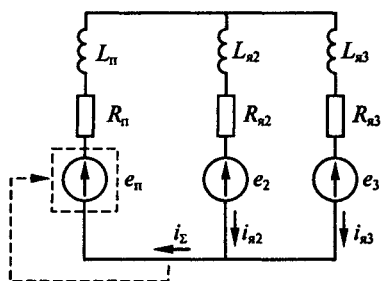


Рис. 4.82



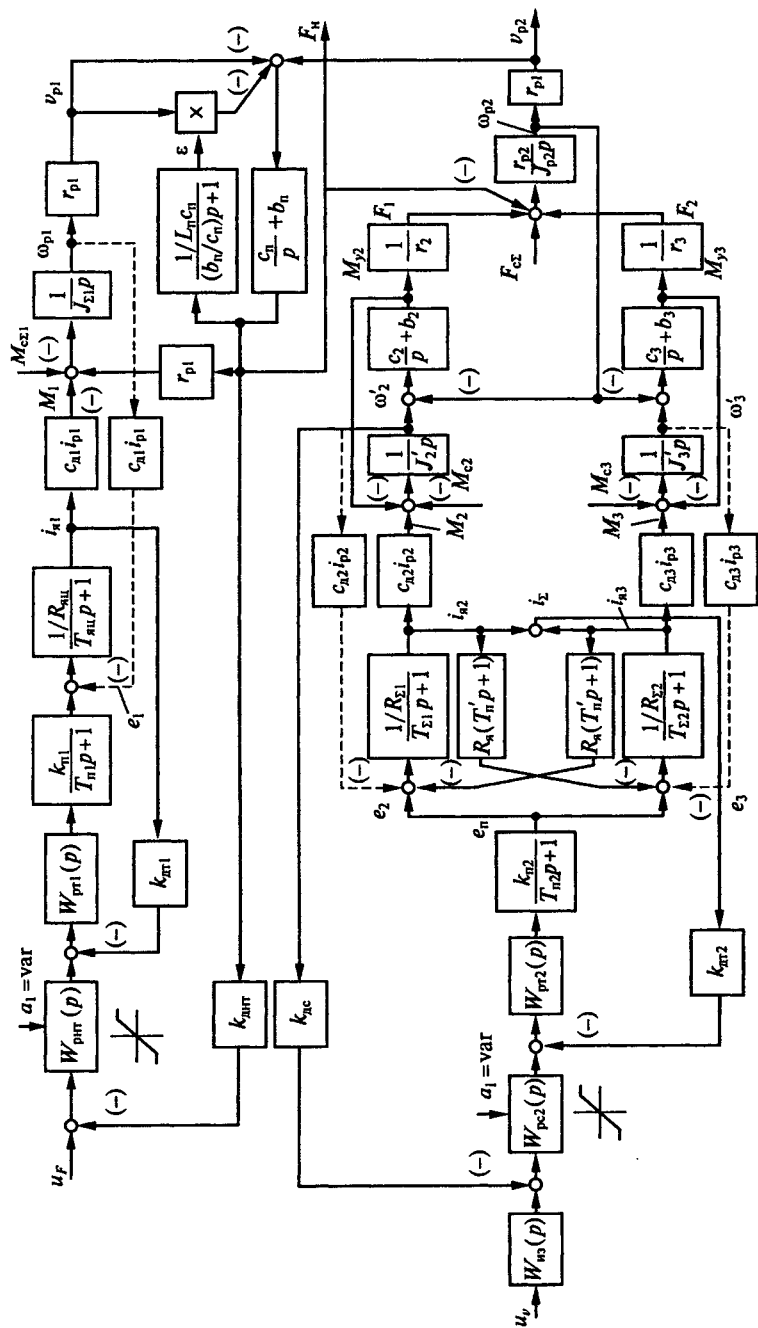


Рис. 4.83

## 4.9. Состав и свойства систем управления промышленными манипуляторами

### 4.9.1. Принципы построения систем управления электроприводами манипуляторов

Системы управления электроприводами манипулятора обеспечивают движение исполнительного органа (схвата) по заданной пространственной траектории путем управления движением отдельных звеньев манипулятора. Каждое звено оснащается электроприводом и датчиками для контроля перемещений. Задание на движение звеньев осуществляется от УЧПУ. На рис. 4.84 и 4.85 показаны функциональные схемы систем управления движением звеньев трехзвенных манипуляторов двух типов, в которых выделены только переносные координаты. Задающие воздействия  $q_{13}$ ,  $q_{23}$ ,  $q_{33}$  поступают на блоки управления БУ1... БУ3 электроприводами М1... М3.

Передаточные механизмы ПМ1... ПМ3 обеспечивают реализацию требуемого вида движения (линейного или углового) звеньев. Это движение определяется обобщенными координатами  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ . Датчики положения звеньев можно устанавливать на электродвигателях и звеньях манипулятора.

В манипуляторе первого типа (см. рис. 4.84) на неподвижном основании 1 размещается колонна 2, которая совершает угловые движения  $\varphi$  и вертикальные линейные движения  $z$  с помощью электродвигателей и передаточных механизмов, находящихся на основании. На колонне установлена рука 3, которая с помощью электродвигателя М3 совершает горизонтальные линейные движения  $r$  схвата 4 с грузом 5. Точкой  $P$  отмечен центр массы схвата с грузом. Работа манипулятора происходит в цилиндрической системе координат.

В манипуляторе второго типа (см. рис. 4.85) на неподвижном основании 1 установлена колонна 2, совершающая угловые дви-

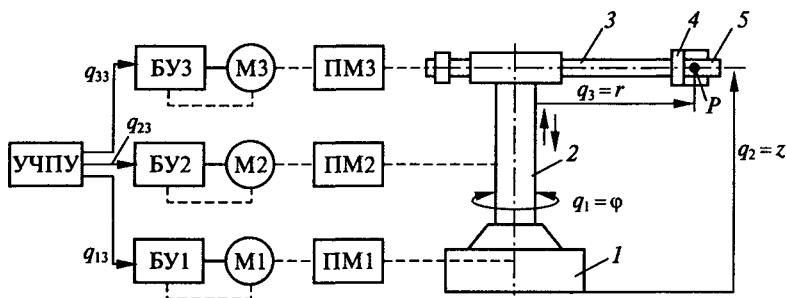


Рис. 4.84

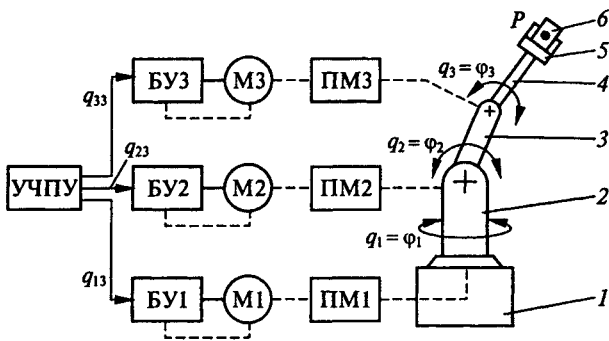


Рис. 4.85

жения  $\varphi_1$  вокруг вертикальной оси, а звенья 3 и 4 совершают угловые движения  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  вокруг осей, перпендикулярных плоскости рисунка.

Программирование траектории движения схвата 5 с грузом 6 выполняется в неподвижной системе координат основания. Вектор обобщенных координат схвата как функция времени технологического процесса  $q_c(t)$  (рис. 4.86) формируется через вектор обобщенных координат звеньев манипулятора, который в жесткой механической системе является вектором обобщенных координат приводов  $q_n(t)$ . Векторы  $q_c(t)$  и  $q_n(t)$  связаны между собой отображением преобразования координат  $T$ , содержание которого устанавливается из решения прямой задачи кинематики манипулятора. УЧПУ вырабатывает вектор задающих обобщенных координат приводов  $q_{пз}(t)$ , который связан с вектором задающих обобщенных координат схвата манипулятора  $q_{сз}(t)$  обратным отображением преобразования координат  $T^{-1}$ . Содержание  $T^{-1}$  устанавливается из решения обратной задачи кинематики манипулятора.

Реализуя системы управления движением манипуляторов, стремятся к тому, чтобы инерционные свойства приводов и звеньев не вносили искажения в заданные траектории движения схвата. С этой целью применяют комплектные электроприводы, обладающие большой полосой пропускания (сервоприводы). Однако динамические свойства манипулятора как объекта управления не позволяют это сделать однозначно, рассматривая системы управления звеньями манипулятора как автономные системы. Из-за наличия кориолисовых и центробежных сил инерции для ряда схем манипуляторов возникают динамические взаимосвязи звеньев, что необходимо учитывать при проектировании систем управления.

В общем случае динамические свойства манипулятора характеризуются матрицей  $W_m(p, q_n)$ , в соответствии с которой вы-

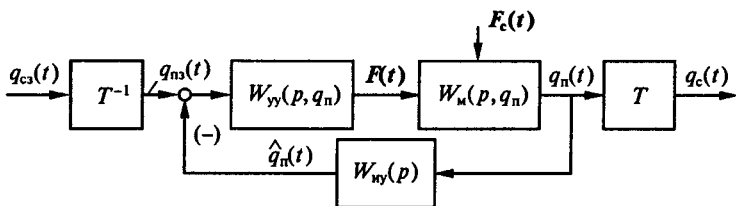


Рис. 4.86

полняется синтез матрицы управляющих устройств  $W_{yy}(p, q_n)$ . В обобщенной матричной структурной схеме системы управления схватом манипулятора (см. рис. 4.86)  $F(t)$ ,  $F_c(t)$  — векторы сил, приложенных к звеньям манипулятора и сопротивлений;  $\hat{q}_n(t)$  — вектор измеренных значений обобщенных координат приводов;  $W_{ny}(p)$  — матрица информационных устройств. Кроме главных обратных связей по обобщенным координатам приводов, в системе могут быть обратные связи по промежуточным координатам, выполненные в соответствии с принципами подчиненного управления.

#### 4.9.2. Уравнения кинематики и динамики манипуляторов

**Уравнения кинематики манипуляторов.** Прямая и обратная задачи кинематики формулируются следующим образом.

*Прямая задача.* Задана кинематическая схема манипулятора, и в некоторый момент времени известны значения обобщенных координат, определяющих положение всех звеньев манипулятора друг относительно друга. Требуется определить положение и ориентацию схвата в системе отсчета, связанного с основанием.

*Обратная задача.* Задана кинематическая схема манипулятора и известны положения и ориентация схвата в системе координат основания. Требуется определить значения обобщенных координат, которые обеспечивают заданное положение схвата.

Кинематическая схема манипулятора первого типа показана на рис. 4.87, а. Если координаты точки  $P$  в неподвижной системе координат основания  $0x_0y_0z_0$  (направления осей определены ортами  $i_x, i_y, i_z$ ) обозначены  $x_p, y_p, z_p$ , то получим простейшие уравнения прямой задачи в следующем виде:

$$x_p = r \cos \varphi; \quad y_p = r \sin \varphi; \quad z_p = z. \quad (4.159)$$

Уравнения обратной задачи имеют вид:

$$r = \sqrt{x_p^2 + y_p^2}; \quad (4.160)$$

$$\varphi = \arctg(y_p/x_p); \quad (4.161)$$

$$z = z_p. \quad (4.162)$$

Для некоторой траектории движения точки  $P$  эти уравнения могут быть записаны через обобщенные координаты и параметры траектории. Рассматривая прямолинейное движение точки  $P$  в плоскости  $0x_0y_0$  (рис. 4.87, б) начиная от точки  $a$  с координатами  $h, \alpha$  и обозначив перемещение  $s(t)$ , имеем для обратной задачи

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{h^2 + s(t)^2}; \\ \varphi &= \alpha + \operatorname{arctg}[s(t) / h]. \end{aligned} \quad (4.163)$$

Последовательно дифференцируя уравнения (4.163), получим скорости и ускорения:

$$\begin{aligned} \dot{r} &= \frac{s(t)\dot{s}(t)}{\sqrt{h^2 + s(t)^2}}; & \dot{\varphi} &= \frac{h\dot{s}(t)}{h^2 + s(t)^2}; \\ \ddot{r} &= \frac{h^2s(t)^2 + [h^2 + s(t)^2]s(t)\ddot{s}(t)}{\sqrt{[h^2 + s(t)^2]^3}}; \\ \ddot{\varphi} &= \frac{[h^2 + s(t)^2]\ddot{s}(t) - 2s(t)\dot{s}(t)^2}{[h^2 + s(t)^2]^3} h. \end{aligned} \quad (4.164)$$

Условия ограничения координат и их производных запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} r_{\min} \leq r \leq r_{\max}; & \quad \varphi_{\min} \leq \varphi \leq \varphi_{\max}; \quad \dot{\varphi}_{\min} \leq \dot{\varphi} \leq \dot{\varphi}_{\max}; \\ |\dot{r}| \leq \dot{r}_{\max}; & \quad |\ddot{r}| \leq \ddot{r}_{\max}; \quad |\dot{\varphi}| \leq \dot{\varphi}_{\max}; \quad |\ddot{\varphi}| \leq \ddot{\varphi}_{\max}. \end{aligned} \quad (4.165)$$

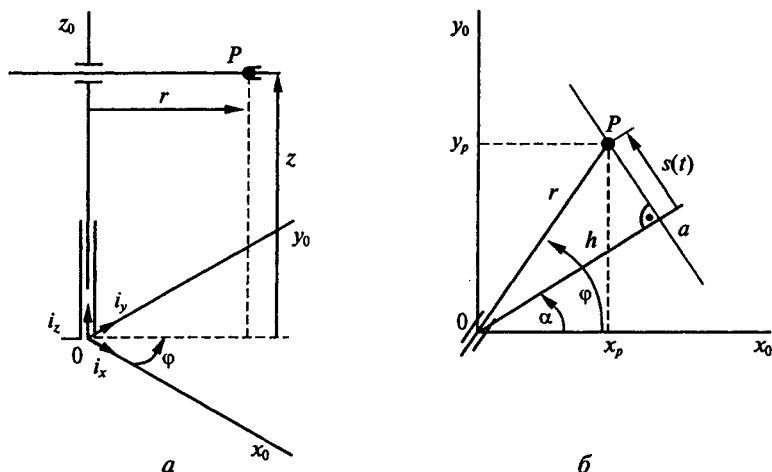


Рис. 4.87

Задавшись аналитическим видом  $s(t)$  и выполнив подстановки в уравнениях (4.164), можно получить предельные значения модулей скоростей и ускорений по степеням подвижности манипулятора. Так, при равномерном движении с постоянной скоростью  $v$  имеем  $s(t) = s_0 + vt$ .

Предельные значения:

$$|\dot{r}|^* = v; \quad |\dot{\phi}|^* = v/r_{\min}; \quad (4.166)$$

$$|\ddot{r}|^* = v^2/(r_{\min}); \quad (4.167)$$

$$|\ddot{\phi}|^* = \sqrt{3}v^2/(2r_{\min}^2). \quad (4.168)$$

Они должны удовлетворять условиям (4.165). Рассчитанные для конкретных значений предельные значения используются для выбора приводов по скорости, моменту и мощности.

Кинематическая схема манипулятора второго типа показана на рис. 4.88. При такой схеме невозможно записать уравнения кинематики для прямой и обратной задач столь просто, как ранее. В этом случае используются различные координатные системы для отдельных звеньев, разметка осей которых выполняется по определенным правилам. Выполняя действия переноса координатных осей, записывают уравнения для прямой и обратной задач кинематики. Эти действия выполняются также по определенным правилам. Правила разметки и переноса координатных осей и выводы уравнений кинематики для манипулятора второго типа подробно изложены в пособии [32].

**Уравнения динамики манипуляторов.** Динамика манипулятора описывается системой дифференциальных уравнений, в которых отражается участие всех звеньев манипулятора в движении. Для составления дифференциальных уравнений используется уравнение Лагранжа второго рода для вынужденного движения:

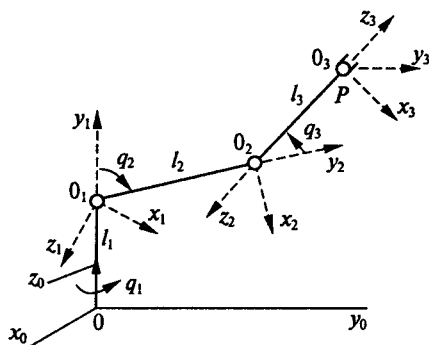


Рис. 4.88

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} + F_j, \quad (4.169)$$

где  $T$ ,  $\Pi$  — кинетическая и потенциальная энергии системы;  $q_j$  — обобщенная координата;  $F_j$  — обобщенная сила.

Рассмотрим математическое описание динамики на примере манипулятора первого типа. Полагаем, что все звенья манипулятора — абсолютно жесткие тела и упругие деформации в звеньях и приводах отсутствуют. Обозначим:  $J_1$  — приведенный момент инерции частей манипулятора, участвующих только во вращательном движении (совместно с частями электропривода и передаточного механизма);  $m_2$  — приведенная масса частей, участвующих в поступательном движении по координате  $z$  [момент инерции этих частей, приведенный к оси  $z_1$  —  $J_2(r)$ ];  $m'_3$  — масса руки, которая представляется в виде однородного стержня длиной  $l$ ;  $m_3$  — точечная масса, которой представляется схват с грузом.

Кинетическая энергия манипулятора представляет собой сумму кинетических энергий отдельных частей:

$$T = \frac{m_3}{2} (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\phi}^2 + \dot{z}^2) + \frac{m'_3}{2} \left[ \dot{r}^2 + \left( r - \frac{l}{2} \right)^2 \dot{\phi}^2 + \dot{z}^2 \right] + \frac{1}{2} \frac{m'_3 l^2}{12} \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} [J_1 + J_2(r)] \dot{\phi}^2. \quad (4.170)$$

Аналогично записывается уравнение потенциальной энергии:

$$\Pi = (m_2 + m'_3 + m_3) g z, \quad (4.171)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения.

Выполнив преобразования в соответствии с (4.169), получим

$$(m'_3 + m_3) \ddot{r} - \left[ (m'_3 + m_3) r - m'_3 \frac{l}{2} \right] \dot{\phi}^2 = F_r;$$

$$\left[ (m'_3 + m_3) r^2 + m'_3 l r + m'_3 \frac{l^2}{3} + J_1 + J_2(r) \right] \ddot{\phi} + 2 \left[ (m'_3 + m_3) r - m'_3 \frac{l}{2} \right] \dot{r} \dot{\phi} = M; \quad (4.172)$$

$$(m_2 + m'_3 + m_3) \ddot{z} + (m_2 + m'_3 + m_3) g = F_z.$$

Обозначив:

$$m'_3 + m_3 = m_{31} = a_1; \quad (m'_3 + m_3) r - m'_3 \frac{l}{2} = B(r); \quad (4.173)$$

$$(m'_3 + m_3)r^2 + m'_3lr + m'_3\frac{l^2}{3} + J_1 + J_2(r) = J_{31}(r) = a_2(r); \quad (4.174)$$

$$m_2 + m'_3 + m_3 = m_{32} = a_3; \quad (4.175)$$

$$B(r)\dot{\varphi}^2 = \vartheta_1(r, \varphi); \quad (4.176)$$

$$2B(r)\dot{r}\dot{\varphi} = \vartheta_2(r, \dot{r}, \varphi), \quad (4.177)$$

перепишем систему уравнений (4.172) в виде:

$$a_1\ddot{r} - \vartheta_1(r, \varphi) = F_r;$$

$$a_2(r)\ddot{\varphi} + \vartheta_2(r, \dot{r}, \varphi) = M; \quad (4.178)$$

$$a_3\ddot{z} + a_3g = F_z$$

или в векторно-матричном виде

$$\begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 \\ 0 & a_2(r) & 0 \\ 0 & 0 & a_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{\varphi} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\vartheta_1(r, \varphi) \\ \vartheta_2(r, \dot{r}, \varphi) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_3g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_r \\ M \\ F_z \end{bmatrix}, \quad (4.179)$$

где  $[-\vartheta_1(r, \varphi) \ \vartheta_2(r, \dot{r}, \varphi) \ 0]^T$  — вектор, обусловленный силами инерции от взаимного влияния движений по координатам  $r$  и  $\varphi$ ;  $\vartheta_1(r, \varphi)$ ,  $\vartheta_2(r, \dot{r}, \varphi)$  — векторы, обусловленные соответственно центробежной и кориолисовой силами инерции;  $[0 \ 0 \ a_3g]^T$  — вектор сил тяжести;  $[F_r \ M \ F_z]^T$  — вектор обобщенных сил.

Уравнение (4.179) можно записать в следующем обобщенном виде:

$$A(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q}) + C(q) = F, \quad (4.180)$$

где  $A(q)$  — матрица коэффициентов инерции, зависящих от вектора обобщенных координат  $q$ ;  $B(q, \dot{q})$  — вектор сил и моментов сил инерции, зависящих от обобщенных координат и скоростей;  $C(q)$  — вектор сил и моментов сил тяжести;  $F$  — вектор обобщенных сил.

Полученные уравнения используются для проектирования системы управления манипулятором, выбора двигателей и передаточных механизмов по степеням подвижности. По ним определяют силы и моменты, необходимые для реализации заданного программного движения. Задавая  $q$  как функцию времени  $q = q(t)$  и подставляя ее в (4.180), находят  $F(t)$ . Для стационарного движения, например движения с максимальной скоростью по степеням подвижности, определяют силы и моменты из уравнения  $F' = B(q, \dot{q}) + C(q)$ . При заторможенных двигателях определяют статические нагрузки в приводах из уравнения  $F'' = C(q)$ .



### 4.9.3. Взаимосвязанные системы управления движением звеньев манипулятора

Структурная схема системы управления манипулятором, соответствующая обобщенной структурной схеме (см. рис. 4.86), показана на рис. 4.89, а развернутая структурная схема — на рис. 4.90. Часть схемы, относящаяся к манипулятору, составлена по системе дифференциальных уравнений (4.179). Она дополнена схемами регуляторов и приводов для трех сепаратных систем, имеющих обратные связи по положению, скорости и току. Манипулятор как объект управления имеет взаимосвязи по координатам  $r(t)$  и  $\varphi(t)$  и автономную координату  $z(t)$ , что хорошо объясняется физикой процессов одновременного движения звеньев. Система управления обеспечивает перемещение центра масс схвата по заданной пространственной траектории в виде траекторий координат  $x_p(t)$ ,  $y_p(t)$ ,  $z_p(t)$ . Последние связаны с координатами  $r(t)$ ,  $\varphi(t)$  и  $z(t)$  звеньев уравнениями прямой задачи кинематики.

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

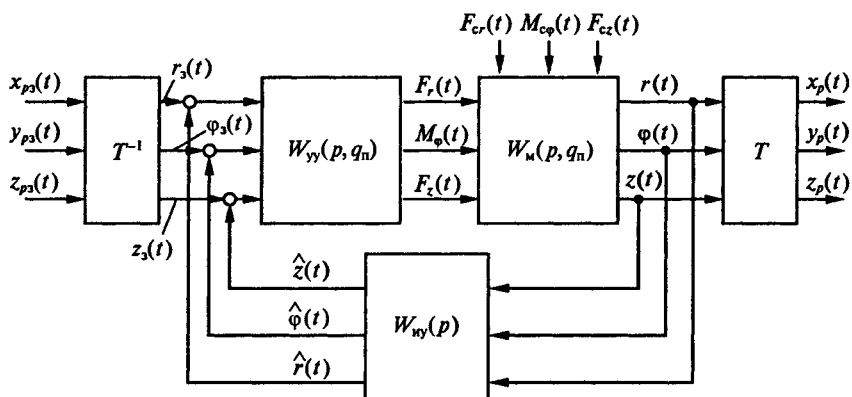


Рис. 4.89

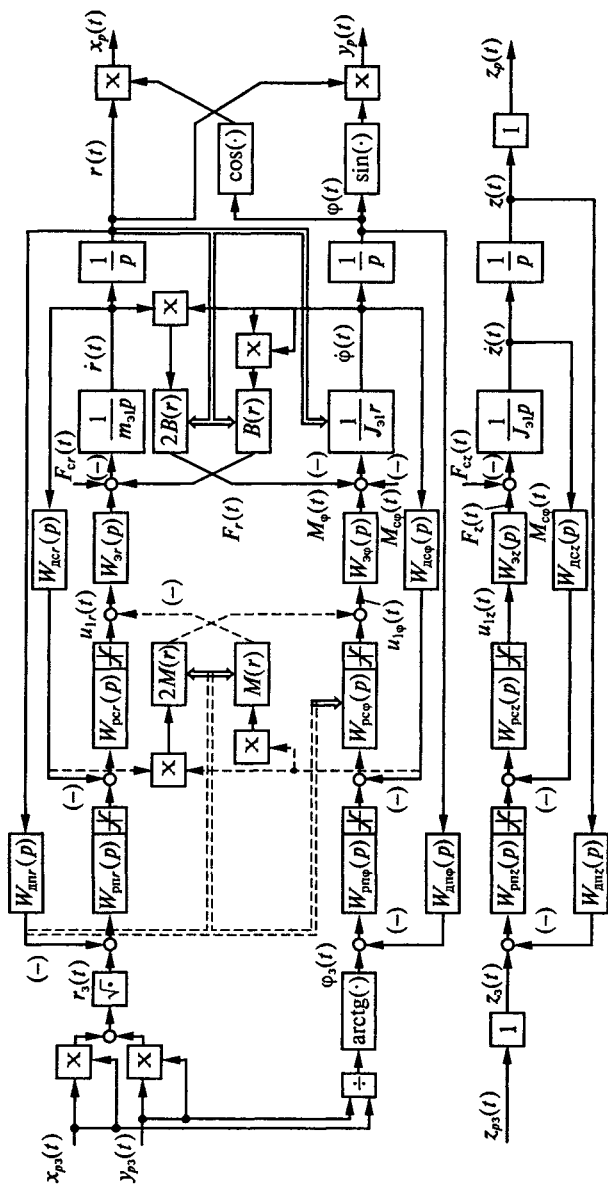


Рис. 4.90

переменными для контуров регулирования токов являются переменные  $u_{1r}$ ,  $u_{1\phi}$  и  $u_{1z}$ . Для трех сепаратных систем имеем:

$$\frac{F_r(t)}{u_{1r}(t)} = W_{ir}(p)c_{dr}k_{пмr}; \quad (4.181)$$

$$\frac{M_\phi(t)}{u_{1\phi}(t)} = W_{i\phi}(p)c_{д\phi}k_{пм\phi}; \quad (4.182)$$

$$\frac{F_z(t)}{u_{1z}(t)} = W_{iz}(p)c_{dz}k_{пмz}, \quad (4.183)$$

где  $W_{ir}(p)$ ,  $W_{i\phi}(p)$ ,  $W_{iz}(p)$  — передаточные функции замкнутых контуров регулирования токов;  $c_{dr}$ ,  $c_{д\phi}$ ,  $c_{dz}$  — постоянные двигателей;  $k_{пмr}$ ,  $k_{пм\phi}$ ,  $k_{пмz}$  — коэффициенты передачи моментов от двигателей к звеньям манипуляторов.

С соответствующими индексами  $r$ ,  $\phi$ ,  $z$  на схеме обозначены передаточные функции:  $W_{pc}(p)$ ,  $W_{dc}(p)$  — регуляторов и датчиков скорости;  $W_{pn}(p)$ ,  $W_{dn}(p)$  — регуляторов и датчиков положения. Полагая, что в системах реализуются известные условия пренебрежения обратными связями по ЭДС двигателей, синтез регуляторов тока, скорости и положения для автономных следящих и позиционных систем можно выполнить по типовым методикам, изложенным, например, в работе [5].

Декомпозиция взаимосвязанных систем управления по координатам  $r(t)$  и  $\phi(t)$  предполагает реализацию условий автономности в управлении координатами; они должны реагировать только на собственные управляющие воздействия  $r_3(t)$ ,  $\phi_3(t)$ . Это возможно при полной компенсации взаимосвязей звеньев манипулятора или при значительном их ослаблении. Обеспечить условия автономности координат  $r(t)$  и  $\phi(t)$  можно следующими способами:

применить перекрестные корректирующие связи в устройствах управления электроприводами;

применить динамическую декомпозицию.

При первом способе корректирующие связи выполняют так, чтобы сформировать дополнительные составляющие силы  $F_i(t)$  и момента  $M_\phi(t)$ , которые компенсируют соответствующие силы и моменты, образованные взаимосвязями звеньев манипулятора. Такие перекрестные корректирующие связи показаны на структурной схеме (см. рис. 4.90) штриховыми линиями. Структура перекрестных корректирующих связей полностью отражает структуру взаимосвязей координат манипулятора. Если принять  $W_{дсr}(p) = W_{дс\phi}(p) = 1$  и считать, что замкнутые контуры регулирования токов обладают значительно более высоким быстродействием по сравнению с другими контурами, то параметры корректирующих

связей могут быть в простейшем случае установлены из равенства  $M(r) \approx B(r)/W_{sr}(p)$ . Знаки корректирующих сигналов противоположны знакам составляющих силы и момента, образованных взаимосвязями звеньев. Параметры взаимосвязей не остаются постоянными, т. е.  $B(r) = \text{var}$ , поэтому и  $M(r) = \text{var}$ . Параметрическая зависимость отражена на рис. 4.90 двойными штриховыми линиями.

При втором способе декомпозиции — динамической декомпозиции — устанавливаются такие соотношения в быстродействии контуров управления сепаратных систем и взаимосвязей, при которых динамические проявления взаимосвязей оказываются малыми. Это требует высокого быстродействия (полос пропускания) контуров управления, которое может ограничиваться динамическими свойствами управляемых преобразователей, приводов, передаточных механизмов и звеньев манипулятора. В современных сервоприводах переменного тока можно обеспечить высокие быстродействия при соответствующих исполнениях механических узлов приводов.

Для математической трактовки динамической декомпозиции выполним линеаризацию системы управления, рассматривая динамические процессы в приращениях относительно начальных значений переменных и параметров, обозначенных индексом 0. Траекторные режимы движения звеньев манипулятора при больших изменениях переменных и параметров можно рассматривать в виде последовательностей временных интервалов, на каждом из которых имеются свои, постоянные на данном интервале начальные значения. Поэтому анализ процессов в линеаризованных сис-

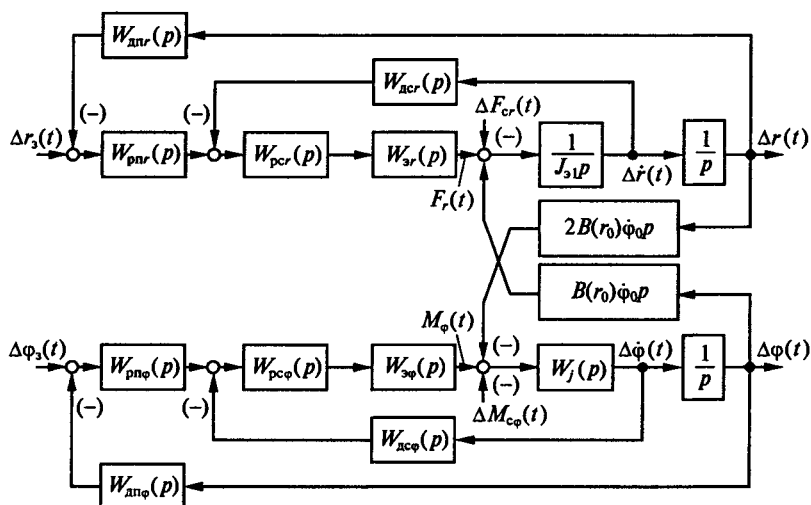


Рис. 4.91

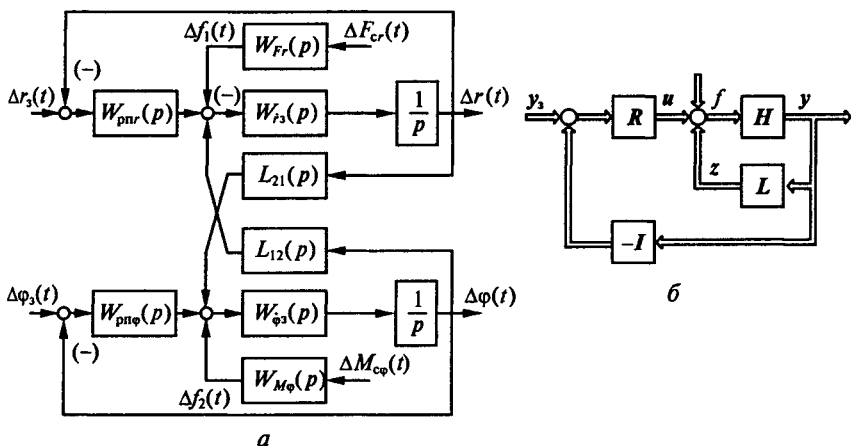


Рис. 4.92

темах следует проводить при всех наиболее неблагоприятных сочетаниях начальных значений параметров и переменных. Структурная схема линеаризованной системы управления без учета частот, относящихся к прямой и обратной задачам кинематики, показана на рис. 4.91. Перекрестные связи приведены к выходу системы, а  $W_J(p) = [J_{31}(r_0)p + 2B(r_0)\dot{r}_0]^{-1}$ . Операции умножения заменены суммированием в результате преобразований:  $r(t)\dot{\varphi}(t) \Rightarrow \dot{r}_0\Delta\dot{\varphi} + \dot{\varphi}_0\Delta\dot{r}$ ,  $\dot{\varphi}^2 \Rightarrow 2\dot{\varphi}_0\Delta\dot{\varphi}$ . Приведя момент сопротивлений, силу сопротивлений и перекрестные корректирующие связи к входам регуляторов скорости и рассматривая контуры регулирования скоростей  $\Delta\dot{r}(t)$ ,  $\Delta\dot{\varphi}(t)$  замкнутыми с передаточными функциями  $W_{rз}(p)$ ,  $W_{\varphiз}(p)$ , а также приняв  $W_{дпр}(p) = W_{дпф}(p) = 1$ , получим структурную схему системы (рис. 4.92, а) или векторно-матричную форму (рис. 4.92, б). На рисунке обозначены:

$$W_{Fr}(p) = [W_{прр}(p)W_{эр}(p)]^{-1}; \quad (4.184)$$

$$W_{M\varphi}(p) = [W_{рэф}(p)W_{эф}(p)]^{-1}; \quad (4.185)$$

$$L_{21}(p) = 2B(r_0)\dot{\varphi}_0 p [W_{прр}(p)W_{эр}(p)]^{-1}; \quad (4.186)$$

$$L_{12}(p) = 2B(r_0)\dot{\varphi}_0 p [W_{рэф}(p)W_{эф}(p)]^{-1}; \quad (4.187)$$

$$y_3 = [\Delta r_3(t) \quad \Delta \varphi_3(t)]^T; \quad (4.188)$$

$$y = [\Delta r(t) \quad \Delta \varphi(t)]^T; \quad (4.189)$$

$$f = [\Delta f_1(t) \quad \Delta f_2(t)]^T; \quad (4.190)$$

$$R = \begin{bmatrix} W_{\text{пр}}(p) & 0 \\ 0 & W_{\text{рпф}}(p) \end{bmatrix}; \quad (4.191)$$

$$H = \begin{bmatrix} W_{r_3}(p)p^{-1} & 0 \\ 0 & W_{\varphi_3}(p)p^{-1} \end{bmatrix}; \quad (4.192)$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & L_{12} \\ L_{21} & 0 \end{bmatrix}; \quad I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.193; 4.194)$$

Вектор выходных координат определяется по уравнению [42]

$$y = G_y y_3 + G_f f, \quad (4.195)$$

где  $G_y$ ,  $G_f$  — передаточные матрицы замкнутых взаимосвязанных систем по управлению и возмущению:

$$G_y = (I + WR)^{-1}WR; \quad (4.196)$$

$$G_f = (I + WR)^{-1}W, \quad (4.197)$$

где  $W = (I - HL)^{-1}H$ .

Характеристический полином замкнутой системы  $\det(I + WR)$  в случае декомпозиции разделяется на два полинома, содержащих корни только собственных автономных систем.

Оценим условия настройки контуров положения и скорости, при которых взаимосвязи систем будут слабыми. Примем, что контуры положения, скорости и тока в двух отдельных системах оптимизированы одинаково и соответствующие им малые некомпенсируемые постоянные времени контуров также одинаковы. Принимаем регуляторы токов, скоростей и положений соответственно в виде ПИ, ПИ и П-регуляторов и полагая, что на входе регуляторов скорости установлены инерционные звенья для уменьшения интенсивности динамических процессов в контурах скорости и тока, а частоты среза контуров тока, скорости и положения соответственно  $\omega_{ci} = (2T_\mu)^{-1}$ ;  $\omega_{cf} = \omega_{c\varphi} = (4T_\mu)^{-1}$ ;  $\omega_{cr} = \omega_{c\omega} = (16T_\mu)^{-1}$ , получим из уравнения (4.195) передаточные функции  $G_{y11}(p) = \Delta r(t) / \Delta r_3(t)$  и  $G_{y22}(p) = \Delta \varphi(t) / \Delta \varphi_3(t)$  в следующем виде:

$$G_{y11}(p) = G_{y22}(p) \approx \frac{128T_\mu^2 p^2 + 16T_\mu p + 1}{(128T_\mu^2 p^2 + 16T_\mu p + 1)^2 + K(r_0, \varphi_0)p^4(2T_\mu p + 1)^2}. \quad (4.198)$$

Здесь  $K(r_0, \varphi_0) = 1024T_\mu^4 [2B(r_0)\varphi_0]^2 / [m_{31}J_{31}(r_0)]$ ,  $T_\mu$  — малая некомпенсируемая постоянная времени контура тока.

Условие автономности систем может быть обеспечено в том случае, если правое слагаемое знаменателя (4.198) мало. Тогда знаменатель определяется выражением  $(128T_\mu^2 p^2 + 16T_\mu p + 1)^2$  и пе-

редаточные функции  $G_{y11}(p)$ ,  $G_{y22}(p)$  равны передаточным функциям автономных систем управления  $W_{y11}(p)$  и  $W_{y22}(p)$ :

$$\begin{aligned} G_{y11} &= W_{y11}(p); \quad G_{y22}(p) = W_{y22}(p); \\ W_{y11}(p) &= W_{y22}(p) = \frac{1}{128T_{\mu}^2 p^2 + 16T_{\mu} p + 1}. \end{aligned} \quad (4.199)$$

Осуществить такое преобразование можно, уменьшив множитель  $K(r_0, \varphi_0)$ .

Из анализа параметров манипулятора следует, что отношение  $[2B(r_0)\varphi_0]^2 / [m_{31}J_{31}(r_0)] < 1$ , но резерв уменьшения  $K(r_0, \varphi_0)$  за счет этой части мал. Значительно большие возможности имеются в уменьшении значения постоянной  $T_{\mu}$  и, следовательно, в увеличении частот среза контуров скорости и положения. Высокие частоты среза контуров скорости и положения можно обеспечить только в том случае, если собственные частоты колебаний, обусловленные упругими связями в приводах, передаточных механизмах и звеньях манипулятора, будут достаточно велики. При этом изменения параметров манипулятора не будут влиять на реализацию условий (4.199), так как при относительной малости  $K(r_0, \varphi_0)$  его изменение не отразится на общем результате. Изменение коэффициента инерции  $J_{31}(r_0)$  можно учесть при настройке регулятора скорости. Если это изменение значительно, то можно использовать автоматическую подстройку постоянной  $\beta_{рсп}$  в зависимости от  $r$ , используя информацию с выхода датчика положения координаты  $r$ .

#### 4.9.4. Управление цикловыми движениями манипулятора

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

Рассмотрим цикловые движения по координатам  $r$  и  $z$  с помощью электроприводов звеньев 2 и 3 манипулятора (см. рис. 4.84). Учтем при этом пневматический привод разжима схвата [41].

Кинематическая схема движений звеньев манипулятора показана на рис. 4.93, а, схема пневмопривода разжима схвата — на рис. 4.93, б. Зажим схвата обеспечивается пружиной 1.

Позиционирование электроприводов выполняется подачей соответствующих команд на БУ2 и БУ3 (см. рис. 4.84). Примем  $q_{23} = V1$  — подъем,  $q_{23} = V2$  — опускание,  $q_{33} = V3$  — выдвигание,  $q_{33} = V4$  — втягивание. Разжим схвата выполняется командой  $V5$ , подаваемой на электромагнит распределителя 2 (см. рис. 4.93, б).

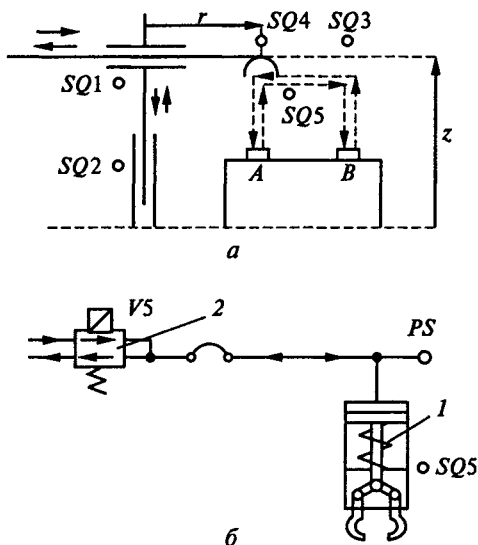


Рис. 4.93

Контроль состояния приводов манипулятора выполняется конечными выключателями:  $SQ1$  — поднят,  $SQ2$  — опущен,  $SQ3$  — выдвинут,  $SQ4$  — втянут,  $SQ5$  — схват разжат.

Зжатое состояние схвата определяется контактным датчиком давления  $PS$  по отсутствию давления в приводе схвата. В исходном состоянии манипулятора схват поднят над местом  $A$ .

Рассмотрим программу взятия изделия с места  $B$  и его установки на место  $A$ , которая выполняется однократно после подачи команды «Переставить  $B-A$ ». Траектория движения схвата показана штриховой линией на рис. 4.93,  $a$ .

Для однократного выполнения операции перестановки изделия с места  $B$  на место  $A$  по изменению состояния бита команды «Переставить  $B-A$ » из OFF в ON (по переднему фронту сигнала) формируется дифференциальный сигнал-бит «Диф.  $B-A$ » (рис. 4.94), который устанавливается на время одного сканирования программы.

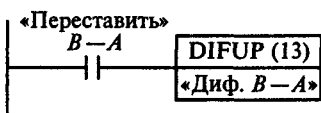


Рис. 4.94

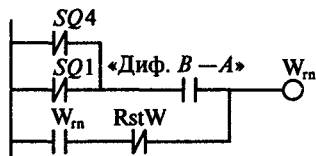


Рис. 4.95



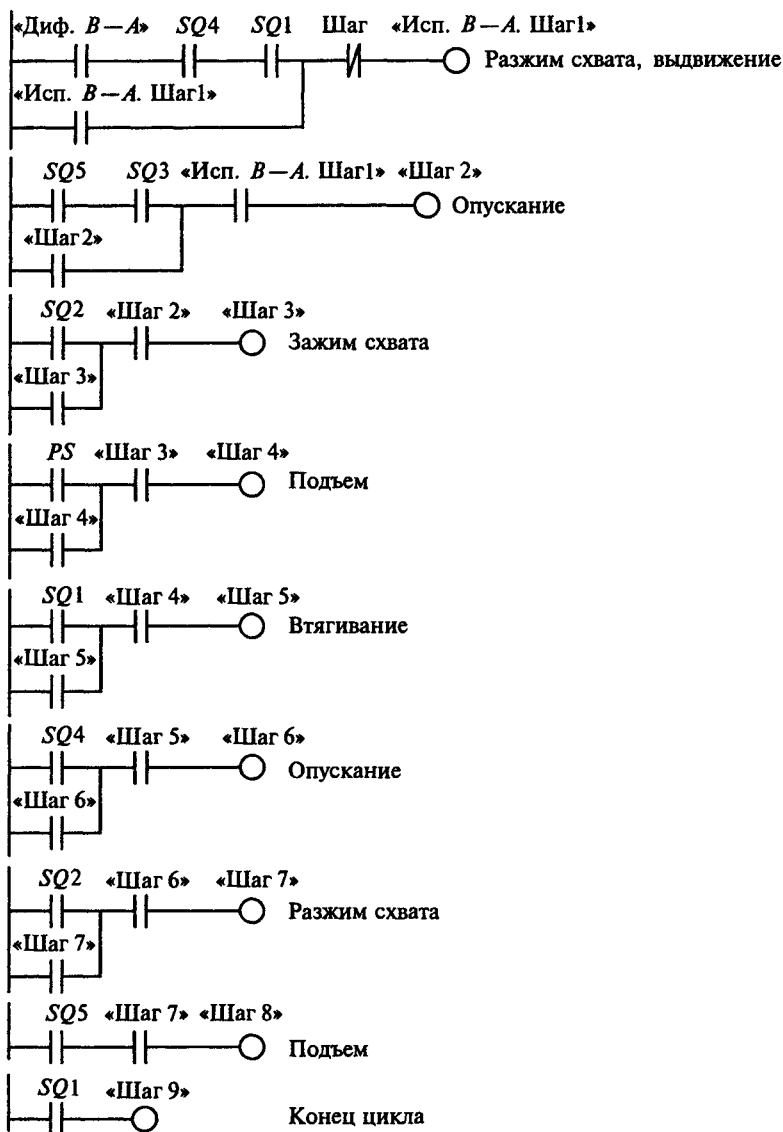


Рис. 4.96

Если манипулятор не находится в исходном состоянии, то устанавливается бит сообщения  $W_m$  («Манипулятор не в исходном состоянии») и ставится на самоудержание через инверсный сигнал-бит RstW сброса аварийных и предупредительных сообщений (рис. 4.95). После приведения манипулятора в исходное состояние

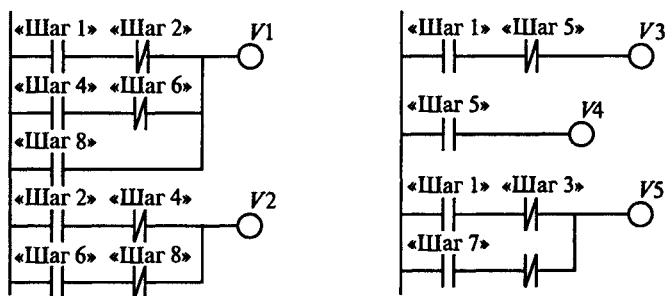


Рис. 4.97

(схват поднят и втянут) необходимо кратковременно подать сигнал RstW.

Если манипулятор находится в исходном состоянии, начинает работать программа последовательности шагов, приведенная на рис. 4.96. По сигналу-биту «Диф. В—А» устанавливается флаг выполнения команды «Исп. В—А. Шаг 1», который одновременно является первым шагом в программе.

Установившись, флаг «Исп. В—А. Шаг 1» становится на самоудержание. Затем последовательно, по мере выполнения движений исполнительными механизмами и срабатывания датчиков, устанавливаются остальные шаги программы. Каждый предыдущий шаг разрешает установку следующего. Установка бита «Шаг 9» сбрасывает все шаги программы.

Формирование управляющих сигналов на исполнительные устройства показано на рис. 4.97.

## 4.10. Состав и свойства систем управления транспортным и подъемно-транспортным оборудованием

### 4.10.1. Характеристика транспортного оборудования и электроприводов

**Конвейеры.** *Общие сведения.* Конвейеры широко применяются в различных отраслях промышленности для перемещения сыпучих и штучных грузов.

Для перемещения сыпучих грузов на агломерационных фабриках, в доменных цехах металлургических заводов, на тепловых станциях применяют ленточные конвейеры (рис. 4.98) [17]. Между барабанами 2 и 7 натяжной 1 и приводной 6 станций расположена гибкая лента 5. Барабан 2, ось которого может перемещаться в

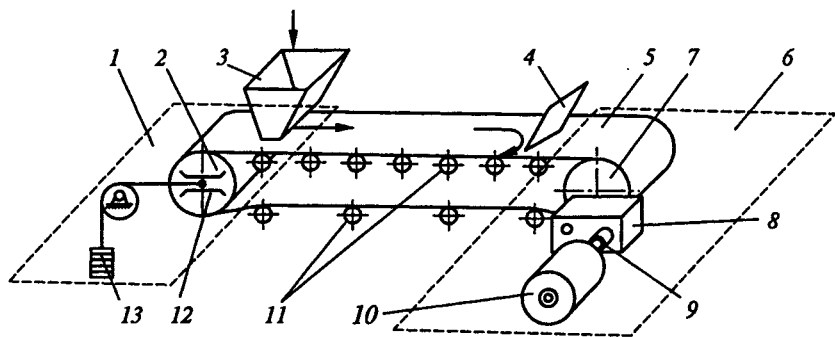


Рис. 4.98

направляющих 12, под действием груза 13 создает предварительное натяжение ленты. Это натяжение обеспечивает передачу без проскальзывания тягового усилия от барабана приводной станции.

Чтобы исключить провисание верхней рабочей и нижней холостой ветвей ленты, вдоль трассы устанавливают поддерживающие ролики 11. Барабан приводной станции через редуктор 8 соединен с двигателем 10.

Для сглаживания возможных ударов в процессе пуска и торможения валы двигателя и редуктора соединяют упругой муфтой 9. Транспортируемый груз подается на ленту через загрузочную воронку 3 и выгружается плужком 4.

Длина ленточного конвейера может достигать 2... 3 км при скорости движения ленты 1,5... 3 м/с и ширине ленты 2 м. Такой конвейер может обеспечивать производительность 700 т/ч.

Ленточные конвейеры применяют не только для транспортирования груза в горизонтальной плоскости. При перемещении с углом наклона более  $20^\circ$ , когда возможно осыпание груза, устанавливают ленточный скребковый конвейер.

Для перевозки людей используют разновидность конвейера — эскалатор. Несущий орган в эскалаторах — замкнутая цепь, охватывающая звездочки приводной и натяжной станций и снабженная ступенями.

Поточные линии машиностроительных и автомобильных заводов оборудованы подвесными конвейерами. Грузозахватывающие приспособления шарнирно присоединены к каткам, движущимся по монорельсу. Тяговое усилие каткам сообщается от двигателя цепью через звездочку приводной станции.

Разновидность подвесного конвейера — канатную дорогу — используют как транспортное средство для пассажирских и грузовых перевозок.

Роль монорельса в такой дороге выполняет канат, подвешенный на специальных опорах. Тяговое усилие от двигателя к грузонесущему

му приспособлению сообщается посредством дополнительного каната приводной и натяжной станций канатной дороги.

Часто производственный процесс обслуживает группа конвейеров, объединенных общим технологическим циклом в единую поточно-транспортную систему (ПТС), например процесс смесеобразования в металлургическом производстве (рис. 4.99). В ПТС конвейеры могут образовывать несколько параллельных (конвейеры 2 и 3, 6 и 7, 9 и 10) или последовательных (5, 4 и 1) цепей. При этом движение тянущих органов конвейеров должно быть строго согласованным, в противном случае может возникнуть нарушение технологического процесса, что приведет к снижению качества выпускаемой продукции. Чтобы избежать этого при пуске ПТС или ее остановке включение двигателей конвейеров должно производиться в определенной последовательности. Так, в схеме, представленной на рис. 4.99, а, первым должен включаться двигатель М1, а затем М4, М8, М2, М3, М5, М9, М10, М6, М7. Остановка ПТС без образования завала и сохранения постоянного содержания компонентов обеспечивается, если двигатели будут отключаться в последовательности М3, М5, М2, М4, М9, М10, М8, М6, М7 и М1.

На трассах большой протяженности используются ПТС с последовательно расположенными конвейерами (см. рис. 4.99, б).

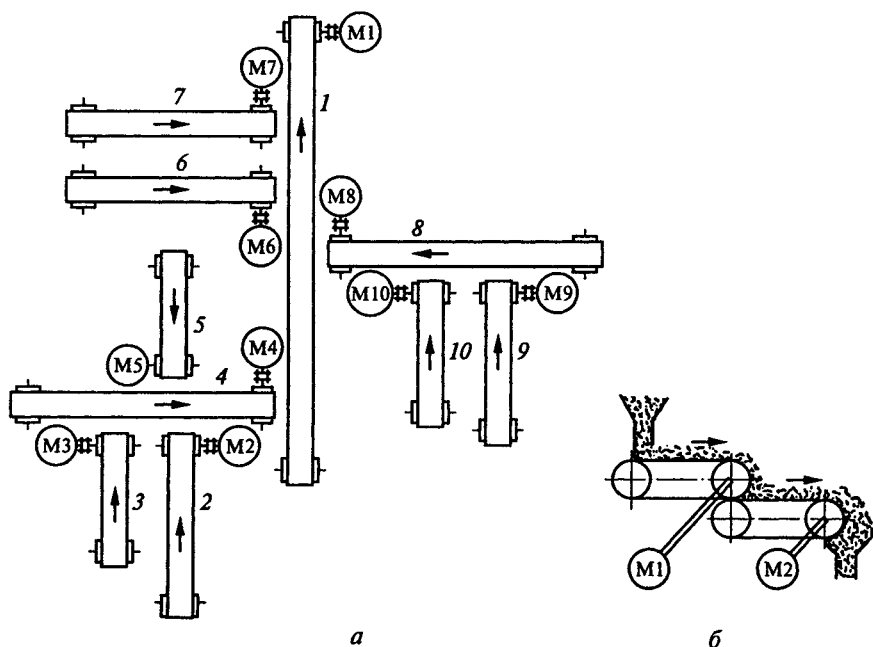


Рис. 4.99

Конвейеры в зависимости от их назначения и области применения могут эксплуатироваться в разнообразных условиях, в том числе крайне неблагоприятных: на открытом воздухе, на высоте над уровнем моря, превышающей 1000 м (ленточные конвейеры горнодобывающих предприятий, высокогорные канатные дороги), а также в помещениях, содержащих пары активных веществ и характеризующихся повышенной влажностью, загрязненностью, высокой температурой окружающей среды (красильные и сушильные линии, термические цехи). Это определяет необходимость использования для данной группы механизмов электрооборудования, по типу и исполнению удовлетворяющего перечисленным условиям. К нему предъявляются жесткие требования по безопасности и простоте обслуживания, надежности работы. Это в первую очередь относится к приводным двигателям, которые, как правило, должны иметь закрытое исполнение и обладать повышенным пусковым моментом.

Режим работы приводных двигателей конвейеров — продолжительный с редкими пусками и остановками при диапазоне регулирования скорости, не превышающем 1:2, 1:3.

*Статические и динамические нагрузки приводов конвейера.* Основной фактор, определяющий статическую нагрузку конвейера, — сила трения, действующая между тянущим элементом (лента, цепь и др.) и поддерживающим устройством (ролики, монорельс, канат и др.).

Силы трения возникают в подшипниках вращающихся элементов, местах контакта роликов и катков с опорой, тяговом элементе при его изгибах. Вследствие значительной протяженности конвейера и большого количества движущихся элементов эти силы составляют значительную часть суммарной статической нагрузки, а для горизонтальных конвейеров определяют всю статическую нагрузку привода.

Статическая нагрузка конвейера в значительной степени зависит от конструкции и массы тягового органа (масса определяется передаваемым усилием). Поэтому мощность двигателя в процессе проектирования конвейера выбирают с учетом статической нагрузки конвейера.

Силы сопротивления движению конвейера можно разделить на две категории: силы, не зависящие от натяжения тягового элемента, и силы, зависящие от этого натяжения. Первые возникают на прямолинейных горизонтальных и наклонных участках и распределены по участку равномерно (рис. 4.100, *a* — ленточный конвейер; *b* — цепной и канатный конвейеры). Вторые возникают на участках изгиба тягового элемента и сосредоточены на дуге этого участка (рис. 4.101, *a* — на блоке; *b* — на шине; *в* — на батарее роликов). В соответствии с рис. 4.100 сила сопротивления движению на прямолинейном участке

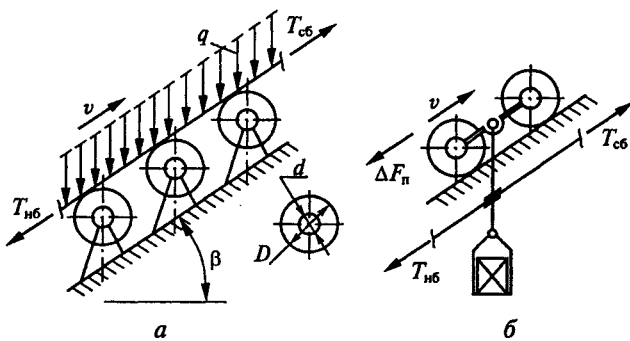


Рис. 4.100

$$\Delta F_n = C_n q l \cos \beta + q l \sin \beta = q l (C_n \cos \beta + \sin \beta), \quad (4.200)$$

где  $q$  — весовая нагрузка на 1 м пути;  $l$  — длина участка;  $C_n = k_n(\mu d/D + 2f/D)$  — результирующий коэффициент сопротивления движению на прямолинейном участке ( $k_n = 1,1 \dots 1,3$ ;  $\mu$  — коэффициент трения в подшипниках;  $f$  — коэффициент трения качения роликов и катков);  $D$  — диаметр ролика

Первое слагаемое (4.200) обусловлено потерями в результате трения, а второе — составляющей веса перемещаемого по наклонному участку конвейера груза. При этом в расчетах следует принимать  $\sin \beta > 0$  при движении на подъем и  $\sin \beta < 0$  при движении на спуск. Значения коэффициентов  $\mu$  и  $f$  приводятся в справочной литературе и зависят от типа подшипников, роликов, катков и опор [21].

На участках изгиба (см. рис. 4.101) сила сопротивления движению  $\Delta F_n$  состоит из двух слагаемых: силы от изгиба тягового эле-

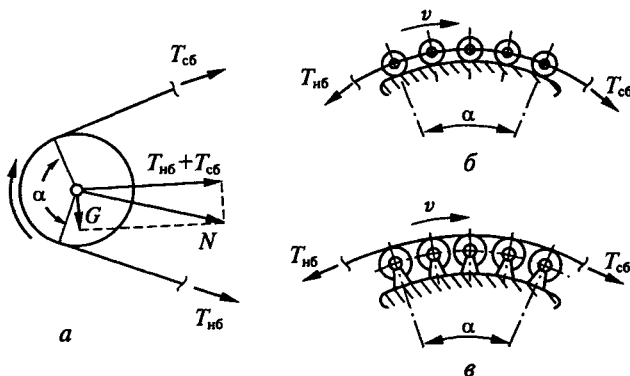


Рис. 4.101

мента, пропорциональной натяжению в набегающей точке участка  $T_{нб}$ , и силы трения в подшипниках блоков или роликов, пропорциональной равнодействующей силе  $N$  на участке. Следовательно,

$$\Delta F_{и} = \xi T_{нб} + N\mu \frac{d}{D}, \quad (4.201)$$

где  $\xi$  — коэффициент сопротивления от изгиба тягового элемента;  $d$  — внутренний диаметр ролика.

В конвейерных установках обычно выполняются условия:  $T_{нб} \gg G$ ;  $\Delta F_{и} \ll T_{нб}$ . Поэтому при определении равнодействующей  $N$  можно пренебречь весом блока  $G$  и принять, что натяжения в набегающей  $T_{нб}$  и сбегающей  $T_{сб}$  точках участка равны. Тогда (4.201) приводится к виду:

$$\Delta F_{и} \approx C_{и} T_{нб}; \quad (4.202)$$

$$C_{и} = \xi + 2\mu \frac{d}{D} \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (4.203)$$

Здесь  $C_{и}$  — результирующий коэффициент сопротивления на участке изгиба.

Сила сопротивления вызывает увеличение натяжения тягового элемента на каждом участке.

Для прямолинейного участка

$$T_{сб} = T_{нб} + \Delta F_{п}, \quad (4.204)$$

для участка изгиба

$$T_{сб} = T_{нб} + \Delta F_{и} = k_{и} T_{нб}, \quad (4.205)$$

где  $k_{и} = 1 + C_{и}$  — коэффициент увеличения натяжения на данном участке.

В общем случае конвейер может состоять из большого числа участков (рис. 4.102). Поскольку прямолинейные участки П отде-

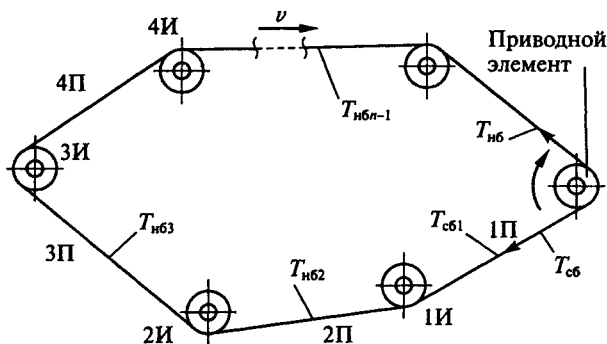


Рис. 4.102

ляются друг от друга участками изгиба И, то во всей замкнутой конвейерной линии имеется одинаковое число  $n$  участков П и И.

Тогда результирующая сила сопротивления движению определится как сумма сил всех участков:

$$F_{ст} = \sum_{i=1}^n \Delta F_{Pi} + \sum_{i=1}^n \Delta F_{Ii} = \sum_{i=1}^n q_i l_i (C_n \cos \beta_i + \sin \beta_i) + \sum_{i=1}^n C_{wi} T_i. \quad (4.206)$$

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

$$F_{дин} = \sum_{i=1}^n m_i a_n + (J_{дв} i_p^2 + J_n) \frac{a_n}{R_n^2}, \quad (4.207)$$

где  $F_{дин}$  — динамическая сила на обводе приводного элемента радиусом  $R_n$ ;  $m_i$  — масса движущихся элементов одного прямолинейного участка в совокупности с массой движущихся элементов предшествующего участка изгиба;  $J_{дв}$ ,  $J_n$  — моменты инерции двигателя и приводного элемента;  $i_p$  — передаточное число редуктора приводной станции;  $a_n$  — ускорение конвейера при пуске.

Для тяжелых конвейеров динамическое усилие из-за большой массы поступательно движущихся элементов может оказаться значительным и существенно превысит силу статического сопротивления. При этом слагаемое, вызванное массой поступательно движущихся элементов, может составлять 90 % и более результирующего динамического усилия. Пуски конвейера с длительным режимом работы осуществляются редко и, как правило, вхолостую.

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

$$P_c = k_3 \frac{F_{ст} v}{\eta_p} = k_3 \frac{(T_{нб} - T_{сб}) v}{\eta_p}, \quad (4.208)$$

где  $\eta_p$  — КПД редуктора приводной станции;  $k_3 \approx 1,1 \dots 1,3$  — коэффициент запаса, учитывающий неточности расчета силы сопротивления.

Момент сопротивления на валу двигателей приводной станции при известном передаточном числе редуктора  $i_p$

$$M_{ст} = k_3 \frac{F_{ст} D}{2 i_p \eta_p}, \quad (4.209)$$

где  $D$  — диаметр приводного элемента.

Номинальная мощность двигателей выбирается из условия

$$P_{ном} \geq P_c. \quad (4.210)$$



Силы трения покоя существенно больше, чем силы трения при движении конвейера, поэтому для конвейерных установок характерны повышенные моменты трогания, которые у наружных установок дополнительно возрастают в зимнее время. Это учитывают, выбирая приводной двигатель с повышенным пусковым моментом, обеспечивающим надежный пуск конвейера при возможном снижении напряжения питающей сети.

Для общего случая конвейерной трассы со сложной конфигурацией определить заранее однозначно оптимальное месторасположение привода не удастся. Поэтому рассматривают несколько вариантов расположения приводной станции.

При выборе исходят из следующих условий. Привод должен устанавливаться в конце рабочего участка, что позволяет разгрузить последующую холостую ветвь конвейера от больших натяжений рабочего участка. Если в конвейере имеется несколько рабочих участков, то для рассмотрения выбирают наиболее тяжелый, на котором происходит максимальное нарастание натяжения, а также участок, предшествующий самой длинной холостой ветви. Располагая привод в конце самого тяжелого участка, можно существенно уменьшить максимальные натяжения на последующих рабочих участках. Размещение привода перед самой длинной холостой ветвью позволяет снизить среднее по трассе натяжение. Для конвейеров, работающих на спуск грузов при тормозном режиме работы привода, последний устанавливается в начале рабочего участка по ходу тягового элемента.

Для конвейерных линий значительной протяженности и с большим числом тяжелых рабочих участков может оказаться, что даже оптимальное расположение приводной станции на трассе не обеспечивает снижения максимального натяжения до допустимого уровня. В таком случае конвейер односекционного исполнения заменяют многосекционным конвейером или на тяговом элементе устанавливают несколько приводных станций. Поэтому при необходимости уточнить места расположения приводов следует выполнить расчет диаграммы натяжений с учетом сопротивлений на участках изгиба. Решение рассмотренной задачи часто корректируется по конструктивным соображениям.

По производственным условиям размещения конвейерной линии не всегда удается расположить приводы в местах, определенных расчетом. Расположение приводов в середине участков требует установки дополнительных звездочек. Поэтому обычно места расположения приводных станций заранее определяют по производственно-конструктивным соображениям и, как правило, увязывают с предусмотренными на трассе поворотными звездочками. Расчет диаграммы натяжения при этом носит поверочный характер для определения максимального натяжения и выбора необходимого типа тягового элемента.

В действующих конвейерах из-за изменения технологического процесса или по другим причинам возникает необходимость изменения производительности конвейера. Мощность двигателя (кВт) в этом случае можно определить приблизительно по производительности с учетом профиля и длины трассы [17]:

$$P = \frac{k_3 Q}{\eta_m} (cL + H) 10^{-3}, \quad (4.211)$$

где  $k_3$  — коэффициент запаса (1,1...1,25);  $Q$  — производительность конвейера, Н/с;  $c$  — опытный коэффициент, определяемый видом конвейера, его длиной и производительностью ( $c = 1,1 \dots 2$  — для ленточных конвейеров,  $c = 1,5 \dots 2$  — для скребковых,  $c = 0,2$  — для пластинчатых);  $L$  — длина трассы, м;  $H$  — высота подъема, м;  $\eta_m = 0,75 \dots 0,85$  — коэффициент полезного действия механизма.

*Особенности статики и динамики электропривода конвейеров.* Механическая часть конвейеров представляет собой систему с распределенными по длине конвейера параметрами: массой перемещаемого груза, массой и упругостью тягового органа, усилием статического сопротивления. Наличие упругих механических связей способствует возникновению колебаний, которые при неблагоприятных условиях существенно увеличивают динамические нагрузки рабочего оборудования. Движение системы с распределенными параметрами описывается дифференциальными уравнениями в частных производных, решение которых в общем виде математически трудно. Однако для рассмотрения физических процессов, возникающих в пусковых режимах конвейеров, реальная механическая система может быть представлена упрощенной динамической моделью, в которой распределенные массы, упругости и силы заменены эквивалентными сосредоточенными.

Основой для составления модели может служить эпюра натяжений тягового органа конвейера в режиме пуска (рис. 4.103). Если

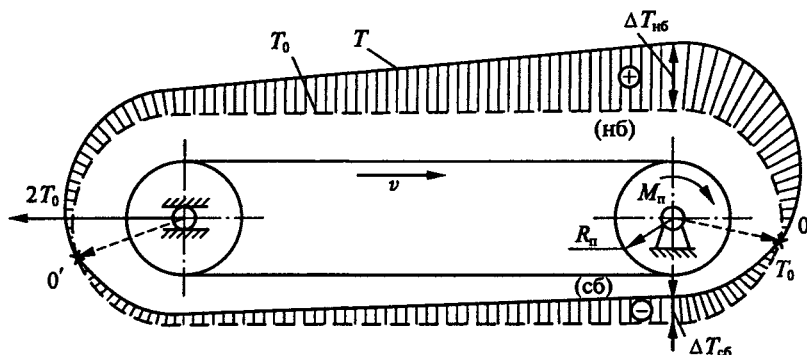


Рис. 4.103

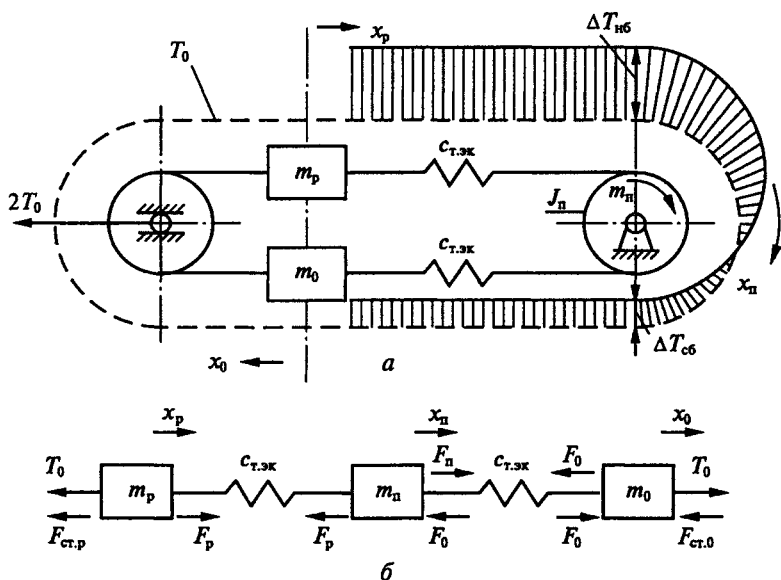


Рис. 4.104

за условие эквивалентности принять равенство натяжений тягового органа на приводном элементе реальной системы натяжениям в соответствующих точках приводного элемента на модели, динамическая модель подвижной части конвейера будет иметь вид, представленный на рис. 4.104, а, а ее расчетная схема, приведенная к поступательному движению, — на рис. 4.104, б. На рис. 4.104 приняты следующие обозначения:  $m_p$ ,  $m_0$  — результирующие массы соответственно рабочей и холостой ветвей конвейера с учетом приведенной к поступательному движению массы натяжного барабана;  $m_n = (J_n + J_{дв} i_p^2) / R_n^2$  — масса привода, приведенная к поступательному движению;  $c_{т.эк}$  — эквивалентная жесткость ветвей тягового органа;  $x_n$ ,  $x_p$ ,  $x_0$  — координаты сосредоточенных масс соответственно  $m_n$ ,  $m_p$  и  $m_0$ ;  $F_p = c_{т.эк}(x_n - x_p)$  и  $F_0 = c_{т.эк}(x_n - x_0)$  — соответственно упругие усилия рабочей и холостой ветвей тягового органа;  $F_{ст.р}$ ,  $F_{ст.0}$  — соответственно результирующие усилия статического сопротивления рабочей и холостой ветвей тягового органа, причем  $F_{ст.р} + F_{ст.0} = F_{ст}$ ;  $F_n = M_n i_p / R_n$ .

Движение привода согласно полученной динамической модели описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 F_n + c_{т.эк}(x_n - x_0) - c_{т.эк}(x_n - x_p) &= m_n \ddot{x}_n; \\
 c_{т.эк}(x_n - x_0) - F_{ст.0} + T_0 &= m_0 \ddot{x}_0; \\
 c_{т.эк}(x_n - x_p) - F_{ст.р} - T_0 &= m_p \ddot{x}_p.
 \end{aligned}
 \tag{4.212}$$

Решение системы уравнений (4.212) с учетом принятого условия эквивалентности позволяет получить не только качественное представление о движении привода, но и достаточно точные количественные результаты.

Колебательный характер процесса пуска обуславливает динамические перегрузки тягового элемента. Возникшие при пуске колебания демпфируются за счет вязкого трения во всей подвижной части привода и главным образом внутри тягового элемента.

В конце процесса пуска, когда работа двигателя соответствует жесткой механической характеристике, колебания эффективно демпфируются самим приводом.

Наиболее тяжелый режим колебаний возникает при пуске ленточных конвейеров длиной в несколько тысяч метров, используемых на открытых разработках полезных ископаемых. При пуске таких конвейеров учитывают скорость распространения упругих колебаний вдоль тягового элемента. Если время пуска двигателя меньше времени распространения упругой волны от приводного элемента до натяжного, двигатель успевает приобрести полную рабочую скорость, а хвостовой конец тягового элемента остается еще неподвижным. Это означает, что когда упругая волна дойдет до конца конвейера, к его хвостовым элементам прикладывается импульс полной рабочей скорости. Происходит упругий удар, подобный рывку при выборе слабины каната приводом подъема крана. Упругая волна, отражаясь, возвращается к приводному элементу. Для того чтобы ослабить упругий удар и уменьшить распространяющийся импульс скорости, в таких конвейерных линиях используют пуск на предварительную пониженную скорость и уже с этой скорости выполняют пуск на полную рабочую скорость.

Другим видом эластичной связи в механической части привода является гибкая подвеска транспортируемого груза. При пуске подвесного конвейера возникает проблема устранения или уменьшения до допустимой нормы раскачивания груза. График измене-

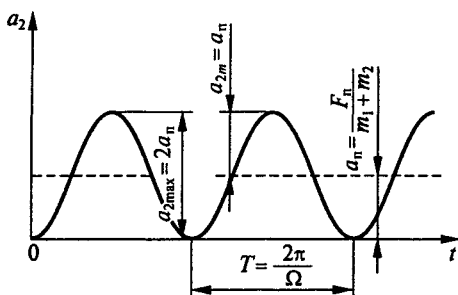


Рис. 4.105

ния ускорения массы груза в процессе пуска конвейера с  $F_n = \text{const}$  показан на рис. 4.105.

В отличие от кранов для конвейеров характерны более короткие подвески и, следовательно, бóльшие частоты свободных колебаний груза. Интервал продолжительного пуска конвейера включает в себя несколько периодов таких колебаний, что позволяет в ряде случаев для устранения раскачивания груза использовать метод интерференции противофазных колебаний.

Пуск выполняется в две ступени: сначала к механизму прикладывается половина пускового момента, а через полпериода свободных колебаний момент увеличивается до полного значения. В результате средние ускорения от двух слагаемых пускового момента суммируются, а периодические слагаемые ускорения компенсируются (рис. 4.106). В конце процесса пуска момент привода снимается также ступенчато. При этом основная часть процесса пуска проходит с постоянным допустимым ускорением без колебаний.

**Рольганги.** Эти механизмы предназначены для транспортирования металла вращающимися роликами. По назначению рольганги делятся на рабочие, транспортные, пакетировочные, передвижные и т. д.

*Рабочие* рольганги служат для подачи металла к прокатным валкам и отвода его от валков. Они располагаются непосредственно у клетки. На крупных обжимных станах часть роликов этих рольгангов (от 1 до 3) размещается непосредственно в станине клетки и называется станинными роликами. Их назначение — улучшить условия захвата металла валками.

Рабочие вспомогательные рольганги, называемые также удлинительными, или раскатными, являются продолжением основных рабочих. Их используют, если длина прокатываемого металла превышает длину основных рольгангов.

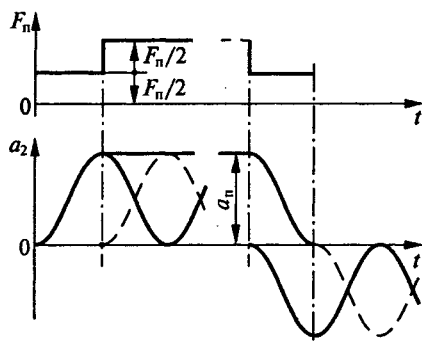


Рис. 4.106

*Транспортные* рольганги служат для передачи металла от одного механизма к другому. Различают подводящие и отводящие транспортные рольганги в зависимости от направления их движения относительно механизма. Рольганг, расположенный в начале стана и служащий для приема металла, называется приемным. Разновидностью транспортных рольгангов являются печные рольганги, устанавливаемые в проходных нагревательных печах.

*Пакетировочные* рольганги с косыми роликами предназначены для одновременного перемещения металла вдоль и поперек оси рольганга с целью собирания заготовок или полос в пачки.

*Передвижные* рольганги служат для перемещения металла в направлении движения роликов рольганга и в направлении перемещения самого рольганга (передвижные столы рельсобалочных и трубосварочных станов, подъемно-качающиеся столы станков трио, параллельно-подъемные столы для загрузки металла в нагревательные печи и т. д.).

Для снижения массы диаметр роликов рольганга выбирают минимальным, удовлетворяющим условиям прочности.

Режим работы рольгангов определяется их назначением и типом стана.

Рольганги могут иметь групповой или индивидуальный привод. При групповом приводе секция рольганга, включающая в себя от трех до десяти и более роликов 1, имеет один или два общих приводных двигателя 2 (рис. 4.107, а). Групповой привод применя-

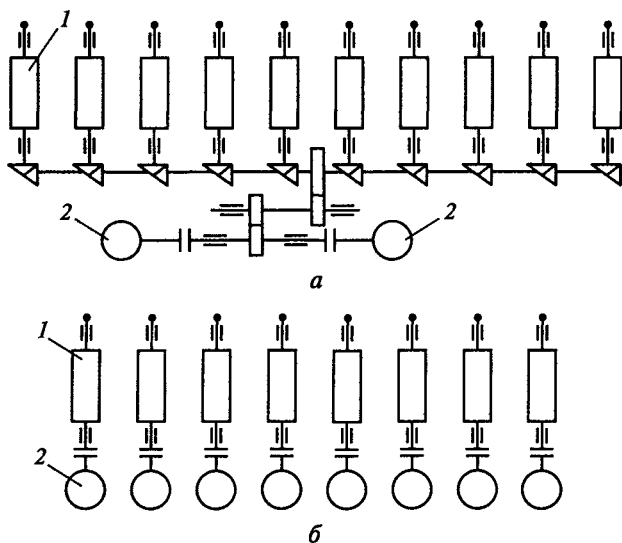


Рис. 4.107

ется для рольгангов, перемещающих короткие заготовки, когда на один ролик может приходиться почти вся масса заготовки. При индивидуальном приводе в этом случае потребовалась бы значительно бóльшая установленная мощность.

Для рольгангов, перемещающих металл большой длины, когда масса металла распределяется между большим числом роликов  $l$ , применяется индивидуальный привод (рис. 4.107, б). Более высокая стоимость индивидуального привода по сравнению с групповым для транспортных рольгангов компенсируется простотой его конструкции, удобством изготовления и эксплуатационной надежностью. Для этого привода обычно применяются короткозамкнутые АД с большой перегрузочной способностью, питаемые от общего преобразователя частоты с диапазоном регулирования от 10 до 60 Гц.

Момент статического сопротивления рольганга ( $\text{Н} \cdot \text{м}$ ) состоит из момента холостого хода  $M_{x,x}$  и момента транспортирования металла по роликам  $M_{\text{тр}}$ . Момент холостого хода рольганга, приведенный к валу двигателя:

$$M_{x,x} = z_p m_p g d_{\text{ш}} \mu_{\text{ш}} / 2 i \eta_x, \quad (4.213)$$

где  $z_p$  — количество роликов рольганга;  $m_p$  — масса одного ролика, кг;  $d_{\text{ш}}$  — диаметр шейки ролика, м;  $\mu_{\text{ш}}$  — коэффициент трения скольжения в подшипниках ролика;  $i$  — передаточное число редуктора;  $\eta_x = 0,5 \eta_{\text{ном}}$  — КПД редуктора при холостом ходе ( $\eta_{\text{ном}}$  — КПД редуктора при номинальной нагрузке).

Момент транспортирования металла по роликам ( $\text{Н} \cdot \text{м}$ )

$$M_{\text{тр}} = m_m g \left( \frac{d_{\text{ш}}}{2} \mu_{\text{ш}} + f \cdot 10^{-2} \right) / i \eta_{\text{тр}}, \quad (4.214)$$

где  $m_m$  — масса металла, приходящаяся на одну секцию рольганга, кг;  $f$  — коэффициент трения качения металла по роликам;  $\eta_{\text{тр}}$  — КПД редуктора при транспортировании металла по рольгангу, который без большой погрешности может быть принят равным  $\eta_x$ .

При групповом приводе рольганга масса  $m_m$  обычно принимается равной массе всего слитка  $m_{\text{сл}}$ , при индивидуальном приводе — массе  $m'_m$ , приходящейся на отдельный ролик.

Полный момент статического сопротивления ( $\text{Н} \cdot \text{м}$ )

$$M_c = M_{x,x} + M_{\text{тр}} = g \left[ (z_p m_p + m_m) 0,5 d_{\text{ш}} \mu_{\text{ш}} + m_m f \cdot 10^{-2} \right] / i \eta_x. \quad (4.215)$$

Динамический момент двигателя, необходимый для преодоления сил инерции металла, роликов и двигателя:

$$M_d = 2a \left[ \frac{z_p J + J_m}{\eta i d_{\text{ш}}} + \frac{i J_d}{d_{\text{ш}}} \right], \quad (4.216)$$

где  $a$  — линейное ускорение роликов и металла,  $\text{м/с}^2$ ;  $J$  — момент инерции ролика относительно оси ролика,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_m$  — момент инерции движущегося металла, приведенный к оси ролика,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_d$  — момент инерции двигателя и редуктора,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

Если при движении металла по роликам сила инерции металла  $m_m a$  больше силы трения между металлом и роликами  $m_m g \mu_6$  (где  $\mu_6$  — коэффициент трения при буксовании), имеет место проскальзывание металла по роликам. Критическое ускорение, т.е. максимальное ускорение, при котором не происходит буксования,  $a_{кр} = \mu_6 g$ . С учетом  $\mu_6$  получаются следующие значения  $a_{кр}$ : для холодного металла  $a_{кр} \approx 0,98 \dots 1,47 \text{ м/с}^2$ ; для горячего металла  $a_{кр} \approx 1,47 \dots 2,94 \text{ м/с}^2$ .

Ускорение и замедление транспортируемого металла не может превышать  $a_{кр}$ . Если двигатель развивает ускорение больше ускорения  $a_{кр}$ , это приводит лишь к его избыточному нагреванию и повышенному износу роликов и не влияет на производительность роляганга.

#### 4.10.2. Системы управления конвейером и транспортером

**Управление электроприводами механизмов конвейера.** Непрерывный, однонаправленный характер работы конвейеров определяет длительный режим работы их электроприводов, которые выполняются неререверсивными, за исключением редких случаев, когда требуется изменение направления движения, например для эскалаторов. Конвейеры транспортного назначения имеют одну неизменную скорость движения и не требуют регулируемого электропривода. Для некоторых конвейеров, обслуживающих технологические процессы (сборочные конвейеры, красильные и сушильные линии и т. п.), в которых при смене собираемого или обрабатываемого изделия требуется изменение скоростного режима, применяется регулируемый электропривод.

Несколько конвейеров могут объединяться общим производственным процессом в единую транспортную систему. В этом случае движения отдельных конвейеров должны быть строго согласованы между собой по скорости. К электроприводам таких конвейеров предъявляются требования синхронизации скоростей.

К электроприводам механизмов транспортных средств с непрерывным режимом работы предъявляются требования по обеспечению плавности пуска и торможения с надежным ограничением ускорения и рывка, а также максимального момента двигателя и его производной. Для канатных и ленточных конвейеров большой протяженности это требование обусловлено наличием больших масс поступательно движущихся элементов, приведенный момент инерции которых может в 10...20 раз превышать момент инерции двигателей, и значительной податливостью тяну-



ших канатов и транспортной ленты. Большие маховые массы установки увеличивают возможность пробуксовывания приводных барабанов и шкивов относительно лент и канатов при пуске. Резкое приложение момента при наличии упругих механических связей вызывает механические колебания при пуске, в результате чего в ленте или канате возникают дополнительные динамические усилия. Требование плавности пуска и замедления остается в силе и для установок с коротким тяговым элементом. В одних случаях ограничение ускорения и рывка до требуемых норм диктуется условиями транспортирования людей (эскалаторы, канатные дороги), в других — условием надежного сцепления транспортируемых изделий с лентой (ленточные конвейеры) или уменьшением раскачивания люлек и кабин (подвесные конвейеры).

Все перечисленные требования определяют выбор системы электропривода для данной группы механизмов. Наиболее распространенным типом электропривода механизмов непрерывной транспортировки является нерегулируемый привод переменного тока на основе асинхронных или синхронных двигателей. Для установок, где не возникает необходимость регулирования скорости движения и момента при пуске, применяют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.

Мощность привода с асинхронным короткозамкнутым ротором ограничивается обычно несколькими сотнями киловатт. Использование двигателей большей мощности приводит к заметному снижению коэффициента мощности питающей сети, а также к существенному падению напряжения в сети при пуске конвейера. Применение синхронного двигателя для более мощных установок позволяет существенно повысить энергетические показатели привода. Однако установки такой мощности (например, крупные ленточные и канатные конвейеры) обладают большой механической инерционностью и характеризуются тяжелым продолжительным пуском, достигающим 30... 100 с. Такой пуск может вызвать недопустимые превышение температуры синхронного двигателя и снижение напряжения сети на относительно большом интервале времени разгона. Поэтому синхронные двигатели, несмотря на ряд их очевидных преимуществ, широкого распространения в качестве привода конвейерных установок не получили.

Проблема пуска мощных конвейеров ранее решалась применением асинхронных двигателей с фазным ротором, обеспечивающих ограничение пусковых токов и формирование требуемой пусковой характеристики привода. В установках мощностью 1000 кВт и более предпочтителен двух- или трехдвигательный привод.

Для однодвигательного привода конвейеров, скорость которых в процессе работы должна регулироваться, ранее использовались

короткозамкнутые двигатели с механическими редукторами с переменным передаточным числом или многоскоростные двигатели. Вместо редуктора применялись также регулируемые электрические и гидравлические муфты.

Для плавного пуска использовались асинхронные двигатели с фазным ротором. Ограничение ускорения такого двигателя обеспечивается введением в цепь ротора необходимого количества пусковых ступеней резисторов, число которых может достигать 10...20. Для ограничения ускорения при использовании короткозамкнутых двигателей вводится добавочный резистор в цепь статора. Согласованное движение конвейеров ПТС достигается применением специальных схем включения двигателей. В частности, эта задача может быть решена с помощью электропривода, выполненного по системе электрического вала, или использованием параллельного подключения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и преобразователя частоты. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором простейших одиночных конвейеров управляются при помощи магнитных пускателей или автоматами с максимальной и тепловой защитой от перегрузки. Для управления асинхронными двигателями с фазным ротором мощных одиночных конвейеров используют магнитные станции с электрической аппаратурой для защиты и автоматического пуска двигателя.

Наиболее сложны схемы управления конвейерами поточно-транспортных систем. При совместно работающих конвейерах должна предусматриваться блокировка, обеспечивающая пуск и остановку двигателей без возникновения завала транспортируемого груза. Запускают двигатели конвейеров в последовательности, обратной направлению движения груза, а остановку линии начинают отключением двигателя конвейера, с которого груз поступает на следующие конвейеры. Полная остановка линии может произойти и при одновременном отключении двигателей. По команде на остановку прекращается поступление груза на головной конвейер и по истечении времени, необходимого для прохождения грузом всей трассы линии, все двигатели автоматически отключаются. При остановке какого-либо конвейера двигатели всех конвейеров, подающих груз на остановившийся конвейер, должны остановиться, а следующие за ним конвейеры могут продолжать работать.

**Выравнивание нагрузки в регулируемых электроприводах.** При конвейерах большой длины с многодвигательным электроприводом ставится задача автоматического регулирования отдельных двигателей с целью перераспределения нагрузки между ними и обеспечения равномерности натяжения ленты по ее длине. Это относится как к работе с установившейся скоростью движения ленты, так и к процессу пуска конвейера.

При параллельном включении двигателей, имеющих равные скорости идеального холостого хода и связанных общим механическим валом, нагрузка между ними распределяется пропорционально модулю жесткости их механических характеристик [21]. Для двухдвигательного привода моменты первого и второго двигателей:

$$M_1 = \frac{\beta_1}{\beta_1 + \beta_2} M_{ст}; \quad (4.217)$$

$$M_2 = \frac{\beta_2}{\beta_1 + \beta_2} M_{ст}, \quad (4.218)$$

где  $\beta_1$  и  $\beta_2$  — модули жесткости механических характеристик первого и второго двигателей;  $M_{ст}$  — результирующий момент сопротивления приводной станции.

Если каждый из двух двигателей выбран на номинальный момент  $M_{ном} = 0,5M_{ст}$ , двигатель с бóльшим значением  $\beta$  оказывается перегруженным. При длительном режиме работы даже небольшая перегрузка может вывести из строя двигатель, поэтому важно обеспечить условие  $\beta_1 = \beta_2$ . Для выполнения этого условия применяют строго идентичные по исполнению, мощности и скорости двигатели. Если жесткости их характеристик все же различаются, то, например, у асинхронных двигателей с фазным ротором более жесткая характеристика смягчается введением в роторную цепь дополнительного сопротивления.

Рассмотрим работу конвейера, имеющего три электродвигателя. На рис. 4.108 представлена диаграмма тяговых усилий ленточного конвейера с электродвигателями М1, М2, М3 и натяжным устройством Б.

При одинаковой загрузке ветвей конвейера все двигатели (если их характеристики одинаковы) имеют равные скорости и нагрузку.

Увеличение нагрузки на ветвь I приведет к тому, что в первую очередь снизится скорость двигателя М1, а скорость двигателей М2 и М3 останется постоянной. Таким образом, двигатель М2 будет вращаться со скоростью, большей чем у двигателя М1, и создаст дополнительное натяжение в ветви II, а затем и в ветви I. Натяжение ветви II повлечет за собой некоторую разгрузку двига-

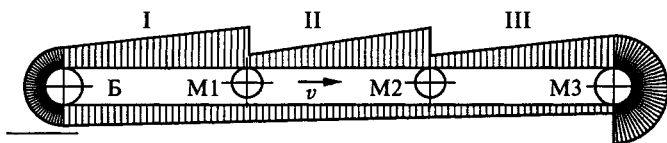


Рис. 4.108

теля М1 и увеличение его скорости. Такие же процессы будут иметь место и в ветви II, так как двигатель М3 примет на себя часть нагрузки ветви II конвейера. Постепенно скорости и нагрузки двигателей выравниваются.

Для выравнивания нагрузки приводов конвейеров переменного тока с преобразователями частоты используют схему управления моментами, рассмотренную в п. 3.6.4. В этом случае для каждого двигателя необходимо применять управляемый преобразователь.

**Система управления транспортером весового дозатора.** Дозаторы непрерывного действия предназначены для непрерывного автоматического весового дозирования сыпучих материалов в различных системах управления технологическими процессами. Дозатор состоит из весового транспортера ТВЛ1 с бортами, кожухами, подвесками для контрольных весов, формирующей воронкой, датчиком уровня материала и электрооборудования.

Транспортер ТВЛ1 (рис. 4.109) состоит из следующих основных частей: основания 14, рамы 12, привода, ведущего 4 и ведомого 10 барабанов, транспортной ленты 6, грузоприемного узла 13, центрирующего устройства 9, весоизмерителя 5, узлов конечного выключателя 11, плужного скребка 7 и скребка 8.

Применен частотно-регулируемый электропривод с управлением по  $U/f$ -характеристике. Асинхронный электродвигатель 2 соединен муфтой с двухступенчатым цилиндрическим редуктором 1 и передачей с датчиком скорости. Двигатель установлен на основании транспортера со стороны загрузки материала и связан с ведущим барабаном цепной передачей 3. Натяжение цепи осуществляется перемещением барабана в пазах, расположенных в плите привода.

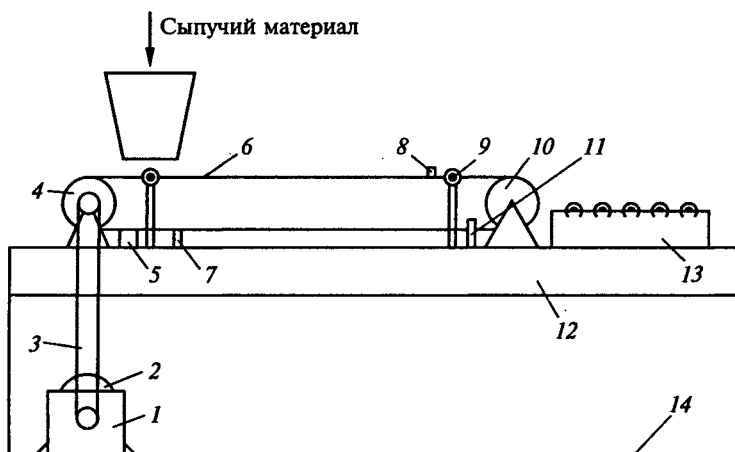


Рис. 4.109

Лента транспортера через цепную передачу получает движение от привода с двигателем переменного тока. Материал, подаваемый на грузоподъемную часть транспортера, лентой перемещается на весовой участок. На весовой участке нагрузка материала воспринимается весоизмерителем и преобразуется тензодатчиком в пропорциональный электрический сигнал.

Датчик уровня материала предназначен для выдачи сигнала о наличии материала в формирующей воронке. В зависимости от исполнения дозатора применяется весовой или диафрагменный датчик. Принцип действия датчика основан на свойстве материалов оказывать давление на стенки и дно бункера.

Комплект электрооборудования состоит из шкафа управления (в том числе контроллера), стойки приборов, преобразователя, аварийного выключателя, поста оператора.

Электрооборудование предназначено для преобразования сигнала тензорезисторных датчиков веса и датчика скорости весового транспортера в сигнал, пропорциональный мгновенной производительности, учета суммарной массы выданного материала, а также автоматического регулирования и поддержания заданной производительности.

Электродвигатель привода транспортера, тензорезисторные датчики и конечные выключатели расположены на транспортере дозатора. Аппаратура защиты и коммутации, а также частотный преобразователь размещены в шкафу управления, аппаратура измерения, регулирования, управления и сигнализации находится в стойке приборов.

В состав электрооборудования входят устанавливаемый в стойке приборов прибор вторичный интегрирующий ПВИ, фиксирующий суммарную массу материала, а также посты наладочного управления и аварийный переключатель.

Задача управления сводится к поддержанию постоянной производительности дозатора в пределах допустимой погрешности.

Масса вещества, движущегося по ленте конвейера:

$$M = dm\nu T, \quad (4.219)$$

где  $dm$  — приходящаяся на единицу длины масса, фиксируемая тензодатчиком, за исключением массы ленты под ним, кг/м;  $\nu$  — скорость ленты, м/с;  $T$  — периодичность анализа производительности дозатора, с.

Производительность дозатора

$$Q = M/T = dm\nu. \quad (4.220)$$

Производительность дозатора можно регулировать скоростью ленты или значением  $dm$ , а также этими параметрами одновременно. Для этого системой управления в цикле постоянно опрашивается тензодатчик и фиксируется значение  $dm$ , после чего

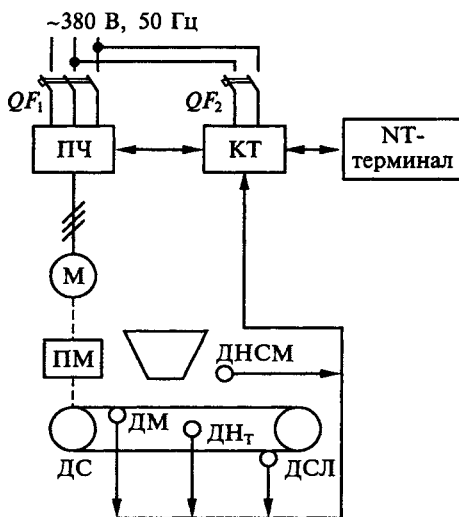


Рис. 4.110

исходя из формулы (4.220) вычисляется скорость, которая задается приводу.

На рис. 4.110 приведена функциональная схема СУ транспортером весового дозатора, предназначенного для дозирования сульфата. На схеме приняты следующие обозначения: ДНСМ — датчик наличия сыпучего материала, ДСЛ — датчик схода ленты, ДНт — датчик натяжения ленты, ДМ — датчик массы, ДС — датчик скорости.

Перед началом работы задается производительность дозатора. Ее задает с терминала оператор. Контроллер сравнивает заданную производительность с реальной и в зависимости от результата подает сигнал на изменение скорости двигателя. Сравнение производительностей происходит следующим образом: находящийся в системе тензодатчик фиксирует массу сульфата и передает информацию в контроллер, где данные умножаются на скорость ленты и сравниваются с заданной производительностью. В зависимости от результата подается сигнал на изменение скорости двигателя. Таким образом, задача контроллера сводится к выдерживанию постоянной производительности, учету подаваемого материала, обеспечению возможности пользователю на терминале менять производительность, поддержанию нового значения производительности (через регулятор скорости), сообщению об авариях, фиксации мгновенной производительности.

Для регулирования скорости двигателя конвейера применяется преобразователь частоты Altivar 66.

На контроллере реализован алгоритм функционирования, который для удобства разделен на три части: «Авария», «Автомат», «Переходы по экранам».

*Алгоритм «Авария»* обеспечивает обработку аварийных ситуаций, возникающих в процессе работы системы. В алгоритме предусмотрены шесть аварийных ситуаций: сход ленты, большое натяжение ленты, отсутствие сульфата в бункере, перегрузка привода, ошибка привода, аварийный стоп.

Информацию о первых трех авариях СУ получает от датчиков, о последних двух — от преобразователя частоты. Кнопка аварийной остановки может быть нажата вручную, поэтому эта ситуация зависит от оператора.

Если при работе программы сработал один из датчиков, на терминале загорается соответствующий экран, оповещающий оператора об аварийной ситуации. Предусмотрен звуковой сигнал, оповещающий о возникновении аварийной ситуации. Обработка перегрузки привода, ошибки привода, аварийной остановки осуществляется выведением на терминал соответствующего экрана. Кнопка аварийной остановки выполнена с фиксацией, ее нажатие приводит к размыканию цепи и посылке информации в контроллер о нажатии кнопки. Если оператор нажал кнопку «Пуск» в шкафу, работа возобновляется. Первые три аварии обрабатываются аналогично.

*Алгоритм «Автомат»* является основной частью программы. К его функциям относятся слежение за переменными (заданной и истинной производительностью), а также контроль работы системы управления.

В автоматическом режиме происходит отслеживание истинной производительности дозатора. По мере поступления информации от тензодатчика программа вычисляет мгновенное значение производительности и сравнивает его с заданным, которое оператор задает и может менять. Если оператор не задан производительность (например, при проведении тарировки), двигатель будет вращаться с минимальной скоростью. При равенстве заданного и измеренного значений цикл заканчивается, а при неравенстве высчитывается новая скорость, и цикл также заканчивается. На следующем шаге все повторяется.

*Алгоритм «Переходы по экранам»* является интерфейсным и обеспечивает переход по экранам в зависимости от нажатия запрограммированных клавиш.

Экраны служат интерфейсом между контроллером и оператором. С их помощью оператор наблюдает за значениями нужных переменных, аварийными ситуациями, имеет возможность внести необходимые изменения. В программе предусмотрено восемь экранов, каждый из которых несет определенную информацию.

Программирование осуществляется при помощи пакета Syswin31 фирмы Omron, который предназначен для программирования релейно-контактных схем. Пакет написан для Windows. Программа разделена на отдельные модули (Main), которые поделены на цепочки (Network). Это деление условно и на работу программы влияния не имеет, оно нужно лишь для удобства редактирования.

#### **4.10.3. Системы управления маршрутным электротранспортом (трамваем, троллейбусом, вагоном метрополитена)**

**Трамвай.** Подвижной состав трамвая в зависимости от конкретных условий эксплуатации подразделяется (условно) на три группы: для обычных городских линий; для обычных городских и совмещенных с ними скоростных линий (универсальные вагоны); для специализированных скоростных линий на обособленном полотне (вагоны скоростного трамвая). Для каждой из указанных групп разработан типоразмерный (типажный) ряд трамвайных вагонов нового поколения.

Питающей сетью трамваев является сеть постоянного напряжения 550 В. Вагоны рассчитаны на скорость движения до 70 км/ч.

При создании трамвайных вагонов нового поколения применяется унифицированное тяговое электрооборудование — частотно-регулируемый асинхронный тяговый привод (АТП), транзисторно-импульсные системы управления (ТИСУ), программируемые контроллеры, позволяющие повысить тягово-энергетические и эксплуатационные показатели подвижного состава трамвая с сохранением модульного принципа проектирования и общих принципов планировки пассажирского помещения.

В тяговом электроприводе (ТЭП) старых трамваев большое пространство получил реостатный регулируемый электропривод постоянного тока, хорошо согласующийся с питающей сетью трамваев. Такой привод обладает плохими энергетическими и эксплуатационными характеристиками (см. п. 1.3). Один из оптимальных способов реконструкции ТЭП заключается в применении экономичной ТИСУ. На рис. 4.111 представлена упрощенная схема силовой части ТИСУ трамвая [26]. Регулирование тяговыми двигателями, установленными на каждую ось вагона трамвая, осуществляется от преобразователя на IGBT-транзисторах с широтно-импульсным регулированием. Данный преобразователь позволяет возвращать энергию торможения в контактную сеть. Программируемый контроллер обеспечивает все необходимые режимы управления электроприводом при разгоне, движении и остановке трамвая. Для приводов вентиляторов и одновременно для подзарядки аккумуляторной батареи вместо моторов-генераторов использу-



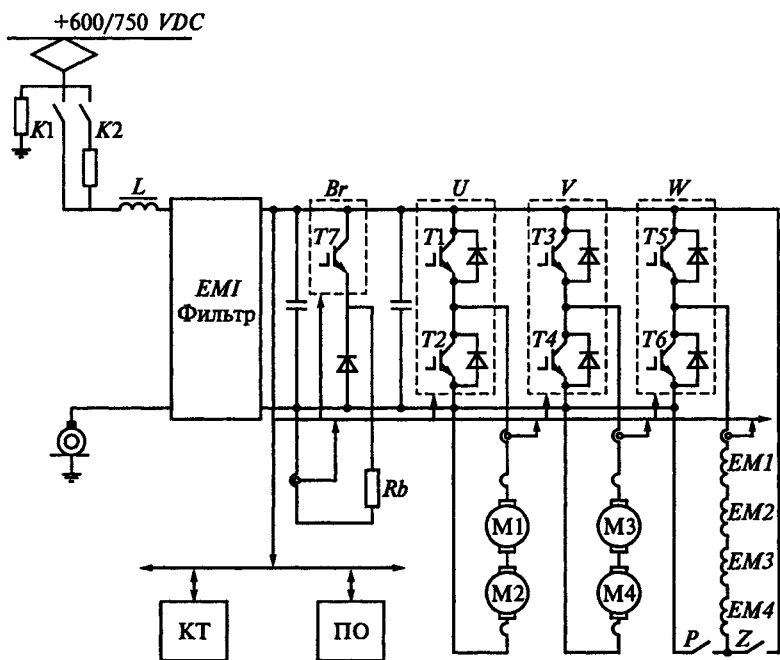


Рис. 4.111

ются статические преобразователи. Статический преобразователь через инвертор питает также вентиляторы охлаждения тяговых двигателей. Открывание и закрывание дверей производится из кабины водителя с помощью пневмопривода.

Трамвай, состоящий из одного или двух моторных вагонов, оснащенных современными тяговыми электродвигателями повышенной мощности, и пассивного прицепного вагона, успешно эксплуатируется на равнинном профиле и участках с подъемами до 5%. Расчеты показывают, что при этом обеспечиваются достаточно высокие тягово-тормозные характеристики и эксплуатационные показатели работы на маршруте.

В качестве базовой модели для многоосного подвижного состава принят шестиосный головной трамвайный вагон ЛВС-86 с ТИСУ [19], двухсекционным шарнирно соединенным кузовом, двумя тяговыми тележками и бегунковой (безмоторной) тележкой, расположенной под узлом соединения. Вагон предназначен для одностороннего движения и рассчитан на эксплуатацию как самостоятельно, так и в составе из двух вагонов, управляемых по системе многих единиц.

Для обеспечения безопасности пассажиров вагон оборудован системой блокировки, исключающей возможность трогания при

открытых дверях, а также датчиками пожарной сигнализации, установленными в пассажирском помещении и кабине водителя.

В связи с увеличением массы вагона показатели динамики разгона и максимум установившейся скорости при однотипных тяговых двигателях у шестиосного вагона несколько снизились по сравнению с четырехосным. Однако в условиях равнинного профиля пути и характерных для крупных городов помех движению это не повлияло на реальные эксплуатационные скорости сообщения.

Создаваемые вагоны оборудуются ТЭП с ансинхронными двигателями и полупроводниковыми преобразователями частоты. Такие электроприводы схожи с ТЭП троллейбусов.

В трамваях применяются комплекты тягового электрооборудования с двигателями ТАД-1 и ТАД-2 мощностью 75 и 60 кВт соответственно. ТАД-1 предназначен для установки на шестиосных трамвайных вагонах, ТАД-2 — на четырехосных.

**Троллейбус.** В троллейбусах применяются комплекты тягового электрооборудования с реостатно-контакторной системой управления. Например, комплекты: с двигателем смешанного возбуждения мощностью 110 кВт для двухосного троллейбуса; с двигателем серийного (последовательного) возбуждения мощностью 170 кВт для шарнирно соединенного троллейбуса; с двигателем смешанного возбуждения и крышевым расположением оборудования.

В новых разработках троллейбусов, как и трамваев, используется ТЭП с ТИСУ или частотно-регулируемым асинхронным двигателем.

Тиристорно-импульсная система управления имеет следующие особенности и преимущества:

экономия электроэнергии до 25 % по сравнению с контакторно-резисторными системами управления;

плавное бесступенчатое регулирование скорости;

электродинамическое торможение тяговым электродвигателем до скорости 2...3 км/ч при отсутствии напряжения в контактной сети;

движение при любой полярности контактной сети с автоматическим переключением прямой и обратной полярности;

применение электромеханического реверсора в цепи якоря тягового электродвигателя;

бестоковая коммутация контакторов;

самодиагностика с выводом световой и звуковой информации;

быстродействующая электронная защита от пониженного напряжения в контактной сети, перегрузок и коротких замыканий, ошибочных действий водителя.

Наиболее перспективными электроприводами для городского транспорта являются электроприводы переменного тока с преобразователями частоты.

Из всего многообразия известных схем частотно-управляемых асинхронных электроприводов наиболее приемлемыми вариантами применительно к ТЭП городских троллейбусов могут быть следующие два:

- с «векторным» способом цифрового управления;
- с аналоговой обратной связью по ЭДС статора с подчиненным контуром активного тока и воздействием на частоту и напряжение статора и абсолютное скольжение ротора.

Силовая электрическая схема первого из указанных вариантов электропривода показана на рис. 4.112. В ней приняты следующие обозначения: МП — микропроцессор, МТ — модуль транзисторный, ДТ — датчик тока, ДН — датчик напряжения, ДС — датчик скорости, ДД — датчик открытия и закрытия дверей.

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором регулируется от преобразователя на IGBT модулях. В состав контроллера кроме 32-разрядного DSP-процессора TMS320132PCM5 входят постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), выполненное на микросхеме типа AM29F010-120PS, и оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) на двух микросхемах AS7C 1024-15 JS. ПЗУ предназначено для хранения рабочих программ, реализующих математические функции, используемые при формировании алгоритмов «векторного» управления, в частности преобразование величин из трехфазной в ортогональную систему координат и обратно. ОЗУ используется для хранения оперативной информации, промежуточных расчетов при формировании тех же алгоритмов. Блок логики построен на микросхеме программируемой логики типа XCS30XL-PQ240 и ПЗУ AT17c128-10pi. В рассматриваемом контроллере тактовая частота 16 МГц. На выходе контроллера формируются импульсы на включение и выключение полупроводниковых силовых элементов инвертора, подчиняющиеся определенному временному ШИМ-алгоритму, который создает необходимые алгоритмы регулирования напряжения и частоты на выходе инвертора во всех режимах пуска, разгона, регулирования скорости и торможения тягового асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором, обеспечивая его наилучшие энергетические и динамические характеристики (КПД,  $\cos\phi$ , быстродействие).

Для удобства связи контроллера с внешними аналоговыми сигналами (датчиками тока и напряжения) в схеме предусмотрены аналогово-цифровые преобразователи и отдельные входы для импульсного датчика частоты вращения и других датчиков, обеспечивающих безопасность пассажиров.

Для организации обратной связи по частоте вращения в конструкции АД предусмотрен встроенный импульсный датчик скорости высокой точности. Асинхронный двигатель мощностью 180 кВт типа ТАД-3У имеет закрытое исполнение с принудительным охлаждением самообдувом (степень защиты IP54). Такое исполне-

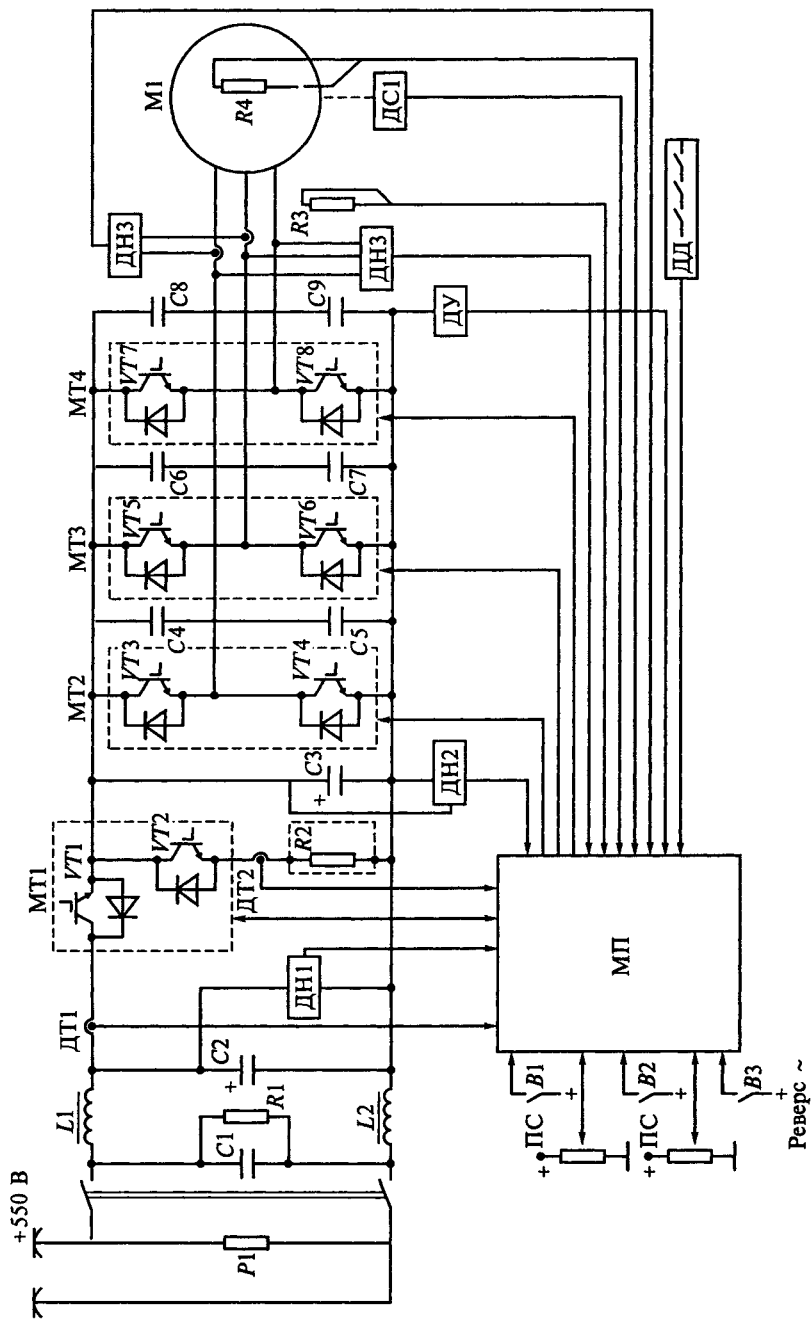


Рис. 4.112

ние более удобно для троллейбуса, хотя приводит к увеличению массы.

Большой объем памяти ОЗУ и ПЗУ совместно с блоком логики кроме основных функций позволяет одновременно выполнять операции по диагностированию теплового состояния силовых элементов, а также устройств формирования дискретной информации ШИМ-каналов. Функции индикации прохождения команд управления и измерения регулируемых параметров (напряжения, частоты) выполняются параллельно с основными функциями.

Отсутствие высокоточного датчика скорости в жестких условиях эксплуатации выгодно отличает от первого второй вариант схемы (рис. 4.113), в котором обратная связь по частоте вращения заменена на аналоговую обратную связь по ЭДС статора с подчиненным контуром активного тока и воздействием на частоту и напряжение статора и абсолютное скольжение ротора. На схеме приняты следующие обозначения: ЗИ — задатчик интенсивности; ДЭ — датчик ЭДС; РЭ — пропорционально-интегральный регулятор ЭДС; РТ — пропорционально-интегральный регулятор тока; ФП — функциональный преобразователь; АИН — автономный инвертор напряжения; РН, РЧ — соответственно регуляторы напряжения и частоты; КИ — блок выделения частоты скольжения.

Система управления обеспечивает большой избыточный момент в диапазоне малых частот вращения двигателя с целью максимально быстрого набора скорости движения троллейбуса (в пре-

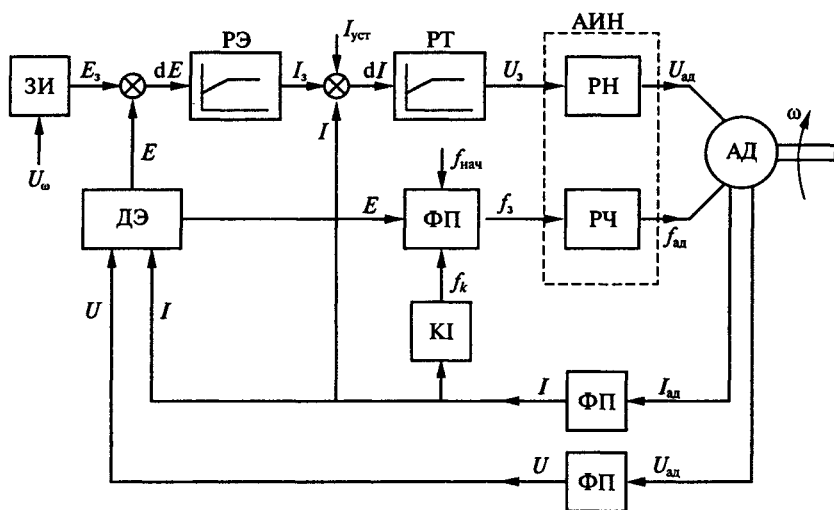


Рис. 4.113

делах допустимого ускорения) при минимальном потреблении тока. Это достигается за счет того, что в алгоритм управления введены конкретные соотношения между частотой и напряжением инвертора, изменяющиеся в процессе пуска. В самом начале пускового режима допустимо увеличение отношения напряжения к частоте. Благодаря контуру стабилизации ЭДС увеличение напряжения относительно частоты не сопровождается чрезмерным насыщением магнитопровода.

За счет применения ПИ-регулятора ЭДС, а также создания обратной связи между активным током статора и темпом изменения напряжения на выходе инвертора система управления ограничивает пусковой ток двигателя.

Отсутствие датчика частоты вращения в этом схемном решении обусловлено тем, что он является слабым, ненадежным техническим элементом системы, особенно в условиях работы в морозную и жаркую погоду, при наличии грязи, пыли, соленой воды на городских дорогах.

Достаточно жесткая рабочая характеристика АД позволяет отказаться от автоматического регулирования частоты вращения двигателя. В этом случае достаточно задать начальную частоту инвертора и быть уверенным, что до начала вращения двигателя ее значение не превысит значения критического скольжения. Водитель при помощи педали движения задает значение основной гармоники напряжения статора, которое будет стабилизироваться методом ШИМ по сигналу рассогласования относительно ЭДС двигателя. При этом частота статора определяется автоматически линейным звеном по сигналу датчика ЭДС.

В настоящее время ведутся разработки троллейбуса с автономным ходом. В тяговом приводе применены транзисторные преобразователи с двигателем постоянного тока, а в качестве накопителя используются ионистровые источники тока.

**Вагоны метрополитена.** За время существования отечественного метрополитена метровагоностроителями были созданы шесть основных типов (моделей) вагонов, которые успешно эксплуатировались или находятся в эксплуатации в настоящее время.

Основные параметры находящихся в настоящее время в эксплуатации отечественных вагонов типов 81-717 и 81-714 представлены в табл. 4.3 [13].

На Петербургском метрополитене в настоящее время находятся в эксплуатации в основном вагоны следующих типов: Е (Ем — средний вагон, Ема — головной вагон, Емх — хвостовой вагон), 81-714, 81-717. Каждый вагон имеет четыре электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения, самовентилируемых (ДК-108 или ДК-117), получающих питание (825 В постоянного тока) от третьего контактного рельса, который проложен с правой или левой стороны ходовых рельсов.

Таблица 4.3

Параметр	81-714	81-717	81-720	81-721
Максимальная скорость, км/ч	90	90	100	100
Длина вагона по центрам головок автосцепок, мм	19 210	19 210	20 300	19 500
База, мм: вагона	12 600	12 600	12 600	12 600
тележки	2 100	2 100	2 150	2 150
Диаметр колес, мм	780	780	860	860
Масса, т: тары	32,5	33,5	34,5	33
тележки	7,5	7,5	7,5	7,5
пассажиров при максимальной загрузке	23,0	21,5	23,0	24,5
Мощность тягового электродвигателя, кВт	110	110	115	115
Ускорение пуска, м/с	1,2	1,2	1,3	1,3
Замедление служебного торможения, м/с <sup>2</sup>	1,0	1,0	1,3	1,3

Для контроля фактической скорости вагона применяются датчики скорости, установленные на второй и четвертой колесных парах головного вагона. При вращении колесной пары датчик скорости вырабатывает сигналы переменной частоты от 27,5 до 1210 Гц, что соответствует скорости движения вагона от 5 до 220 км/ч. Датчик скорости имеет дисковый ротор с 49 зубцами при диаметре колеса вагона 780 мм и четыре катушки, соединенные последовательно.

Для открытия и закрытия дверей в вагоне применяются пневмоприводы с цепной передачей.

Для регулирования скорости электродвигателей вагона применяются реостатные контроллеры ЭКГ-17, ЭКГ-36 или ЭКГ-39. Изменение сопротивления в цепи происходит в результате замыкания и размыкания кулачковых контакторов. Ящик реостатного контроллера подвешен с правой стороны вагона.

Управление движением состава электропоезда осуществляется из кабины машиниста контроллером (для вагонов типа Е — КВ55; 81-714, 81-717 — КВ69 или КВ70).

Новые вагоны метрополитена изготовлены в двух модификациях: головной вагон с кабиной управления (модель 81-720) и промежуточный моторный — без кабины управления, с устройством для маневровых работ (модель 81-721). Поезд формируется

из двух головных и одного или нескольких промежуточных вагонов; максимальное число вагонов в поезде — 10, минимальное — 3. Имеется микропроцессорная система управления с техническим диагностированием (автоматический и ручной режимы).

На раме тележки установлены два моноблока, состоящие из тягового двигателя и редуктора. Передача вращающего момента от вала тягового двигателя через редуктор к оси колесной пары осуществляется через полый вал с упругими муфтами. Таким образом, в этих тележках реализовано опорно-рамное подвешивание тягового двигателя и редуктора.

Центральное подвешивание вагона — пневматическое, состоит из четырех пневморессор и систем питания сжатым воздухом и управления, которые обеспечивают постоянство уровня пола кузова относительно пассажирской платформы.

Вагоны оборудованы тяговым тиристорно-импульсным электроприводом постоянного тока, обеспечивающим автоматический безреостатный пуск, автоматическое регулирование возбуждения, следящее рекуперативно-реостатное торможение, автоматическое замещение электрического торможения пневматическим, совместную работу с системами безопасности движения и автоведения.

Тормозная система вагона имеет следующие виды тормозов: рабочий — электродинамический следящий рекуперативно-реостатный; резервный и аварийный — фрикционный с электропневматическим приводом; стояночный — фрикционный с пневмопружинным приводом, обеспечивающий удержание вагона на уклоне 60 ‰. Тормоза на тележках опытных вагонов выполнены дисковыми или односторонними колодочными. Тележки с дисковыми тормозами имеют большую массу.

Принудительная вентиляция осуществляется через вентиляторные агрегаты, размещенные под диванами. Они состоят из электродвигателей мощностью 75 Вт и 0,2 кВт, на валы которых насажены лопасти вентиляторов. Воздух поступает через всасывающие решетки, расположенные на боковине кузова вагона, фильтрующие и заборные воздухопроводы. Частота вращения агрегата  $1500 \text{ мин}^{-1}$  подача  $5000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . В вагоне расположено 13 или 14 вентиляторов.

Поездная система управления представляет собой комплект бортовых компьютеров, связанных друг с другом и поездным компьютером единым каналом связи. Система обеспечивает управление поездом одним машинистом, хранение информации о работе оборудования и отображение ее на дисплее в кабине машиниста. Она стыкуется с системами автоматического управления и безопасности движения.

Многочисленные датчики, установленные на вагоне, дают информацию о состоянии оборудования поезда. Диагностическая информация выводится на экран дисплея, расположенного в кабине машиниста.



#### 4.10.4. Характеристика подъемно-транспортного оборудования и электроприводов

К подъемно-транспортным машинам относятся различные по конструкции подъемники, лебедки и краны.

Подъемно-транспортные машины общепромышленного назначения по принципу действия можно условно разделить на машины прерывистого действия, у которых время действия чередуется с паузой, и машины непрерывного действия. Например, цикл работы подъемного механизма мостового крана состоит из подъема груза, паузы, в течение которой кран перемещается к месту выгрузки, опускания груза, подъема грузозахватывающего приспособления, второй паузы, вызванной возвращением крана к месту загрузки. Примером машины непрерывного действия может служить многокабинный пассажирский лифт или конвейер.

Подъемно-транспортные машины могут включать в свой состав несколько механизмов, обеспечивающих движение груза в различных направлениях, подъемную лебедку, механизмы горизонтального перемещения и вращения.

Выбор системы электропривода и режимы его работы в значительной степени определяются статической нагрузкой, создаваемой механизмом на валу приводного двигателя. Значение и характер статической нагрузки двигателя механизмов прерывистого действия существенно зависят от кинематической схемы и природы сил, определяющих сопротивление движению. Если в подъемных лебедках основной силой сопротивления является вес поднимаемого груза (активная сила), то в механизмах передвижения и вращения — реактивная сила трения. В неуравновешенной подъемной лебедке (без противовеса) направление действия активной силы не зависит от массы груза, а в уравновешенной подъемной лебедке (с противовесом) направление результирующей силы определяется массой перемещаемого груза. Нормальная, отвечающая всем требованиям технологического процесса работа механизма циклического действия зависит от правильного выбора электропривода и системы электроснабжения.

**Общие сведения о подъемных кранах.** Подъемные краны — это машины, служащие для вертикального и горизонтального перемещения грузов. Подвижная металлическая конструкция с расположенной на ней подъемной лебедкой являются основными элементами подъемного крана. Механизмы передвижения фермы крана и подъемной лебедки приводятся в действие электрическими двигателями.

На рис. 4.114 приведена схема наиболее распространенного на промышленных предприятиях мостового крана, состоящего из следующих составных частей: кабины управления  $I$ ; механизма

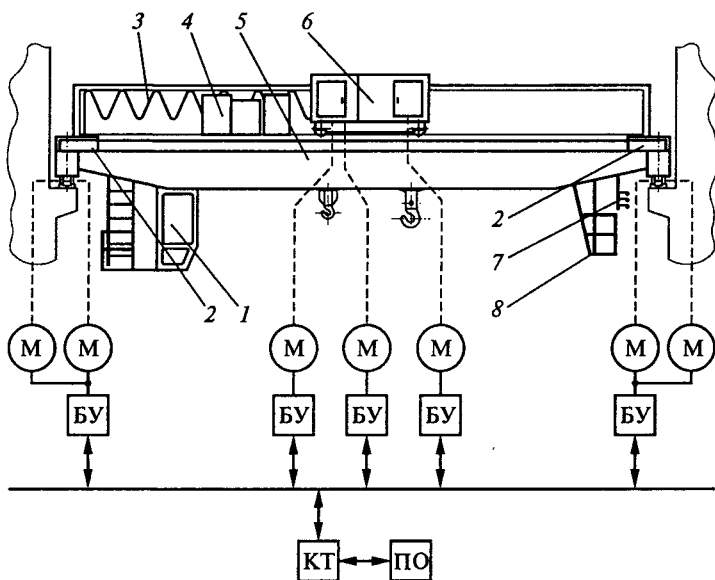


Рис. 4.114

передвижения крана 2; кабеля электропитания грузовой тележки 3; электрооборудования 4; моста крана 5; грузовой тележки 6; установки главного токоприемника 7; кабины для обслуживания троллеев 8.

Крановый мост опирается на ходовые колеса и перемещается по подкрановым путям, уложенным на выступах верхней части стены цеха. Ходовые колеса крана приводятся во вращение механизмами передвижения крана 2, которые состоят из отдельных приводов, установленных на площадках пролетного строения моста.

Тележка 6 движется по двум рельсам, закрепленным на главных балках моста. Электрооборудование 4 размещено на площадке моста, на тележке и в кабине управления. Питание крана осуществляется через жесткие уголкового троллеи, размещенные вдоль подкрановых путей.

Питание механизмов тележки осуществляется через гибкий кабель 3, подвешенный на специальном монорельсовом пути при помощи подвижных кареток.

Металлоконструкция моста крана коробчатого типа.

Для смягчения удара при подходе крана к концевым упорам или при сближении с другим краном на торцевых балках предусмотрены пружинные буфера.

Пролетные строения и торцевые балки ограждены перилами.

При передвижении крана применен отдельный привод на каждом крановом колесе. Привод выполнен в навесном исполнении

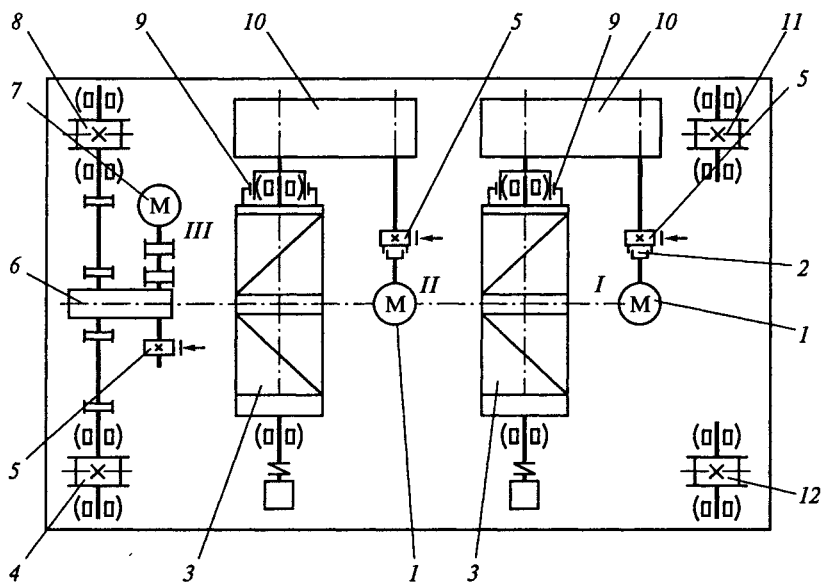


Рис. 4.115

(установлен консольно на валу колеса). От поворота привод удерживает кронштейн, закрепленный на концевой балке. В состав привода входят четыре электродвигателя.

Кинематическая схема тележки приведена на рис. 4.115. Тележка состоит из механизмов главного подъема *I*, вспомогательного подъема *II* и передвижения *III*.

Механизм главного подъема состоит из электродвигателя *1*, соединенного валом-вставкой *2* с редуктором *10*. Выходной вал редуктора соединен зубчатой муфтой *9* с барабаном *3*. Колодочный тормоз с пружинным замыканием *5* и короткоходовыми электромагнитами переменного тока установлен на быстроходном валу редуктора *10*, где действует наименьший вращающий момент (на одной из полу муфт соединения двигателя с редуктором). В качестве ограничителя высоты подъема применен шпindelный выключатель, выключающий ток при достижении крюковой подвески крайнего верхнего или нижнего положения.

Механизм вспомогательного подъема имеет аналогичную кинематическую схему.

Оба механизма подъема оборудованы крюковыми обоймами.

Механизм передвижения тележки состоит из двигателя *7*, тормоза *5*, вертикального зубчатого редуктора *6*, двух ведущих *4* и *8* и двух холостых ходовых колес *11* и *12*. На раме тележки укреплена линейка конечных выключателей, ограничивающих путь передвижения тележки.

В кабине управления размещены все органы управления крана. Кабина имеет закрытое исполнение. Кроме комплекта электрооборудования управления в кабине размещено сервисное оборудование, позволяющее создавать комфортные условия для работы крановщика в диапазоне температуры окружающей среды от плюс 40 °С до минус 40 °С.

На крановых установках допускается применять рабочее напряжение до 660 В. Поэтому крановые механизмы снабжают электрооборудованием на напряжение 220, 380 и 660 В переменного тока и 220, 440 В постоянного тока. В схеме управления предусматривают максимальную защиту, отключающую двигатель при перегрузках и коротком замыкании. Нулевая защита исключает самозапуск двигателей при подаче напряжения после перерыва электроснабжения.

Условия работы кранов крайне разнообразны. Предусматриваются четыре режима работы механизмов: легкий — Л, средний — С, тяжелый — Т и весьма тяжелый — ВТ. В справочной литературе приводятся характеристики режимов работы механизмов, определяемые коэффициентами  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ , продолжительностью и частотой включений, температурой окружающей среды.

Коэффициент использования механизма по грузоподъемности  $k_1 = m_{\text{ср}}/m_{\text{ном}}$ , где  $m_{\text{ср}}$  — средняя масса;  $m_{\text{ном}}$  — масса номинального груза.

Коэффициент годового использования механизма  $k_2 = T_1/365$ , где  $T_1$  — число дней работы механизма за год.

Коэффициент суточного использования механизма  $k_3 = T_2/24$ , где  $T_2$  — число часов работы механизма в сутки.

Продолжительность включения двигателя механизма ПВ (%) =  $100t_p/(t_p + t_0)$ , где  $t_p$  — время работы двигателя за цикл;  $t_0$  — время паузы.

Режим работы грузоподъемной машины циклический. Цикл состоит из перемещения груза по заданной траектории и возврата машины в исходное положение для нового цикла. В цикле работы машины время включения (работы) любого из его механизмов  $t_p$  чередуется с временем пауз  $t_0$  этого механизма (пока включен другой механизм, происходит застроповка или расстроповка груза либо технологическая пауза). Условные циклограммы работы грузоподъемного строительного крана приведены на рис. 4.116, где 1 — обтягивание троса; 2 — подъем груза или только крюка без груза (при возврате в исходное положение); 3 — спуск груза или только крюка; 4 — посадка груза или только крюка; 5 — «гашение» раскачки; 6 — горизонтальное движение; 7 — наведение крана в заданные координаты.

Редукторы и блоки механизмов крана имеют переменные и постоянные потери на трение и перемешивание смазочного материала. Полные потери в передачах определяются значением КПД

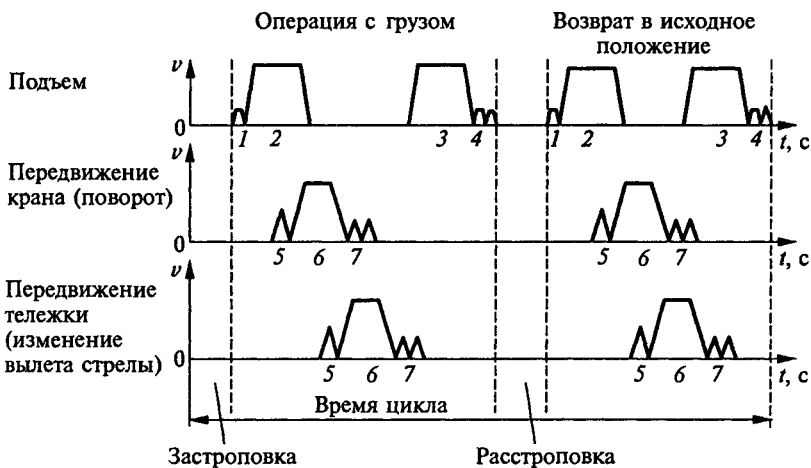


Рис. 4.116

редуктора  $\eta_{\text{ном}}$  в номинальном режиме. При этом доля постоянной составляющей потерь, не зависящих от нагрузки, составляет 40...50 % общих потерь в передачах.

**Выбор крановых электродвигателей.** Двигатели для механизмов, выполняющих рабочие операции по подъему и горизонтальному перемещению груза, выбираются в зависимости от требований, предъявляемых к работе каждого механизма, перерабатываемого груза, рода тока, значения напряжения, скорости и диапазона ее регулирования, конструктивного исполнения двигателя, способа защиты от влияния окружающей среды.

Исходными данными при выборе электродвигателей являются: статические и динамические нагрузки, приведенные к валу двигателя; параметры режима работы; время приложения статической и динамических нагрузок, а также технологические особенности работы механизмов, определяющие число грузовых циклов.

В задачу выбора двигателя входят предварительный выбор двигателя, расчет его на удовлетворение тепловому режиму, а также проверка обеспечения заданных ускорений (обеспечения пускового режима и запаса сцепления для механизмов передвижения).

Нагрузки механизмов кранов изменяются как по абсолютному значению от номинальных до значений холостого хода, так и по направлению в режимах тяги (подъема) и торможения (спуска). На рис. 4.117 представлены области изменения нагрузок крановых механизмов при подъеме (см. рис. 4.117, а) и передвижении (см. рис. 4.117, б) [55]. Заштрихованные области соответствуют статическим нагрузкам при установившемся движении; незаштрихованные — динамическим.

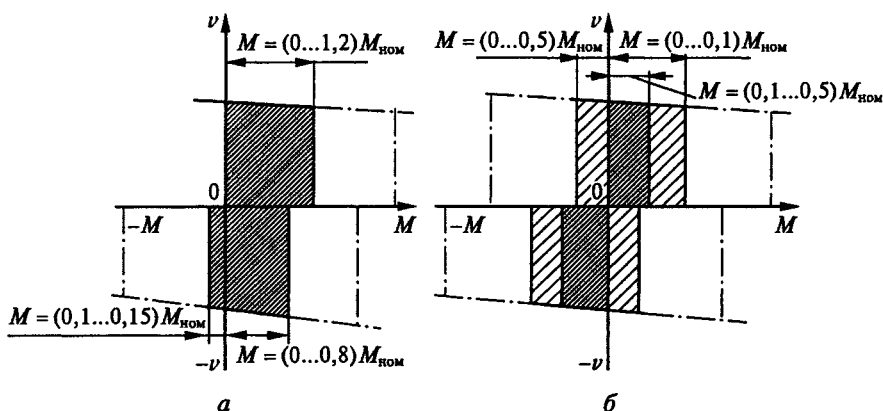


Рис. 4.117

ванные области, ограниченные штрихпунктирными линиями, соответствуют действию нагрузок в режиме разгонов и торможений. Более частой штриховкой отмечена область действия установившихся нагрузок механизмов, не подвергающихся давлению ветра или движению под уклон. Более редкой штриховкой обозначена зона действия нагрузок от попутного ветра.

**Статические нагрузки.** Статическая мощность на валу электродвигателя подъемной лебедки при подъеме груза (кВт)

$$P_{ст.л} = \frac{(Q + q)v_n}{10^3 m_n \eta}, \quad (4.221)$$

где  $Q$  — вес поднимаемого груза, Н;  $q$  — вес крюковой подвески, захвата, спредера, грейфера или грузоподъемного магнита, Н;  $v_n$  — номинальная скорость подъема груза, м/с;  $\eta$  — КПД канатной системы и механизма при подъеме номинального груза;  $m_n$  — число механизмов, поднимающих груз.

Статическая мощность на валу электродвигателя механизма горизонтального передвижения крана (тележки), когда механизм работает в помещении при отсутствии ветровой нагрузки,

$$P_{ст.г} = \frac{(G + Q + q)v_r}{10^3 m_k \eta} \left( \frac{\varphi_n d_{ст} + 2\mu}{D_k} k_{р6} + \beta \right), \quad (4.222)$$

где  $G$  — вес передвигающегося механизма (крана, тележки), Н;  $v_r$  — скорость передвижения груза, м/с;  $m_k$  — число механизмов передвижения;  $\eta$  — КПД механизма;  $\varphi_n$  — коэффициент трения в подшипниках ступиц колес (для подшипников качения  $\varphi_n = 0,015$ );  $D_k$  — диаметр ходового колеса, м;  $d_{ст}$  — диаметр ступицы ходового колеса, м (обычно для расчетов принимается  $d_{ст}/D_k = 0,25$ );  $\mu$  —

коэффициент трения качения ( $\mu = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м);  $k_{р6}$  — коэффициент формы ходового колеса, учитывающий трение его реборд ( $k_{р6} = 1,3 \dots 1,4$ );  $\beta$  — уклон рельсового пути тележки или крана (при расчете мостовых кранов принимается  $\beta = 0,003$ , для строительных кранов  $\beta = 0,01$ ).

Если механизм работает на открытом воздухе,

$$P_{ст.г} = \frac{(G + Q + q)v_r}{10^3 m_{к\eta}} \left( \frac{\varphi_{п} d_{ст} + 2\mu}{D_{к}} k_{р6} + \beta \right) + \frac{W_{в} v_r}{10^3 m_{к\eta}}, \quad (4.223)$$

где  $W_{в}$  — среднее усилие, воздействующее на механизмы крана и груза от ветра.

В соответствии с государственным стандартом ветровая нагрузка на кран

$$W_{в} = p S_{к}, \quad (4.224)$$

где  $p$  — давление на конструкции крана и груза, Па;  $S_{к}$  — площадь парусности, м<sup>2</sup>.

Параметр

$$p = q k_{вс} c_{в} n_1, \quad (4.225)$$

где  $q$  — давление ветра на высоте 10 м;  $k_{вс}$  — коэффициент высоты;  $c_{в}$  — коэффициент лобового сопротивления;  $n_1$  — коэффициент нагрузки.

Параметр

$$q = \rho v_{в}^2 / 2, \quad (4.226)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха ( $\rho = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>);  $v_{в}$  — скорость ветра у земли, м/с.

Площадь парусности крана (тележки) с достаточной точностью можно принять  $S_{к1} = 0,8\sqrt[3]{G}$ .

Площадь парусности груза  $S_{к2} = 0,2\sqrt[3]{Q}$ .

Статическая мощность на валу электродвигателя механизма поворота стрелового крана

$$P_{ст.вр} = \frac{n}{10^3 m_{вр\eta}} \left[ 0,5\varphi_{вр} D_{кр} (G + Q) + l \left( 3,2 \sin \gamma \sqrt[3]{Q} \pm \beta Q \right) \right], \quad (4.227)$$

где  $G$  — вес поворотной части крана, Н;  $n$  — частота вращения крана, мин<sup>-1</sup>;  $\varphi_{вр}$  — коэффициент трения поворотного круга ( $\varphi_{вр} = 0,01$ );  $D_{кр}$  — диаметр поворотного круга, м;  $l$  — вылет стрелы (размер от оси вращения до оси подъемного каната), м;  $\gamma$  — угол направления ветра к наветренной площади груза (при определении максимальной мощности статической нагрузки  $\sin \gamma = 1$ , при определении средней квадратической нагрузки  $\sin \gamma = 0,8$ );  $\beta$  — уклон пути крана (для порталных кранов  $\beta = 0,006$ , для башен-

ных кранов  $\beta = 0,01$ , для судовых кранов  $\beta = 0,04$ );  $m_{вр}$  — число механизмов поворота; 3,2 — коэффициент, учитывающий давление ветра на груз при скорости ветра 15 м/с.

Для механизмов поворота тележек специальных кранов или захватов

$$P_{ст.вр} = n[0,5\varphi_{вр}k_n D_{кр} (G + Q)] / (10^3 \eta). \quad (4.228)$$

Здесь  $k_n$  — коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления поворота от уклона тележки на путях,  $k_n = 2,2$ .

Статическая мощность на валу электродвигателя механизма изменения вылета стрелы

$$P_{ст.с} = \frac{Q + C}{10^3 \eta} [0,18v_{с.г} + 10v_{с.в}], \quad (4.229)$$

где  $C$  — вес перемещаемых конструкций стреловой части крана, Н;  $v_{с.г}$  — скорость горизонтального перемещения груза, м/с;  $v_{с.в}$  — скорость вертикального перемещения груза, м/с.

Статическая мощность на валу электродвигателя механизмов специальных захватов, толкателей, выдвижных устройств

$$P_{ст} = F_{ср}v / (10^3 \eta), \quad (4.230)$$

где  $F_{ср}$  — среднее усилие при перемещении рабочего органа, Н;  $v$  — скорость перемещения, м/с.

При этом  $F_{max}$  механизма, работающего на упор, должно приниматься не более  $2F_{ср}$ .

*Динамические нагрузки.* Разгон и торможение механизмов происходят при затрате кинетической энергии на изменение скоростных параметров движущихся элементов.

Уравнение движения механизма с постоянным моментом инерции имеет вид

$$M - M_{ст} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (4.231)$$

где  $M$  — момент двигателя при ускорении или торможении;  $M_{ст}$  — момент статической нагрузки;  $J$  — момент инерции электропривода;  $\omega$  — угловая скорость двигателя;  $d\omega/dt$  — ускорение или замедление в процессе пуска или торможения.

Уравнение (4.231), решенное относительно конечной скорости механизма при линейных механических характеристиках двигателя, принимает вид

$$v = \frac{a}{9,55} J \frac{n_{ном}}{M_{ном}} \left( \frac{n_{кон}^* - n_{нач}^*}{M_{нач}^* - M_{кон}^*} \ln \frac{M_{нач}^* \pm M_{ст}^*}{M_{нач}^* \pm M_{ст}^*} \right),$$

где  $v$  — конечная скорость разгона (замедления), м/с;  $a$  — ускорение (замедление) механизма, м/с<sup>2</sup>;  $n_{ном}$  — номинальная частота вращения вала электродвигателя, мин<sup>-1</sup>;  $M_{ном}$  — номинальный



момент на валу электродвигателя, Н · м;  $n_{\text{нач}}^*$ ,  $n_{\text{кон}}^*$  — соответственно начальная и конечная частоты вращения электродвигателя при пуске (торможении) механизма в относительных единицах;  $M_{\text{нач}}^*$ ,  $M_{\text{кон}}^*$  — соответственно начальный и конечный моменты при пуске (торможении) в относительных единицах;  $M_{\text{ст}}^*$  — относительное значение момента статической нагрузки.

Время пуска (торможения) может быть определено из (4.231) для конкретных значений параметров пуска (торможения). При постоянном ускорении (замедлении)  $t_{\text{п}} = v/a$ .

Приведение моментов инерции масс элементов механической передачи к валу электродвигателя выполняют по следующим формулам:

для вращающихся частей кранов

$$J_{\text{вр}} = 0,2J_{\text{дв}} + \frac{G_{\text{вр}}R_{\text{вр}}^2}{\eta_{\text{ред}}^2 i_{\text{оп.у}}^2} + \frac{0,7Ql^2}{\eta_{\text{ред}}^2 i_{\text{оп.у}}^2}; \quad (4.232)$$

для поступательно движущихся частей кранов

$$J_{\text{п}} = 0,2J_{\text{дв}} + \frac{91(G+q+0,7Q)v^2}{m_{\text{к}}n_{\text{ном}}^2\eta_{\text{мех}}}, \quad (4.233)$$

где  $J_{\text{дв}}$  — момент инерции двигателя, кг · м<sup>2</sup>; 0,2 — коэффициент, учитывающий момент инерции тормоза и первой шестерни редуктора;  $G_{\text{вр}}$  — вес вращающихся частей крана, Н;  $R_{\text{вр}}$  — средний радиус вращающихся масс крана;  $Q$  — вес груза, Н;  $l$  — расстояние от оси вращения механизма поворота крана до оси грузового каната, м;  $i_{\text{ред}}$ ,  $i_{\text{оп.у}}$  — передаточные числа редуктора и опорно-поворотного устройства; 0,7 — коэффициент, учитывающий, что в цикле работы крана число пусков с грузом не превышает 60 % общего числа пусков;  $G$  — вес перемещаемых конструкций крана (тележки);  $q$  — вес подвески, Н;  $v$  — скорость линейного перемещения, м/с;  $m_{\text{к}}$  — число механизмов.

Расчетная мощность

$$P_{\text{р}} = \frac{1}{k_{\text{п}}\gamma_{\text{п}}} \left[ \frac{(G+Q_{\text{п}})v_{\text{ном}}\alpha'a}{10^3\eta_{\text{мех}}} + P_{\text{ст}} \right] = \left[ \frac{(G+Q_{\text{п}})}{10^3k_{\text{п}}\gamma_{\text{п}}\eta_{\text{мех}}} v_{\text{ном}}(\alpha'a+m) \right], \quad (4.234)$$

где  $k_{\text{п}}$  — коэффициент использования двигателя по пусковому току;  $G$  — вес перемещаемого механизма;  $Q_{\text{п}}$  — вес груза с подвеской для механизмов передвижения и поворота (для механизмов подъема  $G$  отсутствует);  $\alpha' = J_{\text{общ}}/J_{\text{пост}}$  ( $J_{\text{пост}}$  — момент инерции масс поступательно движущихся элементов);  $a$  — ускорение механизма;  $m = P_{\text{ст}}/[(G+Q_{\text{п}})v_{\text{ном}}]$  — параметр статической нагрузки, характеризующий условия работы механизмов.

В формуле (4.234) учитываются особые условия нагрузки при ветре, крене, уклонах путей и других противодействующих

факторах. Расчетная мощность полностью определяется параметрами механизма и требуемыми средними ускорениями и позволяет предварительно выбрать двигатель исходя из условия  $P_{\text{ном}} > P_p$ , где  $P_{\text{ном}}$  — номинальная мощность двигателя по каталогу при ПВ = 40 %.

Для механизмов подъема  $P_p = P_{\text{ст.ном}}$ , поэтому двигатель можно выбрать непосредственно по мощности статической нагрузки.

Проверка выбора двигателя по тепловому режиму при известной нагрузочной диаграмме может быть выполнена по эквивалентному току исходя из условия

$$I_{\text{ном}} > I_{\text{эkv}} = \sqrt{\sum I_i^2 t_i / \sum t_i}, \quad (4.235)$$

а в тех случаях, когда ток двигателя пропорционален вращающему моменту или мощности, — по уравнениям эквивалентного момента

$$M_{\text{ном}} > M_{\text{эkv}} = \sqrt{\sum M_i^2 t_i / \sum t_i} \quad (4.236)$$

или мощности

$$P_{\text{ном}} > P_{\text{эkv}} = \sqrt{\sum P_i^2 t_i / \sum t_i}. \quad (4.237)$$

При непосредственной оценке потерь можно применить метод средних потерь:

$$\Delta P_{\text{ном}} > \Delta P_{\text{cp}} = \sum \Delta P_i t_i / \sum t_i. \quad (4.238)$$

В (4.235...4.238)  $I_i$ ,  $M_i$ ,  $P_i$ ,  $\Delta P_i$  — соответственно ток, момент, мощность, потери мощности в двигателе на  $i$ -м участке грузовой траектории в течение времени  $t_i$ .

#### 4.10.5. Система управления мостовым краном

В настоящее время применяются различные системы управления электроприводами мостовых кранов [17], но наиболее совершенной является СУ электроприводами переменного тока с частотными преобразователями и управлением от контроллера.

Схема СУ показана на рис. 4.114. В качестве частотных преобразователей используются преобразователи частоты MOVITRAC 31 C110-503-4-00 и C370-503-4-00 фирмы SEWErodride, которые выполняются с промежуточным звеном постоянного тока, с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения инвертора. Устройства подключаются непосредственно к трехфазной сети переменного тока напряжением от  $3 \times 380$  до  $3 \times 500$  В, частотой 50 или 60 Гц. Они обеспечивают изменение трехфазного выходного напряжения до значения напряжения сети с пропорционально увеличивающейся выходной частотой до настраиваемого значения базовой частоты, находящейся в интервале 50...150 Гц (для специальных характеристик от 5 до

400 Гц). Эта особенность дает возможность управления трехфазными АД с постоянным моментом до достижения номинальной частоты, а выше нее — с постоянной мощностью.

Все входы и выходы системы потенциально развязаны. В электронной схеме имеется импульсный блок питания, который функционирует независимо от частоты сети и в широком диапазоне напряжений — от 380 до 500 В.

Пост оператора реализован на базе клавишной панели FBG 31С-01, в состав которой входят текстовый дисплей с подсветкой, тремя языками на выбор и мембранная панель с шестью клавишами. На дисплей выводятся расширенное и краткое меню параметров. Клавишная панель обеспечивает: отображение выходной частоты, тока, температуры и других измеряемых величин; фиксацию неисправностей; считывание и коррекцию всех параметров; сохранение данных.

Для управления механизмами подъема и передвижения используются эргономичные ручные манипуляторы типа «джойстик».

Система управления электроприводами мостового крана реализована на контроллере с возможностью его связи с ПК по последовательному интерфейсу RS-485 для обмена информацией с верхним уровнем управления и уровнем дистанционного управления. В состав контроллера входят модули ввода и вывода, обрабатывающие сигналы, приведенные в табл. 4.4.

Рассматриваемая СУ реализует следующие функции:

1) принимает команды управления от ручного манипулятора — джойстика: «Подъем» — релейный сигнал, «Спуск» — релейный сигнал, «Нейтральное положение (останов)» — релейный сигнал и «Задание скорости» — аналоговый сигнал;

2) обеспечивает пусковой момент на валу электродвигателя  $M = 2M_n$ ;

Таблица 4.4

Сигналы	Количество	Параметры	Назначение
Дискретные: входные	6	24 В, 10 мА	Блокировки работы, аварийный стоп, дистанционный пуск, реверс, сигнал срабатывания электромеханического тормоза
выходные	5	24 В, 5А	Электродвигатель включен, готовность, авария, включение дополнительных механизмов, отключение электромеханического тормоза
Аналоговые входные	3	$\pm 10$ В	Двуполярный сигнал задания от «джойстика»

3) при получении команды «Подъем» СУ выдает релейную команду на включение электромеханического привода, принимает блокировочный сигнал о снятии электромеханического тормоза, начинает движение вверх со скоростью, определяемой аналоговым сигналом «Задание скорости» от джойстика. При положении джойстика 1 обеспечивается минимальная скорость подъема, при положении джойстика 6 — максимальная. При установке джойстика в нейтральное положение («Стоп») привод осуществляет динамическое торможение и по достижении минимальной скорости подаст релейную команду на отключение электромеханического тормоза, а также отключает выходное напряжение преобразователя;

4) при получении команды «Спуск» привод создает тормозной момент на валу двигателя и выдает релейную команду на включение электромеханического тормоза, принимает блокировочный сигнал о снятии тормоза и начинает движение вниз со скоростью, определяемой аналоговым сигналом «Задание скорости» от джойстика. При спуске груза в положении джойстика 1...5 осуществляется тормозной спуск, в положении 6 — двигательный. При положении джойстика 1 обеспечивается минимальная скорость спуска, при положении 5 — максимальная;

5) при переводе джойстика в нейтральное положение для достижения высокоточной посадочной скорости груза в конце динамического торможения выдерживается время останова электродвигателя при помощи торможения импульсами постоянного напряжения согласно приведенной на рис. 4.118 характеристики разгона и торможения ( $f_n$ ,  $f_{max}$ ,  $f_{ост}$  — частота соответственно при пуске, максимальная, при останове;  $t_p$ ,  $t_r$ ,  $t_{ост}$  — время соответственно разгона, торможения, останова). При поступлении команды «Нейтральное положение» («Стоп») выдается релейный сигнал на отключение электромеханического тормоза. После этого отключается выходное напряжение преобразователя;

6) в преобразователе реализовано два независимо программируемых времени разгона и торможения в пределах 0,01 ... 600 с. Дополнительно к этим значениям можно осуществлять программи-

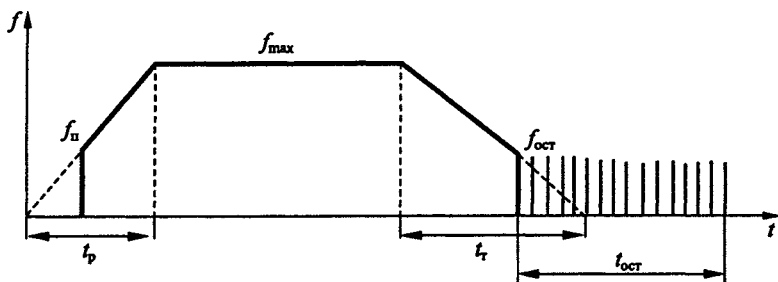


Рис. 4.118

рование пользователем еще 12 значений времени разгона (торможения) в зависимости от положений джойстика;

7) в преобразователе реализована функция «обхода» заданной частоты, исключая работа двигателя на задаваемой оператором частоте вращения, при которой возникает механический резонанс в комплексе «электродвигатель — механическая нагрузка»;

8) после получения команды «Аварийный стоп» преобразователь осуществляет торможение, выдает релейную команду на отключение электромеханического тормоза и отключает выходное напряжение;

9) преобразователь обеспечивает: защиту от недопустимой перегрузки и короткого замыкания, в том числе на землю; защиту от недопустимых перенапряжений на силовых элементах; блокировку работы при недопустимых отклонениях питающего напряжения и его исчезновении; защиту от неполнофазного режима работы; защиту от неисправности в блоках и узлах преобразователя;

10) при аварии преобразователь выдает релейный сигнал «Авария», релейный сигнал на отключение электромеханического тормоза и снятие питающего напряжения с его выходов;

11) преобразователь имеет функцию адаптации для оптимального управления конкретным электродвигателем.

#### **4.10.6. Система управления козловым краном**

Козловые краны применяют в основном при строительстве зданий, погрузке и разгрузке судов в морских или речных портах. Выполнение погрузочно-разгрузочных и других видов работ обеспечивают несколько электроприводов различной мощности. В качестве приводов применяют электродвигатели переменного тока с регулированием от преобразователя частоты. Рассмотрим систему управления козловым (портальным) полноповоротным краном типа «Сокол».

Схема крана представлена на рис. 4.119, где 1 — механизм разворота грузовой траверсы; 2 — механизм изменения вылета стрелы; 3 — машинное отделение; 4, 8 — механизмы поворота; 5 — барабан для намотки кабеля; 6 — кабина; 7 — центральный токосъемник; 9, 15 — тупиковые концевые выключатели; 10 — концевой выключатель кабеля; 11, 14 — механизмы передвижения; 12, 13 — рельсовые захваты; 16 — концевой выключатель перепасовки.

В машинном отделении размещаются: пульт управления, станция оператора (дисплей ОР27), электродвигатели переменного тока механизмов подъема и механизма замыкания, электродвигатели вентиляторов, толкатели тормозов, преобразователи частоты, контроллер с интеллектуальными модулями ввода и вывода, кабельный канал связи контроллера с пультами управления, станция управления замыканием грейфера.

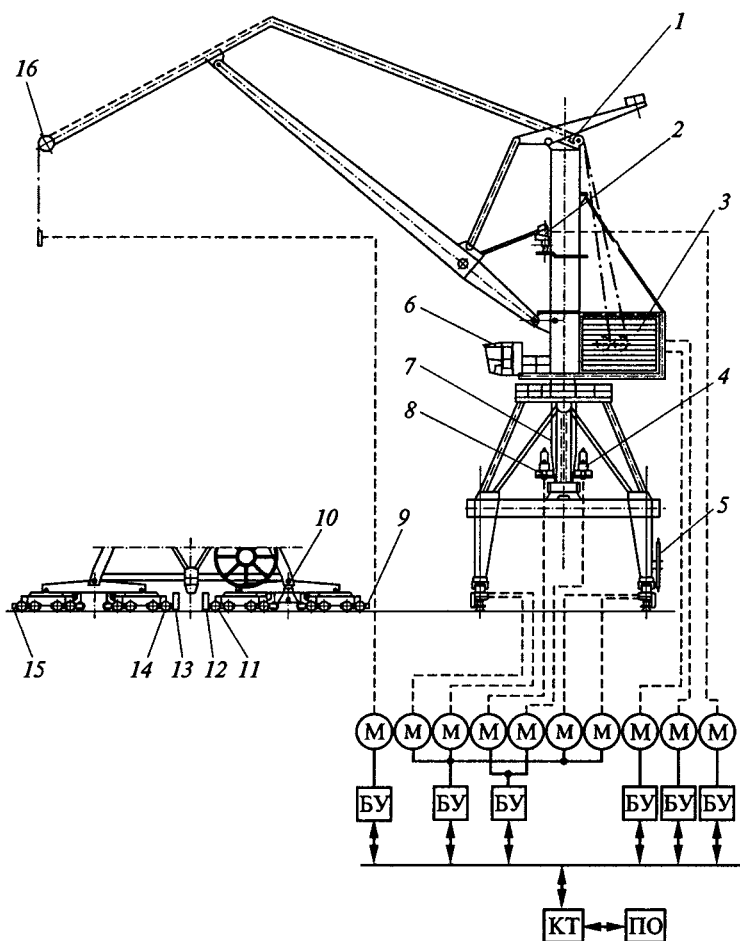


Рис. 4.119

На рис. 4.120 представлена схема силовой электрической части основных электроприводов козлового крана.

Используются электродвигатели переменного тока и преобразователи частоты фирмы «Koncranes». В табл. 4.5 указаны типы преобразователей для конкретных электроприводов механизмов крана.

На схеме показаны также коммутационные аппараты с токовой и тепловой защитами.

В приводах подъема, замыкания, изменения вылета стрелы, поворота и передвижения крана использованы частотные преобразователи семейства DynA, предназначенные для управления частотой вращения асинхронного короткозамкнутого двигателя. Эти преобразователи обеспечивают плавное регулирование частоты вращения приводных двигателей в диапазоне 0... 100 %.

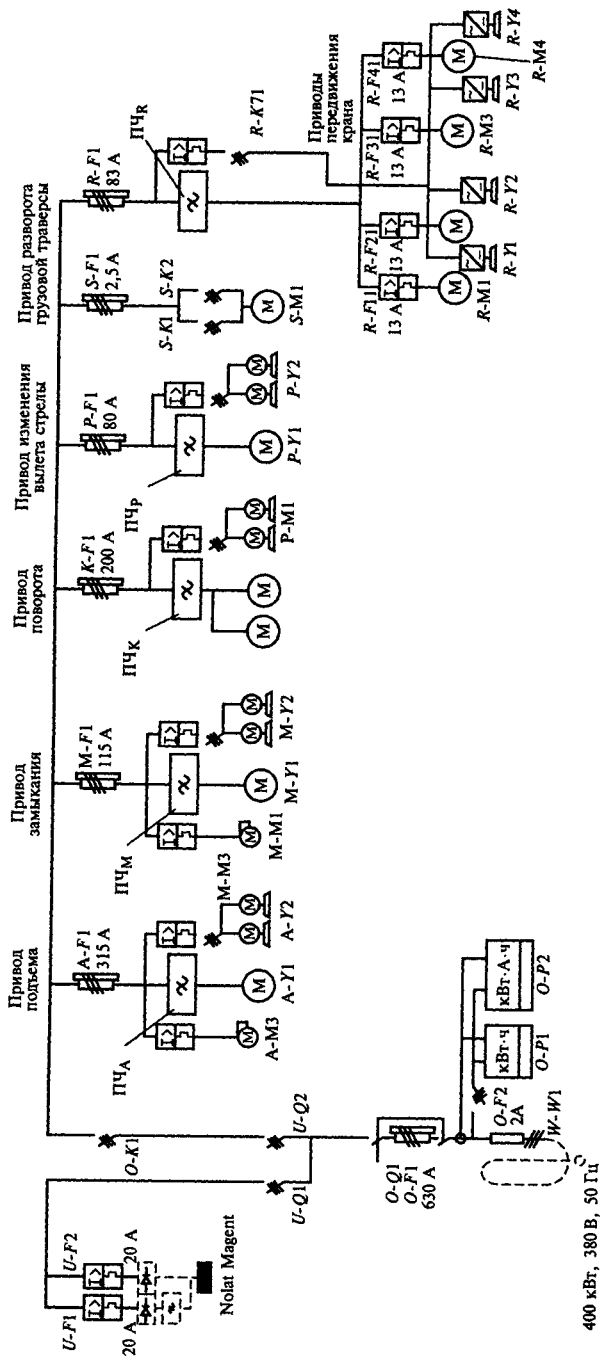


Рис. 4.120

Привод	Преобразователь
Подъем	ДунАНОИСТ 160F
Замыкание	ДунАНОИСТ 160F
Поворот	ДунАНОИСТ 37F
Изменение вылета стрелы	ДунАС 90F
Разворот грузовой траверсы	Напрямую от сети
Передвижение крана	ДунАС 30F

Питание вспомогательных электроприводов (вентиляторов, толкателей тормозов, насоса смазки) осуществляется непосредственно от сети напряжением 380 В, 50 Гц.

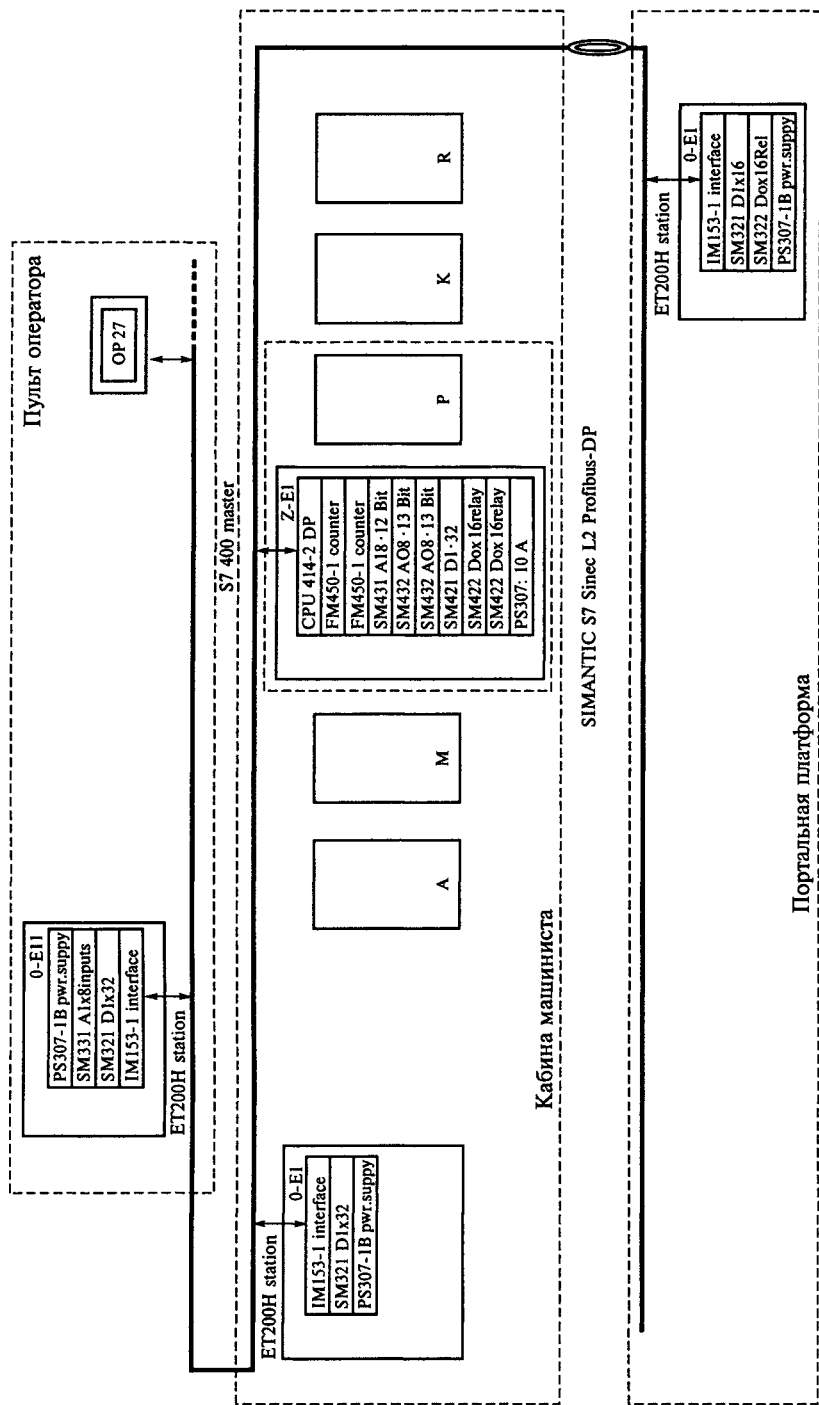
Основные электроприводы крана выполнены по схожим схемам. В качестве примера на рис. 4.121 представлена схема СУ механизмом замыкания. В механизме замыкания используется электродвигатель переменного тока мощностью 160 кВт. Его нагревание контролируется тремя терморезисторами, информация с которых поступает на преобразователь частоты. Электрическое торможение электродвигателя — динамическое. Механическое торможение осуществляется двумя тормозами, в которых используются электродвигатели переменного тока мощностью 450 Вт. Охлаждение электродвигателя осуществляется вентилятором мощностью 1,6 кВт. В качестве датчика скорости используется двухдорожечный импульсный датчик.

Система управления краном построена на базе контроллера SIMATIC S7-400 фирмы «Siemens» (рис. 4.122). Все управление механизмами осуществляется с использованием промышленных сетей Sinec L2 и Profibus-DP. Связь основных подсистем системы управления осуществляется посредством интеллектуального модуля ET200H и вышеперечисленных сетей. Для управления механизмами подъема А, замыкания М, изменения вылета стрелы Р, поворота К, передвижения крана R (см. рис. 4.120) используются специальные модули:

- SM431 — 8 аналоговых входов;
- SM432 — 8 аналоговых выходов;
- SM421 — 32 цифровых входа;
- SM422 — 16 цифровых выходов;
- SM321 — 32 цифровых входа;
- SM331 — 8 аналоговых входов;
- SM322 — 16 цифровых выходов;
- IM153 — интерфейсный модуль;
- FM450-1 — двухканальный счетчик;
- PS307 — 1В — блок питания.







Портальная платформа

Рис. 4.122

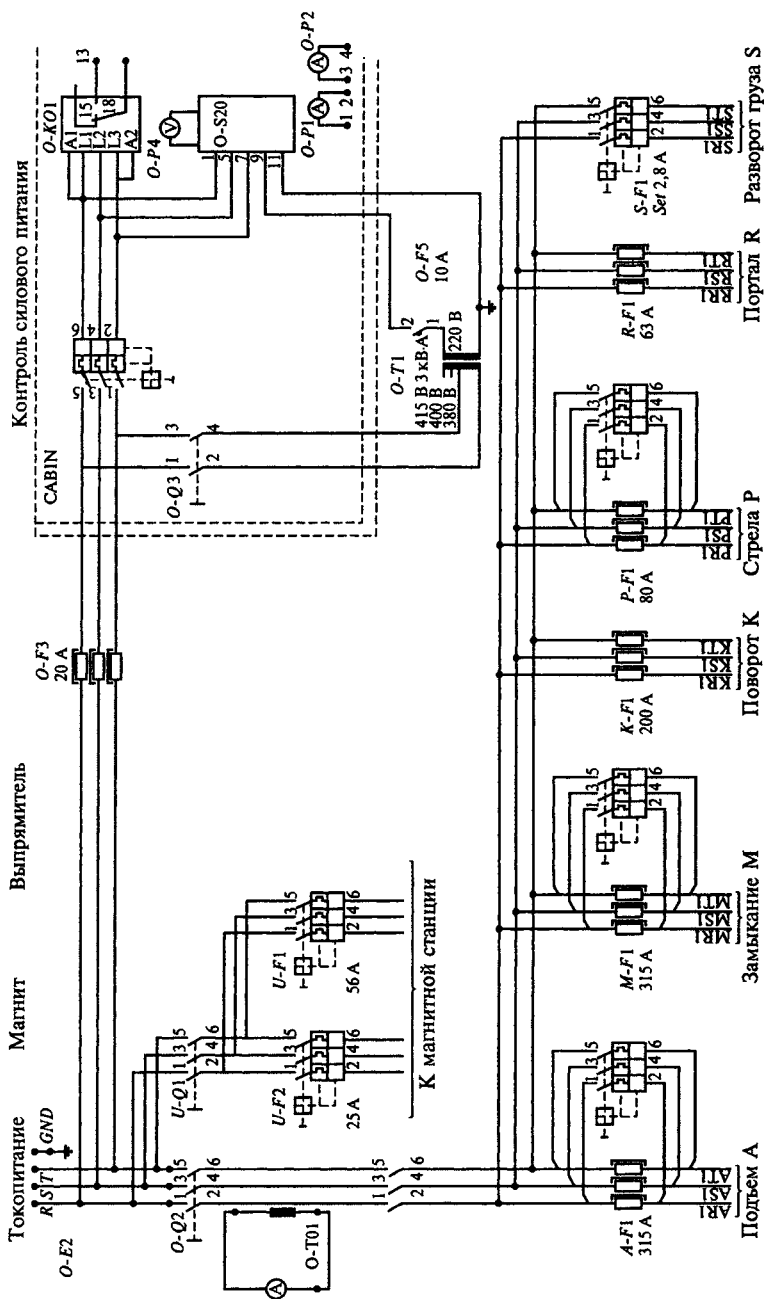


Рис. 4.123

Система управления краном реализует следующие алгоритмы работы: управление подъемным и замыкающим приводом крана, управление стрелой, управление поворотом, управление передвижением крана, управление рельсовыми захватами, одновременная работа нескольких механизмов, аварийный режим.

Схемы силового питания и его распределение по основному электрооборудованию представлены на рис. 4.123.

#### 4.10.7. Система управления лифтом

Лифтом называется стационарная подъемная машина периодического действия, предназначенная для подъема и спуска людей и (или) грузов в кабине, движущейся по жестким прямолинейным направляющим. Общий вид пассажирского электрического лифта приведен на рис. 4.124, где 1 — станция управления, 2 — ограничитель скорости, 3 — механизм открывания дверей, 4 — двери кабины, 5 — пол кабины, 6 — пол этажной площадки, 7 — двери шахты, 8 — канат ограничителя скорости, 9 — натяжное устройство, 10 — приямок, 11 — буфер, 12 — противовес, 13 — направляющие противовеса, 14 — направляющие кабины, 15 — шахта, 16 — башмаки, 17 — отводка, 18 — кабина, 19 — ловитель, 20 — подвеска, 21 — подъемные канаты, 22 — подъемный механизм, 23 — машинное помещение.

**Основные технические параметры лифта.** Основными техническими параметрами лифта являются: грузоподъемность, скорость движения и высота подъема кабины.

*Грузоподъемность* лифта определяется массой наибольшего расчетного груза без учета массы кабины и постоянно расположенных в ней устройств.

*Номинальная скорость* кабины является скоростью установившегося движения кабины в нормальных условиях эксплуатации. Ее значение выбирают из следующего ряда: 0,25; 0,5; 0,71; 1; 1,4; 1,6; 2; 2,8; 4; 5,6; 7; 8 м/с.

*Остановочная скорость* — скорость, при которой включается механизм обеспечения требуемой точности остановки.

*Ревизионная скорость* — скорость, при которой обслуживающий персонал осматривает оборудование шахты лифта с крыши движущейся кабины. Для лифтов, имеющих номинальную скорость до 0,71 м/с, допускается ревизия при движении вниз с номинальной скоростью.

*Предельная скорость* — скорость кабины при срабатывании ограничителя скорости механизма включения ловителей.

*Расчетная высота подъема* определяется архитектурно-планировочным решением конструкции здания.

*Производительность* лифта зависит от грузоподъемности, скорости, высоты подъема, характеристик пассажиропотока, схемы орга-

низации межэтажных перевозок и т. п.; определяется количеством пассажиров или массой груза, транспортируемых за 1 ч работы.

Наряду с указанными, к лифтам предъявляются следующие дополнительные требования: точность остановки относительно уровня этажной площадки; плавность движения кабины при разгоне и торможении; комфортабельность условий транспортирования пассажиров; общедоступность пользования лифтом; бесшумность работы; допустимый уровень электромагнитных помех при работе систем радиосвязи и телевидения.

**Устройство, компоновка и взаимодействие узлов лифта.** Рассмотрим работу пассажирского лифта фирмы «Otis».

Основными частями лифта являются: лебедка, кабина, противовес, направляющие для кабины и противовеса, двери шахты, ограничитель скорости, тяговые канаты и канат ограничителя скорости, узлы и детали приемка, электрооборудование и электроразводка.

Кинематическая схема лифта представлена на рис. 4.125. Лифт имеет полиспастную подвеску с кратностью полиспаста 2, при которой тяговые канаты 8, сходящие с канатоведущего шкива 7, огибают полиспастные блоки 6 на кабине 4 и противовесе 9 и крепятся к верхнему перекрытию шахты в машинном помещении.

На лифтах с высотой подъема более 35 м предусмотрена установка компенсирующих цепей 10, которые крепятся к полу кабины и раме противовеса. Компенсирующие цепи уменьшают неравномерность нагрузки на привод при изменении массы тяговых канатов в нижнем и верхнем положениях кабины.

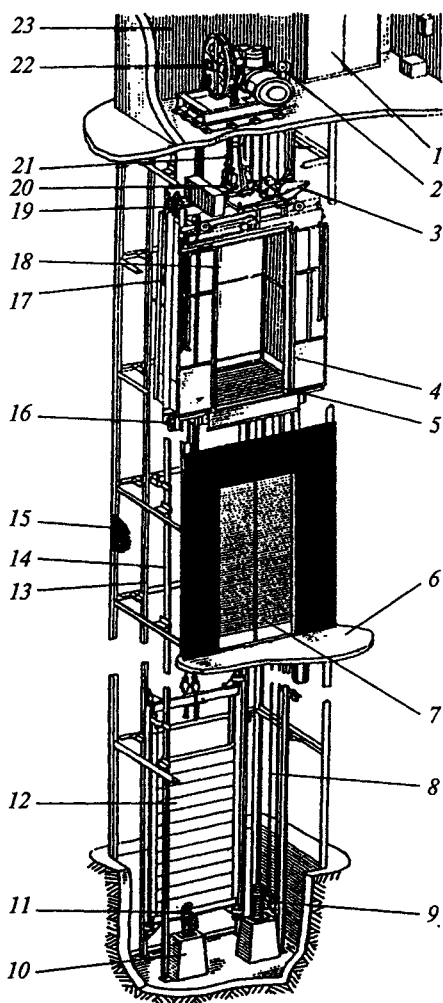


Рис. 4.124

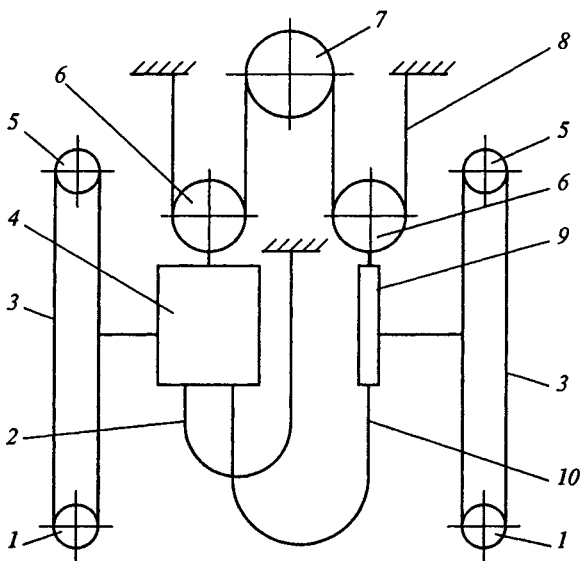


Рис. 4.125

Перемещение кабины и противовеса по направляющим осуществляется лебедкой, установленной в машинном помещении, с помощью тяговых канатов 8. Там же размещены ограничители скорости 5, контроллер, вводное устройство, кронштейн с клином для крепления подвесного кабеля 2, выключатели освещения кабины и шахты, розетка на напряжение 36 В и устройство натяжения 1 канатов 3. Лифт комплектуется специализированным контроллером.

При нажатии кнопки вызывного аппарата в электроаппаратуру управления лифтом подается электрический импульс (вызов). Если кабина находится на остановке, с которой поступил вызов, открываются двери кабины и шахты на данной остановке. Если кабина в другом месте, подается команда на ее движение. В обмотку электродвигателя лебедки и катушку электромагнита тормоза подается напряжение, тормоз отпускает, и ротор электродвигателя начинает вращаться.

При подходе кабины к требуемой посадочной площадке система управления лифтом по сигналу датчиков точной остановки переключает электродвигатель лебедки на работу с пониженной частотой вращения ротора. Скорость движения кабины снижается, подается команда на остановку, и в момент, когда порог кабины совмещается с уровнем порога двери шахты, кабина останавливается, вступает в действие тормоз, включается в работу привод дверей, и двери кабины и шахты открываются. На лифте с системой управления от контроллера происходит бесступенчатое регу-

лирование частоты вращения ротора двигателя посредством системы частотного регулирования, что обеспечивает плавные остановки и пуск кабины.

При нажатии кнопки приказа на панели управления, расположенной в кабине, закрываются двери кабины и шахты, кабина отправляется на посадочную площадку, кнопка приказа которой нажата.

Для экстренного открывания дверей в зоне остановки кнопочный пост снабжен специальной кнопкой «Двери». Кнопка позволяет открыть двери и держать их открытыми до тех пор, пока не будет отпущена.

После прибытия на требуемую посадочную площадку и выхода пассажиров двери закрываются, кабина стоит до тех пор, пока не будет нажата кнопка любого вызывного аппарата.

Движение кабины возможно только при исправности всех блокировочных и предохранительных устройств. Срабатывание любого предохранительного устройства приводит к размыканию цепи управления и остановке кабины.

Приведенная конструкция пассажирского лифта не является единственно возможной. В зависимости от назначения, скорости передвижения кабины и типа привода конструктивные решения могут отличаться большим разнообразием. Так, для скоростных лифтов характерно наличие безредукторного привода канатоподъемного шкива (КВШ) от тихоходного двигателя постоянного тока и применение гидробуферов вместо пружинных. Больничные лифты оборудуются глубокими кабинами и приводом, обеспечивающим повышенную точность остановки и плавность хода кабины.

**Расчет механизма подъема лифта.** По принятой в лифтостроении терминологии расчет механизма подъема называется тяговым [28]. Он включает в себя три характерные части: статический и кинематический расчеты; динамический расчет; расчетное обоснование формы профиля канавки обода КВШ.

Исходными данными тягового расчета являются: назначение и кинематическая схема лифта; грузоподъемность, основные размеры и скорость кабины; масса кабины; конструкция дверей; масса 1 м подвесного кабеля; расположение противовеса в плане шахты; расположение машинного помещения; число остановок и высота подъема кабины; режим работы лифта (ПВ, %).

Цель статического и кинематического расчетов состоит в обосновании параметров и выборе узлов и деталей механизма подъема лифта без учета действия инерционных сил, поэтому требуется последующая корректировка по результатам динамического расчета. Расчет включает в себя обоснование параметров тяговых канатов, расчет массы и уравнивания подвижных частей лифта, расчет сопротивлений перемещению подвижных частей лифта.

Цель динамического расчета — определить инерционные и силовые характеристики механизма подъема, гарантирующие обеспечение допустимого уровня ускорений и точности останова, долговечность и надежность работы механизма подъема [28].

Одним из факторов, определяющих выбор приводного двигателя по мощности, является кинематическая схема лифта, представляющая собой схему взаимодействия подъемного механизма с подвижными частями лифта — кабиной и противовесом. Рассмотрим расчет мощности электродвигателя для традиционной кинематической схемы лифта, приведенной на рис. 4.125.

При отсутствии уравнивающих канатов, трения кабины и противовеса о направляющие расчет может быть произведен в следующем порядке.

1. Определяют усилия  $F_1$  и  $F_2$  в канатах по обе стороны КВШ:

$$F_1 = (m_0 + m + qx)g; \quad (4.239)$$

$$F_2 = [m_{пр} + q(H - x)]g, \quad (4.240)$$

где  $m_0$  — масса пустой кабины, кг;  $m$  — масса полезного перемещаемого груза, кг;  $q$  — удельная масса каната, кг/м;  $x$  — длина каната со стороны кабины, м;  $m_{пр}$  — масса противовеса, кг;  $H$  — высота подъема кабины, м;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Принимая  $m_0 = 150$  кг,  $m = 400$  кг,  $q = 1,5$  кг/м,  $x = 10$  м,  $m_{пр} = 180$  кг,  $H = 25$  м, получим

$$F_1 = (150 + 400 + 1,5 \cdot 10) 9,8 = 5537 \text{ Н};$$

$$F_2 = [180 + 1,5(25 - 10)] 9,8 = 1984,5 \text{ Н}.$$

2. Определяют усилие на КВШ

$$F = F_1 - F_2 = m - \alpha m + q(2x - H), \quad (4.241)$$

где  $\alpha$  — коэффициент уравновешенности, равный 0,4...0,6.

Используя полученные значения  $F_1$  и  $F_2$ , получим  $F = 5537 - 1984,5 = 3552,5$  Н.

3. Рассчитывают момент и мощность на валу двигателя при его работе:

$$M_{расч.д} = \frac{FD_{ш}}{2i_{ред}\eta_{ред.п}}; \quad (4.242)$$

$$P_{расч.д} = \frac{Fv_{ном}}{\eta_{ред.п}}, \quad (4.243)$$

где  $D_{ш}$  — диаметр КВШ, м;  $i_{ред}$  — передаточное число редуктора;  $v_{ном}$  — номинальная скорость движения кабины, м/с;  $\eta_{ред.п}$  — КПД редуктора.



Принимая  $D_{ш} = 0,575$  м,  $i_{ред} = 48$ ,  $\eta_{ред.п} = 0,57$ ,  $v_{ном} = 0,71$  м/с,  
получим:  $M_{расч.д} = \frac{3552,5 \cdot 0,575}{2 \cdot 48 \cdot 0,57} = 37,33$  Н·м,

$$P_{расч.д} = \frac{3552,5 \cdot 0,71}{0,57} = 4425,04 \text{ Вт.}$$

4. Определяют необходимую частоту вращения двигателя

$$\omega_{дв} = \frac{v_{ном} i_{ред}}{R_{ш}}, \quad (4.244)$$

где  $R_{ш}$  — радиус КВШ, м.

Подставляя известные значения, получим

$$\omega_{дв} = \frac{0,71}{0,2875} \cdot 48 = 118,54 \text{ с}^{-1}.$$

5. Исходя из условий  $P_{расч.д} < P_{ном}$  и  $\omega_{дв} < \omega_{ном}$  по каталогу выбирают тип электродвигателя.

6. Проверяют выбранный двигатель по эквивалентному моменту или мощности.

**Выбор электропривода и принципы управления лифтом.** На выбор типа электропривода существенно влияют кинематическая схема лифта, требования ко времени движения кабины от исходного этажа положения кабины до этажа назначения по вызову или приказу, ограничения на ускорения и рывки.

Режим работы электропривода лифта характеризуется частыми включениями и отключениями. При этом можно выделить следующие этапы движения: разгон электродвигателя до установившейся скорости  $v_{уст}$ ; движение с установившейся скоростью; уменьшение скорости при подходе к этажу назначения (непосредственно до 0 или до малой скорости дотягивания); торможение и остановка кабины лифта на этаже назначения с требуемой точностью.

Необходимость ограничения ускорений  $a$  и рывков  $\rho$  и обеспечения максимальной производительности лифта требуют, чтобы во время переходных процессов электропривод обеспечивал разгон и замедление кабины с максимальными допустимыми значениями ускорения и рывка. Соответствующий выполнению этого условия график движения кабины приведен на рис. 4.126. Обычно его принято считать оптимальным, поскольку при этом обеспечивается минимальная длительность режимов разгона и торможения кабины. При таком графике значения рывка и ускорения на определенных интервалах переходного процесса поддерживаются постоянными и равными предельно допустимым значениям.

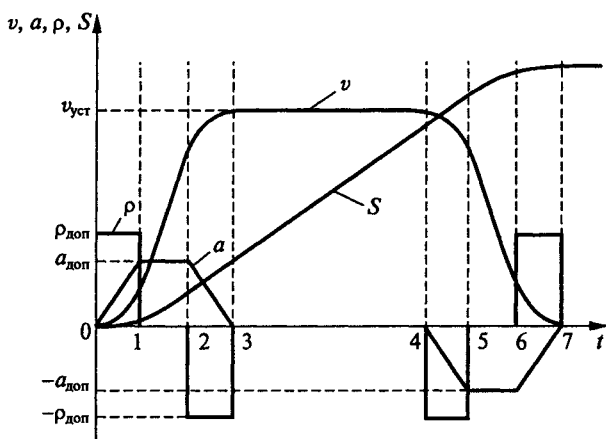


Рис. 4.126

В механизмах подъема лифтов применяют различные типы электроприводов.

В *нерегулируемом приводе* используют одно- и двухскоростные двигатели переменного тока. Односкоростной нерегулируемый асинхронный привод применяется в тихоходных лифтах с невысокими требованиями к точности остановки кабины. Силовая схема привода включает в себя односкоростной асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Контактры обеспечивают включение двигателя для движения кабины вверх и вниз за счет изменения чередования фаз питающего напряжения. Электромагнитный тормоз получает питание через выпрямитель и обеспечивает отпускание тормоза при включении привода и ввод в действие тормоза при отключении привода, когда кабина подходит к этажу назначения.

В двухскоростном асинхронном приводе лифта используется асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и двумя статорными обмотками большой и малой скорости. В обмотке малой скорости лифтовых двигателей число пар полюсов обычно в три, четыре или шесть раз превышает число пар полюсов обмотки большой скорости, что обуславливает уменьшенную в такое же число раз синхронную скорость.

Неоднородность диаграмм движения и невозможность поддержания значений ускорения в режимах разгона, замедления и торможения, близкими к допустимым, увеличивает среднее время перемещения кабины. Отрицательное влияние этих недостатков возрастает по мере увеличения скорости привода лифта при стремлении повысить его производительность.

Применение *регулируемых приводов переменного трехфазного тока* позволяет существенно стабилизировать диаграмму движения (ис-

ключить неоднородность диаграмм движения при изменении загрузки кабины) и поддерживать заданное ускорение кабины в режимах разгона, замедления и торможения. Это дает возможность уменьшить время перемещения кабины и повысить производительность лифта.

*Регулируемый привод постоянного тока* обеспечивает аналогичные условия и применяется для формирования диаграммы движения кабины лифта, близкой к оптимальной, а также высокую точность остановки кабины.

В современных лифтах используются два принципа управления: разомкнутый, при котором для управления приводом лебедки используются сигналы, формируемые в логической управляющей системе (станции управления). Возможные изменения параметров кабины и лебедки в процессе работы не учитываются;

замкнутый, позволяющий учитывать все изменения параметров и управлять приводом по сигналам, получаемым от логической управляющей системы, а также учитывать результаты функционирования привода. Вследствие этого система управления силовым приводом дает возможность увеличить точность остановки, повысить плавность движения кабины.

Схема системы управления одиночным лифтом в режиме нормальной работы представлена на рис. 4.127 [28]. В схеме приняты следующие обозначения: ПЛ — привод лифта, ПД — привод дверей, ПВП — посты вызовов и приказов, УРПВ — узел регистрации приказов и вызовов, УВНД — узел выбора направления движения, УОПК — узел определения положения кабины, УЗО —

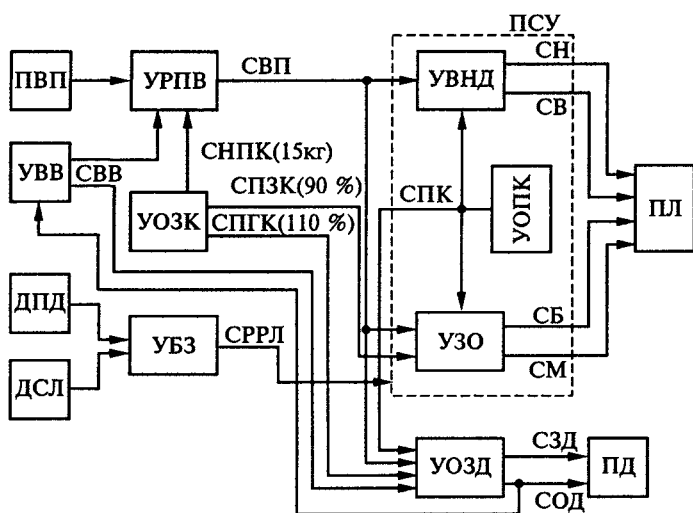


Рис. 4.127

узел замедления и остановки, ДПД — датчики положения дверей, ДСЛ — датчики состояния лифта, УБЗ — узел блокировок и защиты, УВВ — узел выдержки времени, УОЗД — узел открывания и закрывания дверей, ПСУ — позиционно-согласующее устройство, СВ — сигнал движения вверх, СН — сигнал движения вниз, СБ — сигнал большой скорости, СМ — сигнал малой скорости, СЗД — сигнал закрывания дверей, СОД — сигнал открывания дверей, СВВ — сигнал выдержки времени, СВП — сигналы о вызовах и приказах, СНПК — сигнал о наличии пассажира в кабине, СПЗК — сигнал о полной загрузке кабины, СПГК — сигнал о перегрузке кабины; СРРЛ — сигнал регулирования разгона лифта; УОЗК — узел определения загрузки кабины, СПК — сигнал положения кабины.

**Микропроцессорная система управления лифтом.** Системы управления лифтами выполняются с применением релейно-контактной аппаратуры, бесконтактной логики и микропроцессорной техники. Первые два решения в настоящее время практически не реализуются, поэтому рассмотрим построение микропроцессорной системы управления на примере лифта фирмы «Otis».

Система управления на базе контроллера MCS 220 (MCS 300) с управляющей платой LCB-II выполнена по модульной схеме (рис. 4.128) и включает в себя следующие подсистемы: OCSS — операционного управления, MCSS — контроля движения, DBSS — управления основным приводом и тормозом, DCSS — управления приводом дверей.

Модули обеспечивают выполнение системой управления определенных функций. Логическая плата LCB-II спроектирована для

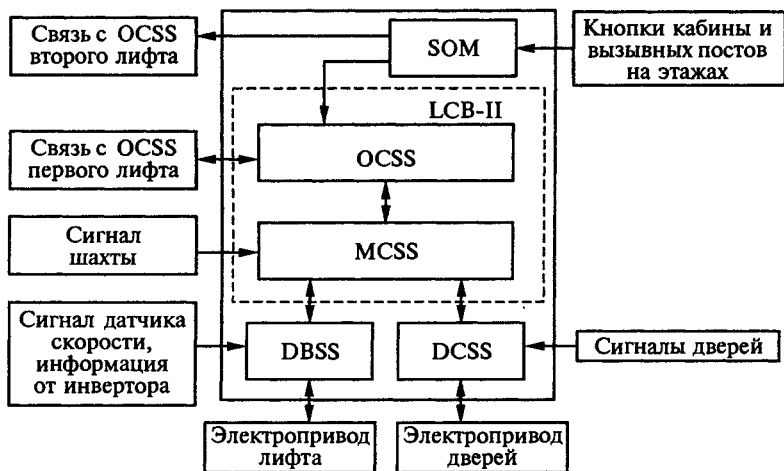


Рис. 4.128

СУ лифтами в зданиях большой этажности (до 32 этажей) и типов привода с максимальной скоростью до 1,75 м/с. Система MCS — LCB-II может применяться в симплексном (один блок), дуплексном (два блока) и триплексном (три блока) исполнениях.

Подсистемы OCSS и MCSS объединены платой LCB-II, которая имеет два независимых канала дистанционной последовательной линии RSL передачи данных. Основу платы составляют: процессор Intel-8088 с тактовой частотой 8 МГц; EPROM 128 Кбайт, EEPROM 8 Кбайт, RAM 3 Кбайт с питанием от батарейки напряжением 3 В; устройство последовательного ввода и вывода (частота 6 МГц); 13-сегментный индикатор.

Модули микропроцессорной СУ соединены друг с другом последовательными линиями передачи данных. Кнопки приказов, вызовов, сигнальные лампы, указатели направления движения, индикаторы этажности и дополнительные ключи подключаются к удаленным станциям, расположенным на остановочных площадках и в кабине. Связь между контроллером и удаленными станциями осуществляется по последовательной линии передачи данных. Такая конфигурация системы обеспечивает простую установку, обнаружение, замену неисправных компонентов, а также защиту от доступа в систему посторонних. Вся системная информа-

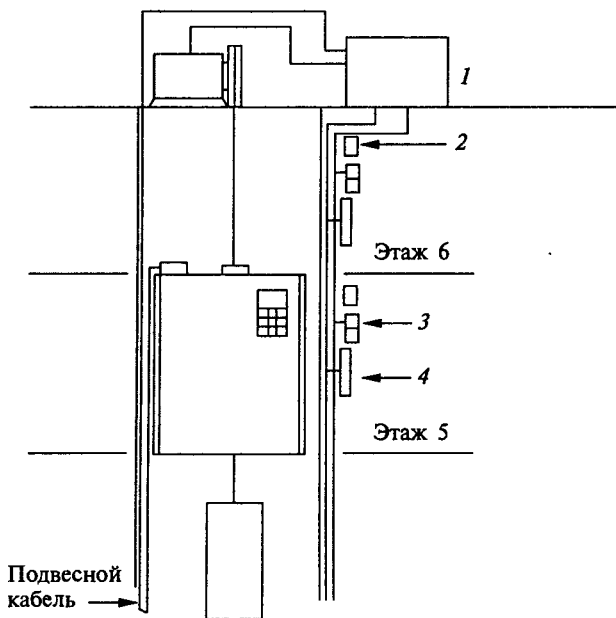


Рис. 4.129

ция и сигналы системы могут стать доступными только после подключения блока обслуживания.

Работу лифтов в группе обеспечивает специальный блок SOM, осуществляющий связь между единственной на два лифта веткой вызывных постов и взаимосвязанными подсистемами OCSS лифтов.

На рис. 4.129 представлена схема размещения устройств контроля лифта. Основная плата управления установлена в шкафу контроллера. Последовательная линия передачи данных (RSL) подразделяется на каналы кабины и шахты. Канал кабины, к которому подключена клеммная коробка кабины, представляет собой подвесной кабель. На рис. 4.129 приняты следующие обозначения: 1 — шкаф контроллера, 2 — позиционный индикатор, 3 — этажные кнопки, 4 — датчик положения.

На рис. 4.130, а представлена схема размещения датчиков в кабине (1LV, 2LV — датчики точной остановки; IPU, IPD — датчики замедления при движении соответственно вверх и вниз; 1LS, 2LS — конечные датчики), а на рис. 4.130, б — магнитных шунтов в шахте лифта. Датчики положения, дверные контакты и двигатель электропривода дверей подключаются к дискретным входам

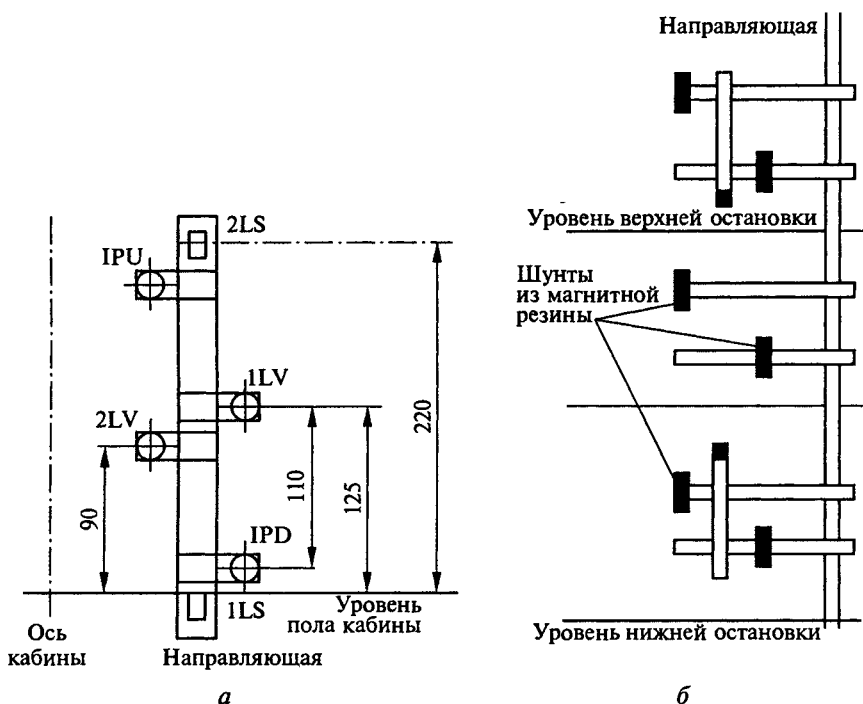


Рис. 4.130

платы LCB-II через подвесной кабель. Блок обслуживания ST (Service Tool) используется при монтаже и обслуживании для программирования и перепрограммирования программных областей управляющих плат.

К специальным модулям контроллера MCS 220 поступают следующие сигналы:

от датчиков положения: дверной зоны, замедления при движении вверх (вниз), режима дотягивания кабины до уровня (релевлинга) вверх (вниз);

от цепи безопасности: режима инспекции, контроля цепи безопасности, контроля дверей шахты, контроля кабины, движения вверх (вниз) в режиме инспекции (управление с крыши кабины с помощью консоли);

к интерфейсу: «Вверх», «Вниз», двери открыты (закрыты), малой скорости, большой скорости, запрета на открывание дверей.

В состав системы управления входят постоянные модули и модули, устанавливаемые по заказу.

**Режимы работы лифта.** Режимы работы лифта задаются: программно — выбором версии программного обеспечения EPROM и внесения необходимых данных при программировании EEPROM; аппаратно — установкой необходимых для активации определенного режима переключателей, ключей, пультов управления или датчиков.

Система управления на базе контроллера обеспечивает выполнение различных режимов работы лифта.

В режиме обучения СУ определяет местоположение кабины в шахте. Во время медленного прохода по шахте проверяется согласованность основных точек расположения контактов шахты; их точные координаты записываются в постоянное запоминающее устройство.

В режиме нормальной работы (NOR) при одиночной системе управления G1C осуществляется простое смешанное управление (SAPB) лифтом из кабины и с посадочных площадок, а при заказе — с выполнением попутных вызовов (собирательная система при движении вниз — модуль DCL, при движении в обоих направлениях — модуль FCL). Свободная кабина с закрытыми дверями остается в ожидании вызова на той площадке, на которой она была остановлена последним пассажиром, но через заданное в программе котроллера время кабина может последовать на основную посадочную площадку здания (модуль ARD). При работе двух лифтов в паре (групповая система управления G2C — дуплекс) на вызов отвечает та кабина, для которой расчетное время прибытия на вызов окажется меньше.

В режиме ревизии (TCI) управление лифтом производится только с поста ревизии на крыше кабины от кнопок «Вверх», «Вниз» и «Стоп». При этом исключено действие: вызывных кно-

пок с этажей (НВМ) и кнопок приказа из кабины; ключей переключателей управления на режимы парковки (PKS), вызова на специальный этаж (CTL1) и независимого обслуживания (ISC1); управления из машинного помещения (режим MRM).

Движение кабины в режиме ревизии производится только на малой скорости, ограничивается концевыми выключателями и возможно лишь при полностью закрытых дверях кабины и шахты.

При работе из машинного помещения исключены все вызовы, приказы и работа дверного оператора.

Режим аварийного перемещения кабины (ERO) позволяет с помощью электродвигателя лебедки снимать кабину с ловителей или концевых выключателей. Режим вводится переключателем DBS, расположенным на выносном блоке управления ERO, постоянно подключенном к контроллеру. Управление осуществляется кнопками «Вниз» и «Вверх» на блоке ERO. При этом кабина движется на малой скорости, при касании кабиной траверсы на верхнем концевом выключателе она может двигаться только вниз, при нахождении кабины на нижнем концевом выключателе она может двигаться только вверх.

Режим тестовых прогонов (TEST) используется для обкатки лифта, проверки его работы (правильного функционирования лифта, регистрации отказов и сбоев), локализации дефектных мест, задания программы работы лифта для контроллера или изменения ранее заложенной программы.

Для активизации режимов используется специальный блок обслуживания — программно-диагностический прибор Service Tool 9693 В1. Блок обслуживания регистрирует все отказы (сбои), произошедшие с момента подачи напряжения на лифт, указывает на дисплее время, прошедшее с момента последнего отказа, число отказов.

Исполнение режима автоматического возвращения (ARD) может быть заложено в программу контроллера как опция по заказу потребителя. Активация режима обеспечивается программой только при включении лифта в режим нормальной работы. В этом случае свободная кабина через заданное в программе время будет приходить на заданную программой площадку или в случае группового управления останавливаться там с закрытыми дверями в ожидании вызова.

Переключение лифта в режим вызова кабины на обслуживание специального этажа (CTL1) возможно только из режима нормальной работы и осуществляется ключом управления на одной из посадочных площадок. При активации режима аннулируются вызовы кабины с посадочных площадок, и кабина, выполнив все приказы, приходит на установленную посадочную площадку, где остается с открытыми дверями в ожида-



нии приказов из кабины. Режим отключается при повороте ключа управления в исходное положение.

Переключение лифта в режим парковки (CPR) возможно только из режима нормальной работы и осуществляется ключом управления на одной из посадочных площадок (модуль PKS). При активации режима кабина, выполнив все приказы, приходит на посадочную площадку, заданную программой, и стоит там с открытыми или закрытыми (модуль CPR) дверями в зависимости от заданной программы.

Переключение лифта в режим независимого обслуживания (ISC1) производится ключом управления в кабине. В этом режиме происходит отключение любых наружных вызовов кабины, лифт выполняет только приказы из кабины и стоит на посадочной площадке с открытыми дверями в ожидании других приказов.

В режим пожарной опасности (EFO) лифт должен переходить автоматически при поступлении сигнала из системы пожарной защиты здания или от специального ключа на одной из посадочных площадок. Перевод в режим EFO осуществляется для всех режимов работы лифта, кроме режимов ревизии и аварийного перемещения кабины.

Если в момент включения режима EFO кабина двигалась вверх, то кабина должна дойти до зоны точной остановки ближайшей посадочной площадки и, не открывая дверей, направиться вниз на основную посадочную площадку (этаж с выходом на улицу), не останавливаясь и не реагируя на приказы и вызовы. На этой посадочной площадке кабина должна стоять с открытыми дверями.

При нахождении кабины на промежуточной посадочной площадке и при включении режима EFO она должна автоматически отправиться на основную посадочную площадку аналогично описанному выше.

На специально оборудованных лифтах после срабатывания режима EFO от ключа в кабине включается режим перевозки пожарных подразделений (EFS). При этом управление ведется от кнопок в кабине. Ошибочные команды уничтожаются разовым поворотом ключа на переключателе пожарного обслуживания в положение OFF (выключение).

Двери закрываются продолжительным нажатием кнопки вызова. По прибытии на этаж кабина останавливается с закрытыми дверями. Двери открываются после продолжительного нажатия кнопки открывания дверей. Двери моментально закрываются вновь, если кнопка отпущена до того, как двери откроются полностью. Открывшись, двери остаются открытыми.

Режим землетрясения (EQO) включается от специального ключа на одной из посадочных площадок или от сейсмодат-

чика, имеющего электрическую связь с контроллером лифта. При этом кабина (куда бы она ни двигалась) должна остановиться на ближайшей посадочной площадке и стоять там с открытыми дверями.

Система управления предусматривает отмену попутных вызовов при движении кабины вниз (вверх) при условии, что кабина загружена более чем на 80 % грузоподъемности (модуль LNS C). Кабина снабжена грузовзвешивающим устройством, не допускающим пуск лифта в случае его перегрузки на 10 % выше номинальной (модуль OLD C). При загрузке кабины массой 100—150 кг система управления отменяет приказы из кабины, если их сделать больше  $N$  (устанавливается программно, обычно  $N = 3$ ) (модуль ANS).

**Функции подсистем СУ.** Подсистема операционного управления OCSS взаимодействует с подсистемой MCSS, а в случае группового управления — с другими OCSS группы через последовательную связь.

Эта подсистема выполняет следующие функции:

получение команд из кабины или с этажа;

выдача команды на движение в подсистему MCSS;

управление индикацией направления движения и положения кабины;

получение информации от других подсистем OCSS группы.

Подсистема содержит в памяти адреса удаленных станций, параметры их входов и выходов, а также другие параметры и режимы работы лифта, которые устанавливаются на заводе-изготовителе, но могут быть изменены на месте монтажа.

Подсистема контроля движением MCSS является элементом модульной системы управления лифтом. Эта подсистема соединяется через последовательную связь со следующими подсистемами: операционного управления OCSS, привода дверей DCSS, управления приводом и тормозом лифта DBSS.

Программное обеспечение подсистемы MCSS предназначено для выдачи команд в подсистему управления приводом и тормозом DBSS, необходимых для управления движением кабины лифта по заданной программе после запроса, поступающего от операционной подсистемы управления OCSS и от различных интерфейсов ручного управления.

Эта подсистема подает команды в интерфейсную подсистему привода дверей дверному оператору на перемещение дверей после запроса, поступающего от OCSS.

Подсистема MCSS выполняет следующие функции:

управление движением — управление последовательностью логических состояний движения, обеспечение функций подготовки к движению и коррекции по высоте, генерация графиков распределения скорости и ускорения, обеспечение управления тормозом электропривода в процессе нормальной работы, определение

тормозного пути и точки останова, передача информации о состоянии кабины в подсистему ОССС;

определение положения — определение скорости и направления перемещения кабины, параметров абсолютного положения, положения кабины по отношению к следующему заданному этажу, независимое определение положения кабины для обеспечения нормальной остановки на конечных посадочных площадках в нормальном режиме и режиме аварийного ограничения скорости;

обеспечение безопасности — обеспечение текущего контроля за устройствами безопасности и экстренного торможения, гарантирование безопасности при работе дверей и выполнении операций в зоне дверей, гарантирование безопасности при остановке, определение режимов управления движением;

установка и техническое обслуживание — текущий контроль данных, ввод установочных параметров, регистрация событий, диагностирование.

Для отслеживания кабины в шахте применена двухтрековая система слежения (рис. 4.131). Один трек отвечает за движение вверх, а другой — вниз. На каждом этаже устанавливается пара магнитов. Система построена на базе датчиков с магнитоуправляемыми герметизированными контактами (герконов), установленных на кабине, которые выдают сигналы в подсистему МССС. На кабине устанавливается две пары таких датчиков.

Датчики 1LV и 2LV соединены последовательно и выдают сигнал DZ (зона дверей).

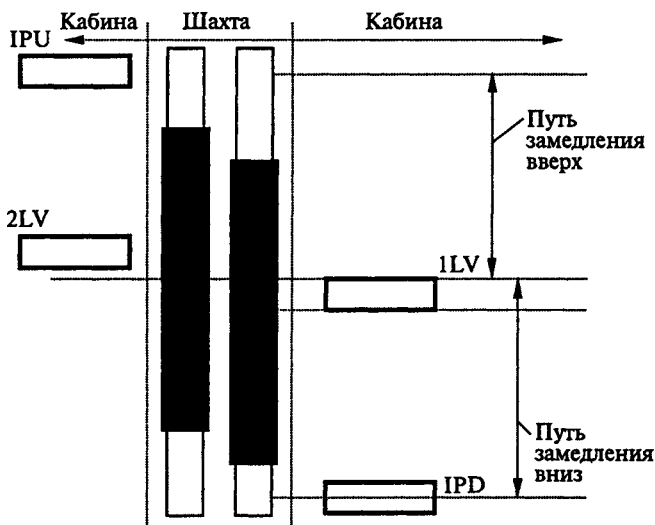


Рис. 4.131

Подсистема MCSS способна генерировать профили распределения скорости в следующих пределах: скорость  $0 \dots 2,5$  м/с; ускорение  $0,01 \dots 1,2$  м/с<sup>2</sup>; рывок  $0,01 \dots 2,4$  м/с<sup>3</sup>.

Подсистема управления приводом и тормозом DBSS предназначена для обеспечения управления движением кабины лифта после поступления команд от подсистемы управления движением. DBSS выполняет следующие функции: сопряжение с лебедкой, управление тормозом, сопряжение с шифратором скорости PVT, сопряжение с подсистемой MCSS, точное отслеживание заданного профиля распределения скорости, независимая проверка скорости.

Эта подсистема, являясь системой частотного регулирования скорости асинхронного электропривода на основе ШИМ, имеет фирменную марку OVF 20 (Otis Variable Frequency) и состоит из двух основных узлов — управляющей платы MCB II и силовой части.

Функциональная схема OVF 20 представлена на рис. 4.132. Силовая часть состоит из схемы подключения к электрической сети и преобразователя, состоящего из неуправляемого трехфазного двухполупериодного выпрямителя, линии связи по постоянному току и трехфазного инвертора.

Напряжение трехфазной электрической сети выпрямляется и сглаживается фильтром в линии связи по постоянному току, после чего транзисторный инвертор с использованием широтно-импульсной модуляции с помощью заданной последовательности

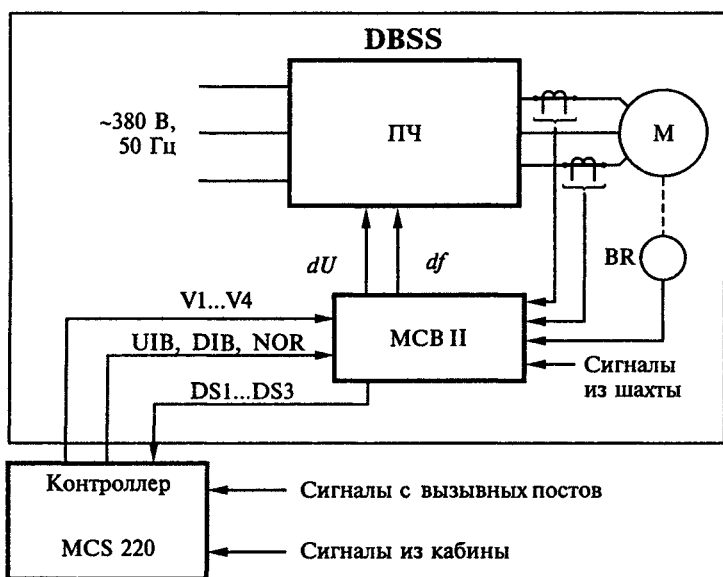


Рис. 4.132

коммутации IGBT-транзисторов преобразует напряжение постоянного тока посредством ШИМ в трехфазное переменное напряжение с переменной частотой. Транзисторы обеспечивают высокую скорость переключения (с несущей частотой 10 кГц).

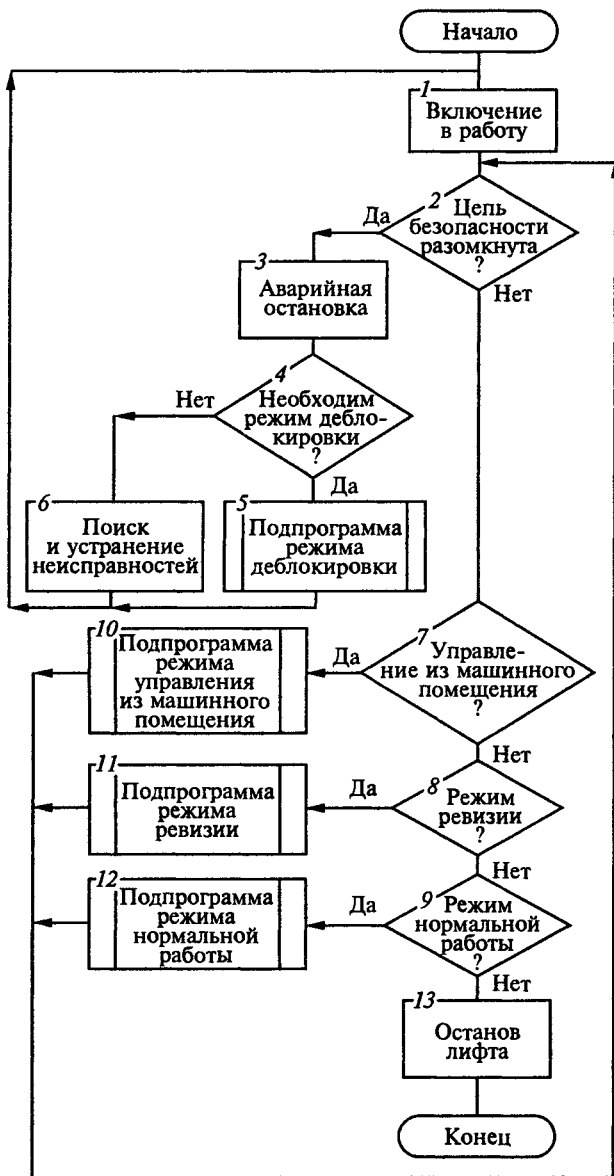


Рис. 4.133

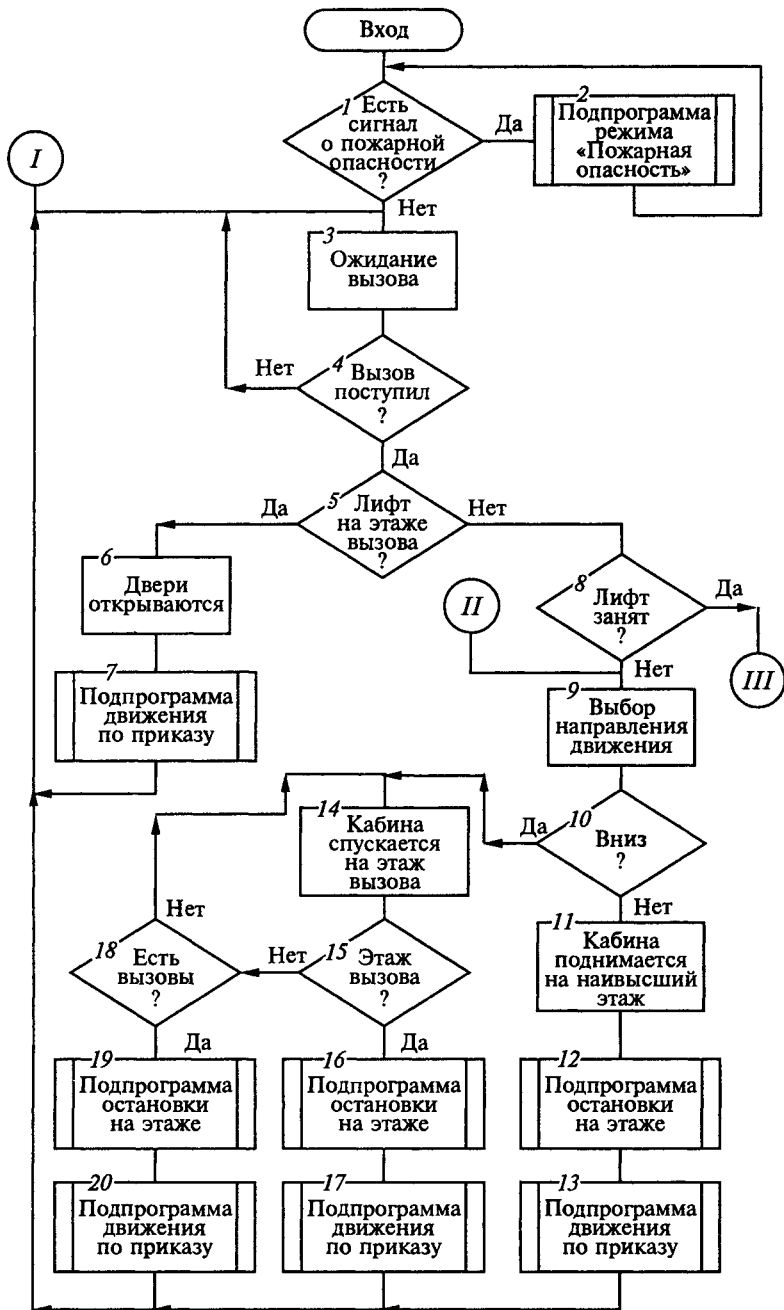
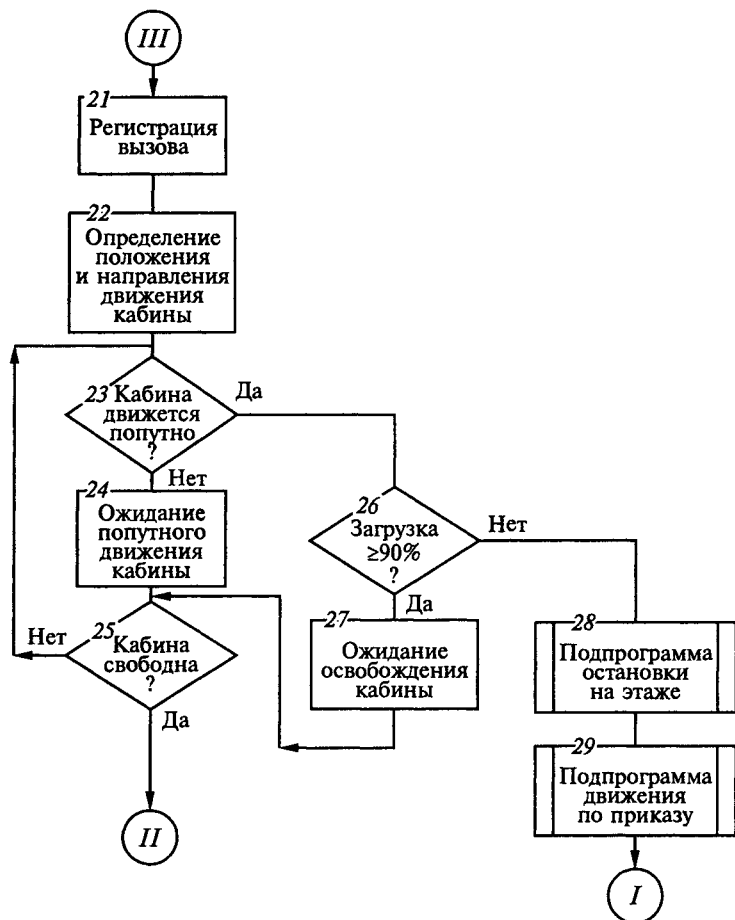


Рис. 4.134

Информация о выходных значениях принимается с датчика скорости BR, находящегося на валу электродвигателя. Применяется двухканальный (трековый) энкодер со сдвигом фаз сигналов на 90 электрических градусов GBA633A1 (по 1024 импульса на каждый трек). Контроллер MCS 220 обменивается сигналами с OVF20 (сигнал управления V1... V4, кодируемый четырьмя битами; UIB, DIB, NOR — сигналы, кодируемые одним битом каждый; сигналы текущего состояния лифта DS1... DS3, кодируемые тремя битами). Сигналы UIB, DIB, NOR представляют собой данные, определяющие начальное состояние системы OVF 20 перед работой, т. е. лифт работает в режиме обучения «вверх — вниз» или в нормальном режиме.



Замкнутый контур контроля скорости гарантирует точное и комфортное поведение привода в каждый момент работы. Измеренная скорость электродвигателя вводится в регулятор скорости типа ПИ-регулятора. Динамическая точность регулирования скорости (время устранения системой регулирования ошибки по скорости) высока.

Система обеспечивает режим рекуперативного торможения электродвигателя. Выделяемая энергия рассеивается в звене постоянного напряжения на тормозном резисторе, который подключается через транзистор, входящий в конструкцию инвертора. Резистор имеет внешнее подключение к преобразователю частоты.

**Алгоритмы управления движением лифта.** Алгоритмы управления реализуют работу лифта в различных режимах.

Алгоритм работы системы управления состоит из основного алгоритма, алгоритма подпрограмм, реализующих различные режимы работы системы управления (ревизии, деблокировки, управления из машинного помещения, нормальной работы, пожарной опасности), и алгоритмов дополнительных подпрограмм, реализующих типовые действия, производимые в режиме нормальной работы (движение лифта по приказу, остановка кабины на этаже).

Схема алгоритма основной программы работы лифта приведена на рис. 4.133. Алгоритм начинается с включения лифта в работу (блок 1), после чего начинается постоянный контроль цепи безопасности (2). Если цепь разомкнута, происходит аварийная остановка лифта (3). В зависимости от причины аварийной остановки либо применяется режим деблокировки (5), если кабина лифта установилась на ловители или конечные выключатели, либо производится определение и устранение другого рода сбоя в системе (6). Блоки 7... 9 определяют необходимость включения того или иного режима работы лифта, блоки 10... 12 реализуют соответствующие подпрограммы. Программа продолжает свою работу до тех пор, пока не будет выполнен принудительный останов лифта.

Схема алгоритма подпрограммы, реализующей режим нормальной работы, приведена на рис. 4.134. В этом режиме производятся контроль пожарной безопасности (1, 2), регистрация и выполнение всех вызовов и приказов, контроль загруженности кабины. Этот алгоритм составлен с учетом работы системы с собирательным управлением вниз, т.е. выполняются попутные вызовы при движении кабины вниз (если загрузка менее 90 % номинальной). Таким образом, в подпрограмме реализуются ожидание и регистрация вызова (3, 4), проверка нахождения кабины лифта на этаже вызова (5). В зависимости от этого осуществляется открытие дверей кабины с последующей работой лифта по приказу (6, 7)



или проверяется условие занятости кабины (8). Если кабина свободна, то блоки 9... 20 осуществляют выбор направления движения кабины и в зависимости от этого после получения приказа выполняются попутные вызовы при движении вниз (если они зарегистрированы) (14... 20) или движение кабины на наивысший из этажей, с которых поступили вызовы, а затем после получения приказа собирательное управление для движения вниз.

Если при регистрации вызова кабина занята, вызов выполняется при попутном следовании кабины при условии, что она загружена менее чем на 90 % номинальной загрузки. В противном случае ожидают, пока кабина не освободится или не проследует в попутном направлении, загруженная менее чем на 90 % (21... 29).

## **4.11. Состав и свойства систем управления оборудованием мониторинга**

### **4.11.1. Характеристика электроприводов телевизионных систем наблюдения за технологическим процессом, телескопов и радиотелескопов**

Оптические телескопы и радиотелескопы применяются в системах мониторинга окружающей среды, экологии, научных астрономических исследованиях. Телевизионные системы наблюдения выполняют контроль производственных помещений и событий, происходящих в этих помещениях. Характерным для данной группы оборудования является применение механизмов с несколькими степенями подвижности, обеспечивающими ориентацию и перемещение в пространстве исполнительного органа в соответствии с заданной программой движения или в режиме слежения за выбранной целью. Исполнительными органами являются оптоэлектронные средства, преобразующие изображение в электрические сигналы, или антенны, преобразующие электромагнитное излучение в электрические сигналы. Электрические сигналы преобразуются в сигналы восприятия изображений и излучений, являющиеся конечным результатом процесса наблюдения.

Применяются точные и высокоточные следящие электроприводы с оптоэлектронными и лазерными датчиками положения, обеспечивающие воспроизведение заданий в широкой полосе частот (до нескольких десятков герц) и с широким диапазоном изменения скорости. До недавнего времени подобные системы выполнялись с использованием электроприводов постоянного тока. В настоящее время основным типом электропривода является вентильный частотно-регулируемый электропривод с постоянными магнитами для возбуждения (сервопривод). Мощнос-

ти электроприводов в диапазоне от нескольких ватт до нескольких киловатт.

Двух- и трехступенные механизмы приборов наблюдения имеют много общего. Применяются также системы наблюдения с использованием трехступенных подвесов, например в качестве пространственных стабилизаторов положения приборов при наблюдении с подвижных оснований (авто-, авиа- и морского транспорта) [3].

Размещение оптического прибора на стабилизированной в инерционном пространстве платформе (СП) — наиболее простое средство стабилизации изображения в процессе наблюдения. Рассмотрим общие принципы построения таких систем на примере системы управления с трехосными гироскопическими датчиками (рис. 4.135).

Для перемещения или стабилизации в пространстве наружной рамы НР или внутренней рамы ВР подвеса на его осях установлены приводы М1, М2, М3. Сигналы управления на приводы поступают от гиродатчиков (гироскопов) Г1 и Г2. Оси подвесов гироскопов рационально ориентировать параллельно осям стабилизируемой платформы. Сигналы с датчиков угла гироскопа ДУГ1 и ДУГ3 могут использоваться без предварительного преобразования как сигналы задания, поступающие на входы блоков управления БУ1 и БУ2. При этом образуются две следящие системы по поло-

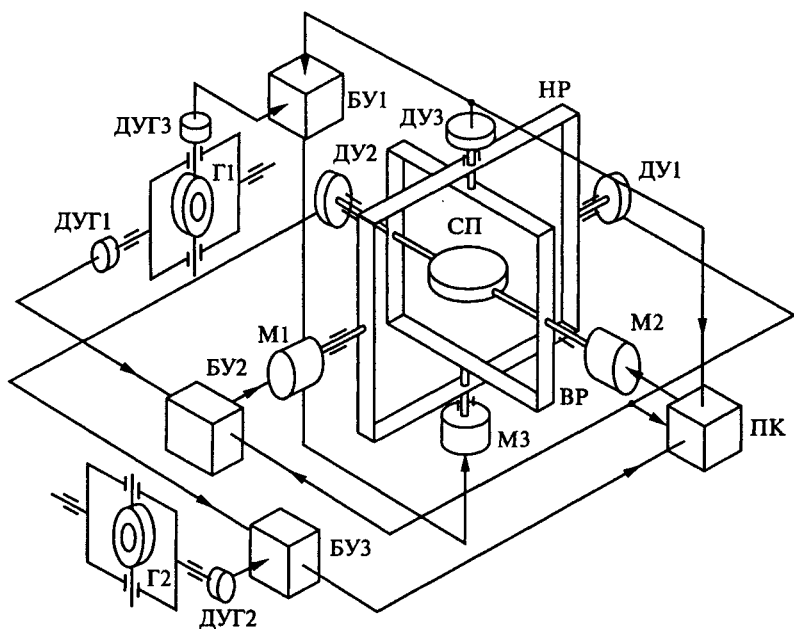


Рис. 4.135

жению в пространстве рам НР и ВР подвеса стабилизируемой платформы с датчиками угла ДУ1 и ДУ3 в обратных связях.

Если гироскоп Г2 установлен на основании, сигнал с выхода датчика угла ДУГ2 должен быть преобразован в преобразователе координат ПК. С выхода ПК поступает сигнал задания в систему управления третьей осью СП, образованную блоком управления БУ3, датчиком угла ДУ2 и двигателем М2. Вместо сигналов специально установленных гироскопических датчиков можно использовать выходные сигналы гиросистем, установленных на подвижном основании с другими целями, например, для управления или ориентации основания. Это существенно упрощает устройство в целом.

Динамический диапазон допустимых входных сигналов гироскопов в рассматриваемом случае должен превышать диапазон возможных изменений параметров перемещения основания. Диапазон угла отклонения чувствительного элемента гироскопов в такой конструкции может не превышать нескольких градусов. Так построено большинство классических гиросtabilизаторов.

#### 4.11.2. Система управления радиотелескопом [6]

Крупные радиотелескопы (РТ) с параболическим зеркалом, используемые для радиоастрономических исследований и космической связи, представляют собой сложные инженерные сооружения. Главное зеркало 1 (рис. 4.136), диаметр которого может достигать десятков метров, монтируется на опорно-поворотном устройстве 2. Уравновешивание его обеспечивается противовесом 3.

Направление РТ на заданную точку космического пространства осуществляется в результате совместной работы азимутального и угломестного приводов, первый из которых обеспечивает поворот опорно-поворотного устройства на катках 5 вокруг вертикальной оси, а второй — поворот зеркальной части относительно горизонтальной (угломестной) оси.

Азимутальный электропривод включает в себя редукторы 4 и двигатели М1 и М2, получающие питание от управляемых преобразователей УП1 и УП2.

Одним из условий получения высокой точности работы следящих электроприводов является наиболее полное исключение влияния на их работу зазоров в кинематических цепях. В тех случаях, когда электропривод РТ выполнен двух- или многодвигательным, для устранения влияния зазора применяют электромеханические устройства выборки зазора, реализующие возможность создания тормозного момента одним из двигателей, в то время как другой двигатель создает двигательный момент. В установившемся режиме на входы токовых контуров с регуляторами тока РТ1 и РТ2 через блоки ограничения БО1 и БО2 кроме напряжения регулятора скорости  $u_{p.c}$  с разными знаками подается напряжение  $u_{6.k}$  с выхода устройства

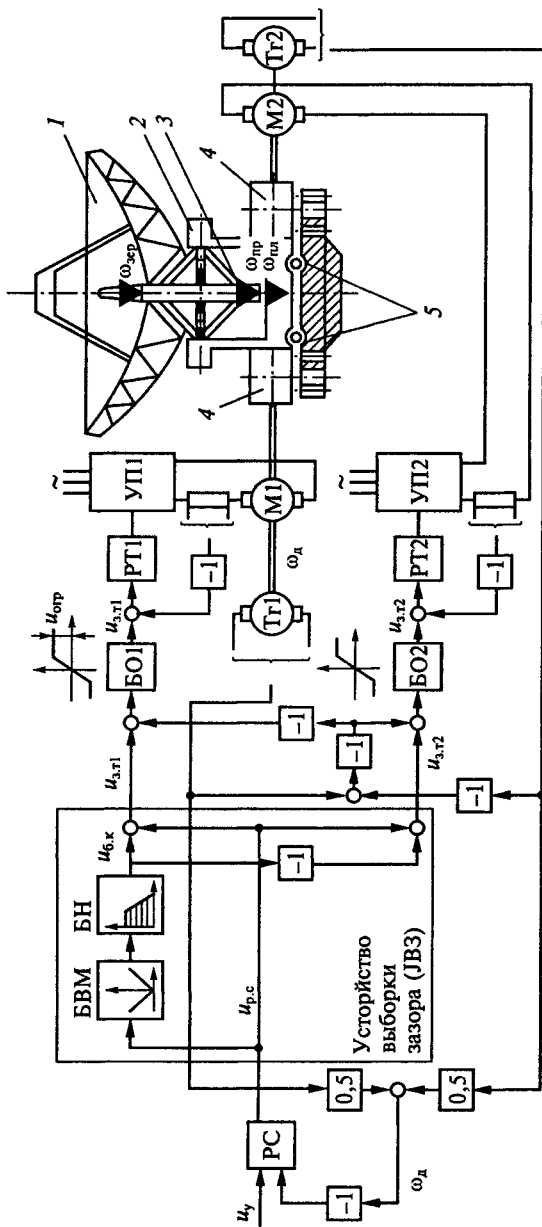


Рис. 4.136

выборки зазора, включающего в себя последовательно соединенные блок выделения модуля БВМ и блок нелинейности БН.

Поскольку связь двигателей с опорно-поворотным устройством осуществляется через редукторы, передаточное число которых составляет десятки тысяч, момент инерции поворотной части, приведенный к двигателю, обычно значительно меньше момента инерции двигателя и редуктора. Поэтому существует возможность настройки контура скорости практически так же, как в жесткой системе. Однако колебания исполнительного органа (зеркальной части) электроприводом при этом не демпфируются.

Одна из задач разработки системы наведения состоит в обеспечении плавного движения зеркала в результате создания требуемого закона управления скоростью двигателей. При проектировании электропривода разработчик располагает математическим описанием объекта в виде многомассовой упруговязкой структуры. Однако из-за исключительной сложности конструкции, являющейся нелинейной системой с распределенными параметрами, и связанных с этим трудностей расчета описание, как правило, необходимо уточнять в процессе натурных испытаний и опытной эксплуатации РТ. Поэтому исследователь должен решить задачу разработки математической модели объекта, в которой реальная конструкция заменена эквивалентной системой с сосредоточенными массами и упруговязкими звеньями, претерпевающими деформацию скручивания.

Чтобы иметь возможность идентифицировать радиотелескоп как сложную упруговязкую электромеханическую систему на основе экспериментальных логарифмических частотных характеристик (ЛЧХ), система должна быть замкнутой через регулятор скорости РС по полусумме напряжений тахогенераторов Тг1 и Тг2. Использование ПК позволяет одновременно определить ЛЧХ, связывающие входные сигналы тахогенератора ( $\omega_d$ ), гироскопических датчиков угловых скоростей платформы опорно-поворотного устройства ( $\omega_{пл}$ ), противовеса ( $\omega_{пр}$ ) и зеркала ( $\omega_{зер}$ ) с сигналом на входе замкнутого контура регулирования скорости  $u_y$ . Места установки датчиков угловых скоростей помечены на рис. 4.136 темными треугольниками.

Опорно-поворотные устройства крупных радиотелескопов оборудуются силовыми следящими электроприводами наведения. В такой следящей системе имеется внутренняя скоростная подсистема, выполняемая с использованием принципов модального управления. Синтез алгоритмов управления предусматривает синтез наблюдателя переменных состояния радиотелескопа как многомассового упруговязкого объекта управления и синтез модального регулятора, обеспечивающего получение нормированных динамических процессов при управлении.

## Глава 5

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

### 5.1. Классификация и структура технологических комплексов базовых отраслей промышленности

В системе промышленного производства можно выделить три класса технологических процессов: добыча сырья, переработка сырья в полуфабрикат, переработка полуфабриката в товарный продукт. Первый класс включает в себя добычу твердых, жидких или газообразных полезных ископаемых, заготовку сырья лесопромышленным и сельскохозяйственным комплексами; второй — технологии изменения агрегатного состояния или химического состава вещества; третий — технологии изменения формы и состава вещества для получения готового товарного продукта.

Во всех технологических процессах участвуют транспортные и подъемно-транспортные системы, обеспечивающие единство и непрерывность технологических процессов.

В каждом классе технологических процессов имеются подклассы, отражающие особенности сырья и способы его добычи, переработки и изготовления из него готового продукта. Например, при добыче твердого сырья выделяются технологии подземной, надземной (открытой) и водно-транспортной разработок. При переработке стали — продукта сталеплавильного производства — применяются технологии непрерывной разливки стали и переработки заготовок, полученных в результате охлаждения стали в специальных колодцах.

Разнообразные производства разделяются по виду готовой продукции. Базовыми производствами являются: агропромышленное, добычи полезных ископаемых, лесопромышленное и лесоперерабатывающее, металлургическое, машиностроительное, бумагокартоноделательное и полиграфическое, текстильное, химическое, пищевое.

В каждом из производств имеются технологические комплексы, объединяющие группу технологических агрегатов, машин и транспортных средств. Эти комплексы включают в себя разнообразные агрегаты и машины. Например, прокатные станы содержат клетки, ножницы, рольганги и манипуляторы; бумагоделательные машины — прессы, группы сушильных цилиндров, каланд-

ры, наматывающие устройства, связанные непрерывно движущимися сетками и полотном бумаги. В структуре технологического процесса производства готового продукта можно выделить три части: подготовку исходного сырья в вид, удобный для изготовления готового продукта; изготовление готового продукта; обработку (резание) и упаковку готового продукта для отправки его потребителю. В первой части используются технологические комплексы, применяющие насосы, компрессоры, смесители, центрифуги, сепараторы, дозаторы и другие механизмы, входящие в первую группу типового оборудования.

Технологические комплексы второй части являются главными в производстве и используют оборудование разных типовых групп. К технологическим комплексам третьей части производства относятся конвейеры, манипуляторы, кантователи, подъемно-транспортные машины и другие аналогичные им машины.

Особое место занимают технологические комплексы городского хозяйства. В них системы автоматизированных электроприводов активно используются для: водоснабжения и водоотвода, кондиционирования и вентиляции зданий и сооружений; электрического транспорта зданий (лифтов) и городского транспорта (трамваев, троллейбусов, вагонов метро); минипрачечных и минипроизводств мясных и молочных продуктов.

Далее рассматриваются некоторые примеры автоматизированных технологических комплексов (АТК) базовых производств и городского хозяйства, в состав которых входит оборудование типовых групп, рассмотренных в гл. 4. В связи с этим освещаются только вопросы взаимодействия оборудования в технологическом процессе, управления многодвигательными системами электроприводов комплексов и координированного управления оборудованием.

## **5.2. Системы управления комплексами**

### **5.2.1. Координированное управление агрегатами в составе технологического комплекса**

При координированном управлении агрегатами в составе технологического комплекса в основном применяют алгоритмы управления по готовности или событию, но могут применяться алгоритмы управления и по состоянию агрегатов. Например, в горнодобывающей промышленности последовательность включения, работы и выключения агрегатов, входящих в комплексы, определяется поступлением перерабатываемого материала на агрегаты. В металлургической промышленности погрузка слитков на слит-

ковозы производится только после того, как слитковоз подъедет к определенному колодцу. В комплексах пищевых производств расфасовка готовой продукции в тару осуществляется только после того, как тара поступит под устройство выгрузки. Во всех вышеперечисленных случаях информация о наступлении события поступает от различных датчиков, например датчиков веса, путевых датчиков, датчиков наличия тары. Управление работой отдельных агрегатов в комплексе осуществляется промышленным компьютером верхнего уровня СУ или технологическим контроллером среднего уровня СУ.

На насосных станциях количество работающих насосов в питающей сети зависит от давления в сети или суточного потребления. Работа насосов определяется информацией, поступающей с датчика давления, установленного в магистрали питающей сети, или по графику суточного расхода воды, заложенному в промышленном компьютере.

Если на агрегате возникает аварийная ситуация или происходит отклонение его параметров от номинальных, информация по сети нижнего уровня поступает на контроллеры приводов других агрегатов. В этом случае управляющая программа конкретного агрегата останавливает его работу или изменяет режим работы. Информация по сети поступает на промышленный компьютер верхнего уровня, который также может принять решение о дальнейшей работе агрегатов в комплексе.

Одной из функций промышленного компьютера, как отмечалось выше, является контроль и поддержание в соответствии с программой технологических переменных, определяющих качество обработки вещества и получение конечного продукта производства, соответствующего заданным требованиям к качеству. Это выполняется управлением всеми агрегатами комплекса; в случае отклонения контролируемых переменных от заданных значений вырабатываются управляющие воздействия на агрегаты, ликвидирующие эти отклонения.

### **5.2.2. Средства управления комплексами**

Система управления технологическим комплексом представляет собой многоуровневую разветвленную структуру, в состав которой входят промышленные компьютеры, технологические контроллеры, посты оператора, программаторы, средства, реализующие промышленные сети.

Рассмотрим систему управления процессами Process Control System 7 (PCS7) фирмы «Siemens» [58]. Данная система предназначена для управления непрерывными технологическими процессами и работы в области управления сборочными производствами. Она ориентирована на управление технологическими ком-



плексами, включающими в себя большое число агрегатов, машин и механизмов со многими системами комплектных электроприводов (КЭП), оснащенных сетевыми средствами.

Схема распределенной системы SIMATIC PCS7 представлена на рис. 5.1.

Комплектные электроприводы переменного или постоянного тока управляются через коммуникационную систему DP/PA LINK и промышленную сеть Profibus-PA от технологического контроллера S7-400. В управлении используется распределенная периферия (РП) ET 200М. Для управления применяется интеллектуальная подсистема (ИП) S7-300. Программирование микропроцессорных электроприводов и систем управления осуществляется с помощью программатора ПГ. Посты оператора ПО обеспечивают наблюдение и корректирование процесса управления. Инжиниринговая станция ИС осуществляет диагностирование техно-

Связь с другими системами (Aspen Tech, Cornerstone, Gensym, SAP и т. д.)

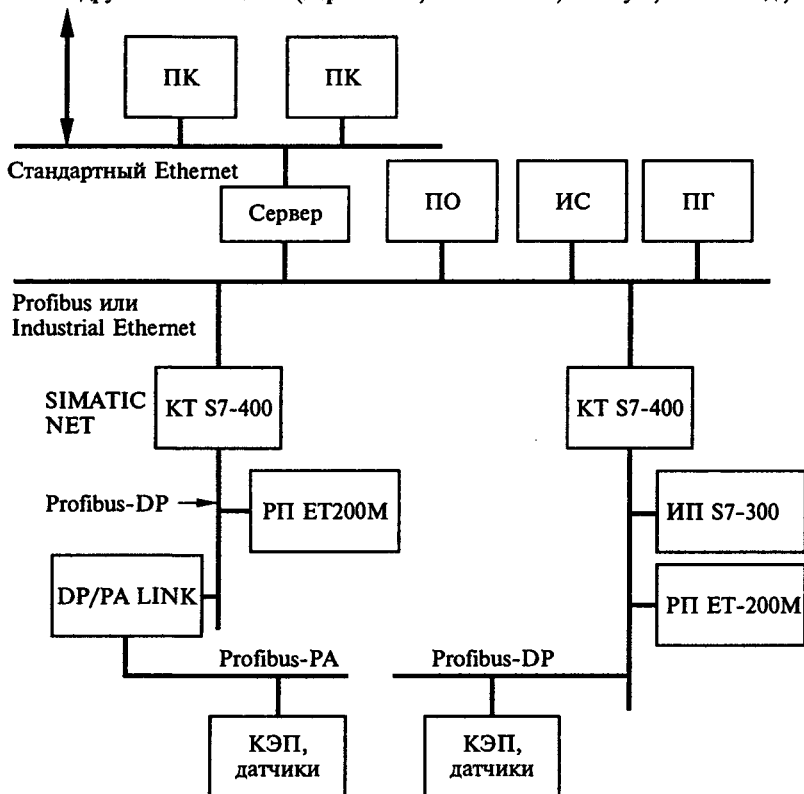


Рис. 5.1

логического оборудования в режимах рабочего функционирования, реализует средства разработки программ управления, обеспечивает визуализацию процессов управления. Стандартная быстрая последовательная шина Profibus или Industrial Ethernet осуществляет связь систем управления агрегатами с дисплейными системами ПО, КТ, сервером. Скорость передачи информации 19 200 кбод. Последовательные шины Profibus, Industrial Ethernet выполняются с волоконно-оптическим или коаксиальным кабелем.

Представленная система базируется на компонентах семейства SIMATIC S7. Разработаны программные пакеты, которые расширяют спектр функций данных компонентов функциями, типичными для систем управления верхнего уровня иерархии.

Разработанная система позволяет автоматизировать весь производственный процесс, применяя устройства только одного семейства, т. е. на базе одних и тех же устройств можно автоматизировать как непрерывные, так и дискретные технологические процессы.

Визуализация и контроль процесса осуществляются при помощи средств, имеющих одинаковую пользовательскую оболочку в центральных диспетчерских пунктах и непосредственно около управляемой установки. Настройка всей системы осуществляется централизованно с помощью ПК-ориентированного программного обеспечения, в основе работы которого лежит общая для всей системы база данных.

**Сетевые средства.** Информационная сеть представляет собой систему, состоящую из ПК и программируемых контроллеров, взаимосвязанных между собой каналами передачи данных для обмена информацией. Передача информации регулируется набором правил и соглашений, называемых протоколом сети (обмена). Протокол определяет: аппаратные средства сети (разъемы, кабели, типы интерфейсов), сигналы, форматы данных и способы проверки ошибок, алгоритмы подготовки сообщений и их передачу.

В распределенных системах управления применяются децентрализованные сети. В них используется метод передачи маркера, при котором локальная станция (например контроллер привода) может передавать информацию только тогда, когда она получает маркер; последний представляет собой определенное сообщение и передается последовательно от одного узла к другому.

На рис. 5.2 представлена функциональная схема организации информационной сети технологического комплекса фирмы «Siemens» [58]. На нижнем уровне используется сеть AS-интерфейс (Actuator-Sensor-Interface), стандартизованная IEC. На среднем уровне применяется шина Profibus — европейский стандарт EN 50170,

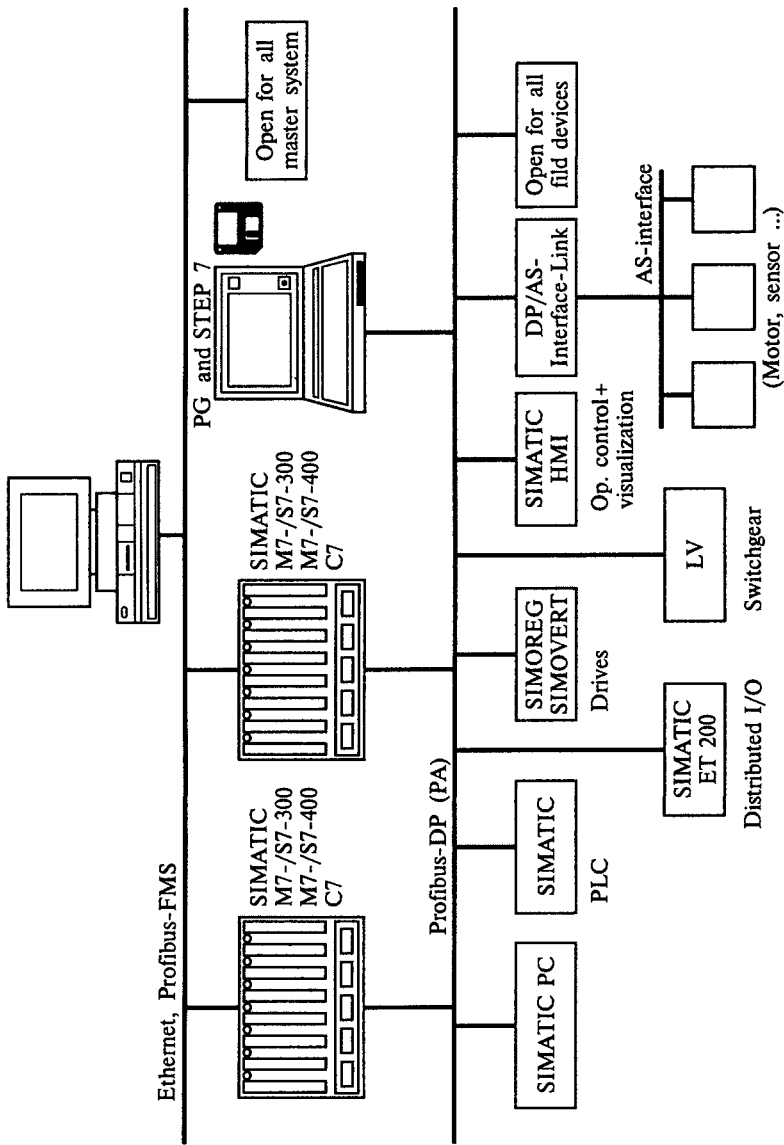


Рис. 5.2

поддерживаемый более чем 600 ведущими производителями средств автоматизации. Ее модификации предназначены: Profibus-DP — для обеспечения быстрого обмена данными с устройствами децентрализованной периферии (интеллектуальные датчики, сенсоры и исполнительные механизмы); Profibus-FMS — для решения универсальных задач коммуникации; Profibus-PA — для решения задач автоматизации непрерывных технологических процессов, особенно в зонах, требующих высокой степени надежности применяемых систем, и во взрывоопасных зонах. Промышленная сеть Ethernet (самый высокий уровень) характеризуется возможностью передачи больших объемов информации с наивысшей скоростью. Обычно для этого используется привычный MAP-протокол или современный TCP/IP. Промышленная сеть Ethernet предназначена для подключения персональных компьютеров к промышленным информационным сетям, а также для подключения программаторов и средств визуализации.

Для реализации промышленных сетей, кроме физических носителей данных (см. гл.1), применяются: коммуникационные процессоры, серверы, интерфейсные модули, трансиверы, модули OLM/ELM, повторители, разветвители, шинные терминалы [58].

**Информационное обеспечение систем.** Под информационным обеспечением систем понимают совокупность данных (технологические переменные, диагностические характеристики, управляющие сигналы, сигналы аварийных режимов и др.), способов их передачи, методов преобразования и форм представления, а также программного обеспечения системы управления. В информационное обеспечение также могут входить нормативная, справочная и директивная информация, динамические модели.

Все сигналы в технологическом комплексе разделяются на входные и выходные, аналоговые и дискретные. Источниками входных аналоговых сигналов являются датчики скорости, положения, температуры и др.

Источниками входных дискретных сигналов являются концевые выключатели и другие сигнализаторы состояния технологического оборудования объекта, а также клавиши и кнопки пультов управления. Вся информация с датчиков поступает на различные модули ввода технологического контроллера. Контроллер, обработав входную информацию, вырабатывает управляющее воздействие, которое посредством модуля вывода поступает на управляемый преобразователь.

Надежность систем управления обеспечивается комплексом мер, к которым относятся контроль обрыва датчиков, контроль целостности цепей исполнительных механизмов, резервирование и др.

## **5.3. Автоматизированные технологические комплексы агропромышленного производства**

### **5.3.1. Характеристика технологических комплексов**

В агропромышленном производстве используются следующие механизмы и машины, объединяемые в разнообразных технологических процессах [11]:

центробежные механизмы — насосы, центробежные и осевые вентиляторы, молочные и другие центрифуги, вакуумные насосы;

установки с кривошипно-шатунным механизмом — поршневые насосы, поршневые компрессоры, поршневые прессы сена и соломы, лесопильные рамы;

механические транспортеры для подачи продукта (ленточные, ковшовые, шнековые, тросошайбовые, спиральные), раздачи кормов (скребковые), уборки навоза (цепные, штанговые, скреперные);

машины первичной переработки продуктов и приготовления кормов — зернодробилки, измельчители грубых кормов, смесители, грануляторы, молотилки-терки, теребильные машины, сортировальные и др.

Связь машин и механизмов между собой в технологическом комплексе осуществляется с помощью конвейеров различных конструкций, тельферов или манипуляторов. В АТК агропромышленного комплекса применяют системы управления как с централизованным управлением (элеваторы, комбикормовые заводы и т. д.), так и с децентрализованным управлением от микроЭВМ, контроллеров или промышленных компьютеров. Большое количество контролируемых технологических переменных обуславливает применение большого числа интеллектуальных модулей ввода и вывода (цифровых и аналоговых). В технологических комплексах применяют нерегулируемые и регулируемые электроприводы машин и механизмов. Большинство машин и механизмов в технологических комплексах работает в режимах S1 и S2, значительно меньшее число — в режиме S3 (см. п. 1.5). Другие режимы работы используют крайне редко. Для технологических комплексов агропромышленного производства характерна большая протяженность транспортных механизмов.

Питание технологических комплексов осуществляется от комплектных трансформаторных подстанций.

Сельскохозяйственное производство характеризуется специфическими условиями, поэтому к электрическим приводам механизмов и машин предъявляются дополнительные требования: отклонение напряжения электродвигателя допускается в пределах от  $-7,5$  до  $+10$  % номинального значения; электродвигатели сельс-

кохозяйственного назначения должны допускать кратковременную работу с номинальной нагрузкой при напряжении до 0,8 номинального в течение не более 10 мин; электродвигатели должны допускать длительную работу при снижении напряжения до 0,8 номинального значения со снижением мощности до 0,8 номинальной; электрический привод должен быть рассчитан для работы при температуре от минус 40 до плюс 40 °С и относительной влажности ( $95 \pm 3$ ) % при температуре плюс 20 °С.

Электрические приводы, предназначенные для эксплуатации в животноводческих и птицеводческих помещениях, должны быть, кроме того, рассчитаны на работу в условиях, указанных в работе [37].

В ряде сельскохозяйственных производственных помещений концентрация пыли может достигать  $1,3 \text{ г/м}^3$  (склады и хранилища кормов, кормоцехи, скотные дворы и птичники, цехи первичной обработки технических культур и др.). Устанавливаемые в таких помещениях электроприводы должны быть рассчитаны для работы при указанной запыленности.

### **5.3.2. Автоматизированный конвейер обработки овощей**

Работу автоматизированного конвейера обработки овощей рассмотрим на примере технологической линии по производству плодовоовощных консервов «Икра кабачковая».

Технологический процесс производства данного вида продукции можно разделить на две части: обработка овощей и получение полуфабриката; непосредственное приготовление продукта и его расфасовка. Обработка овощей и подготовка полуфабриката занимают основную часть технологического цикла. Расчетная мощность данной линии составляет 30 000 банок за одну рабочую смену.

Для производства данного вида продукции требуются разнообразное сырье и полуфабрикаты, в частности овощи: кабачки, морковь, репчатый лук и зелень.

На стадии обработки овощей и получения полуфабриката используются следующие технологические операции: сортировка (овощи); калибрование (морковь, лук репчатый); сухая очистка (морковь); отмачивание (морковь); мойка (кабачки, морковь, лук, зелень); ополаскивание (овощи); очистка (морковь, лук, кабачки); резание (кабачки, морковь, лук, зелень); дробление (кабачки).

На основании последовательности этих операций построена карта технологического процесса, обработки овощей и получения полуфабриката (рис. 5.3).

Большинство операций повторяются с разными видами сырья, но поскольку они должны проходить почти одновременно, то используются три параллельные линии оборудования для подготовки трех основных компонентов: кабачков; моркови; лука и

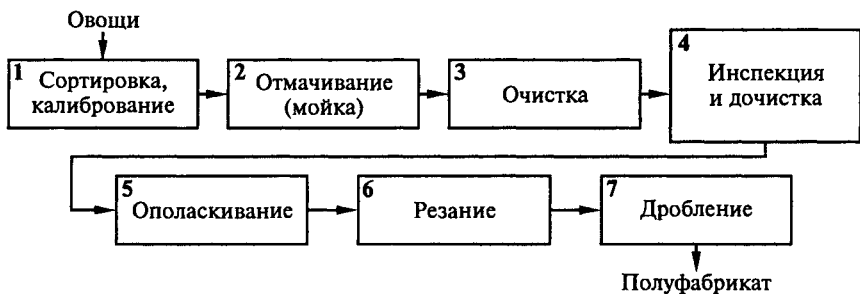


Рис. 5.3

зелени. Для подготовки этих компонентов используется разное оборудование, так как операции мойки, очистки, резания и т. д. производятся для этих продуктов по-разному.

Схема системы управления технологической линией обработки овощей и получения полуфабриката для производства овощных консервов «Икра кабачковая» (рис. 5.4) имеет двухуровневую структуру. На верхнем уровне находится персональный компьютер (управляет работой автоматизированного склада по подаче овощей на технологическую линию, транспортными потоками, отображает текущую информацию о технологическом процессе, ведет журнал и т. д.), а на нижнем уровне — технологический контроллер фирмы «Siemens» SIMATIC S7-300 (управляет оборудованием технологической линии, отображает текущую информацию о состоянии оборудования, осуществляет диагностирование оборудования). В системе управления используются сети: на верхнем уровне — Industrial Ethernet; на нижнем — Profibus-DP.

В технологическом процессе по производству продукции используется оборудование для транспортирования и основного технологического процесса. Часть механизмов и машин имеет регулируемые электроприводы, управляемые от БУ, другая часть — нерегулируемые, которые управляются посредством коммутационно-защитной аппаратуры (КЗА).

Используемое оборудование представлено в табл. 5.1.

Оборудование располагается согласно технологической схеме (см. рис. 5.3).

Система управления работает следующим образом. Диспетчер в начале работы с центрального компьютера вводит задание на смену, определяя вид и количество исходного сырья. Введенная информация поступает на автоматизированный склад, где осуществляется подготовка сырья к доставке на технологическую линию. В зависимости от количества сырья задействуется необходимое количество внутрицехового напольного транспорта, причем его подача осуществляется по заданному временному графику. Как

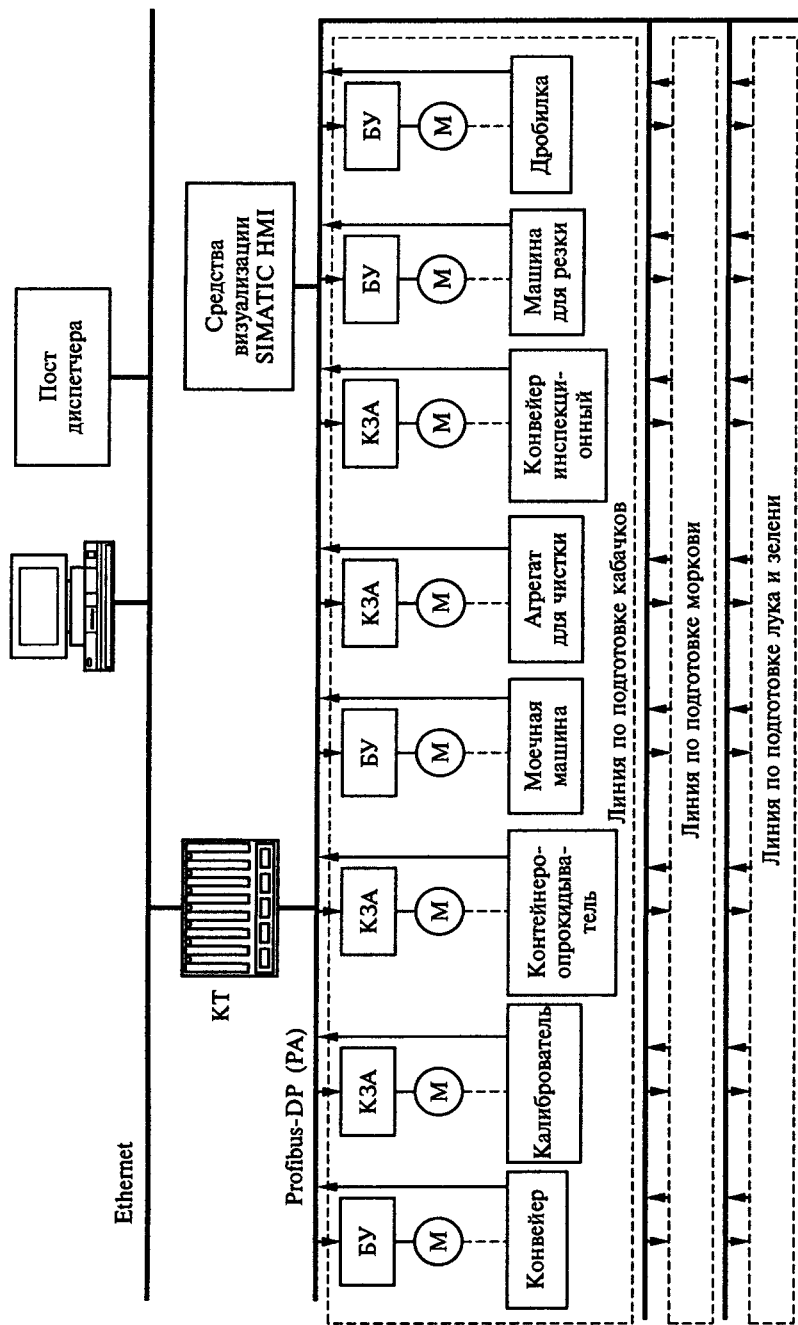


Рис. 5.4



Таблица 5.1

Оборудование	Операция
Конвейер роликовый А9-ККТ-1, конвейеры ленточные А9-КТФ	Сортировка, калибрование
Калиброватель универсальный А9-ККХ, А9-ККИ	То же
Контейнероопрокидыватель КУП-1000	Очистка
Машина для замочки корнеплодов РЗ-КС	Отмачивание (мойка)
Барабанная моечная машина РЗ-КМ2-А, машина моечная барабанно-щеточная А9-КЯН	То же
Машина для мойки корнеплодов РЗ- МФ, машина моечная лопастная А9-КЛ2-А1Т	»
Вентиляторная моечная машина А9-КМИ	»
Моечная машина Т1-КУН, стиральная машина СМ-10А	»
Конвейер ленточный инспекционный А9-КТФ	Инспекция и дочистка
Конвейер ленточный, оборудованный триммерами А9-КТИ, А9-КИЕ, аппарат для паротермической очистки А9-КЧЯ	Очистка
Машина для обрезки шейки и корневой мочки РЗ-КЧЧ, агрегат для очистки лука от кожуры РЗК-ЧП	Резание, очистка
Машина для резки кабачков РЗ-КИЛ, А9-КИЯ, РЗ-КИЖ	Инспекция, резание и дочистка
Машина для резания корнеплодов А9-КР-3В	Резание
Машина для резания А9-КП-3В	»
Машина для резания зелени А9-КИЦ	»
Дробилка Д-1-7,5, волчок К6-ФВП-120	Дробление

только первая партия подана на первую стадию производства (срабатывает датчик веса), технологический контроллер запускает оборудование этой стадии. Далее оборудование включается в работу в соответствии с технологией производства. В режиме рабочего функционирования информация оперативно отображается на посту диспетчера в числовом и графическом видах. В системе управления предусмотрены автоматический и ручной режимы работы.

В случае возникновения аварийной ситуации или отсутствия необходимого сырья в ходе производственного процесса система управления подает звуковой сигнал и отключает оборудование всей технологической линии. На посту диспетчера отображается информация о причинах остановки и дальнейших действиях.

### 5.3.3. Автоматизированный участок приготовления комбикормов

На рис. 5.5 приведена технологическая структурная схема цеха комбикорма (приняты следующие условные обозначения: ЖД — пункт разгрузки железнодорожного транспорта, АВТ — пункт разгрузки автомобильного транспорта, МКК — микокарб — консервирующая добавка).

Производство комбикорма выполняется по технологической схеме с предварительным приготовлением смесей компонентов. Зерновое сырье поступает в цех комбикорма через железнодорож-

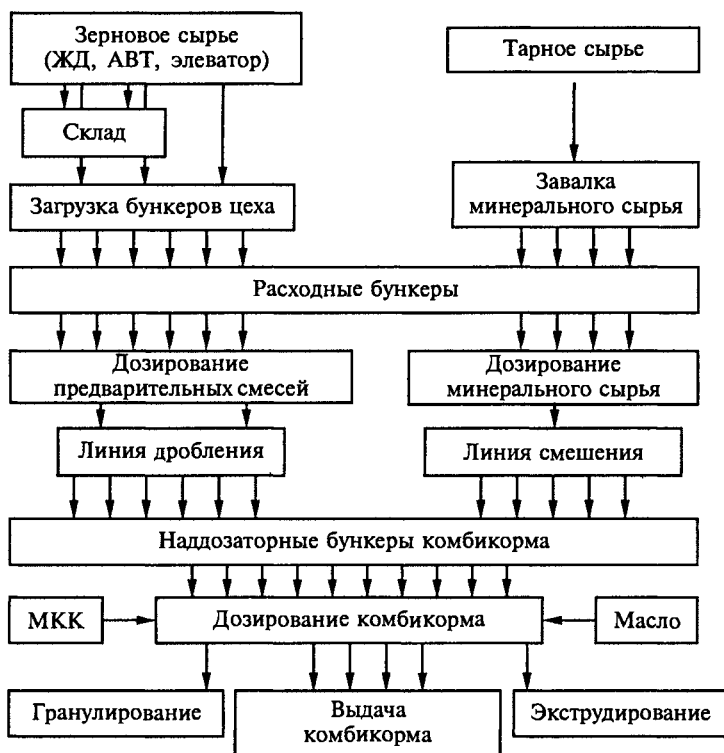


Рис. 5.5

ный и автомобильный терминалы, из элеватора и механизированных складов тарного сырья. На линии загрузки склада и бункеров цеха осуществляется загрузка зерновых и шротовых компонентов в расходные бункеры, а на линии завалки минерального сырья происходит механизированная подача соли, мела, фосфатов и других компонентов комбикорма. Линия дозирования предварительных смесей зерна совместно с линией дробления обеспечивает подготовку зерновых предварительных смесей; на линии дозирования минеральных смесей производятся минеральные предварительные смеси (кормосмеси) и белково-витаминные добавки. Весовые рычажные дозаторы со стрелочной индикацией АД-3000, 10-ДК, 5-ДК и другие обеспечивают точность дозирования примерно 1 %.

Технологическая схема включает в себя следующие подсистемы: загрузки зернового сырья, хранения зернового сырья, дозирования предварительных смесей зерна, дозирования минерального сырья, дробления зерновой смеси, дозирования готового продукта, гранулирования комбикорма, экструдирования зернового сырья, ввода производственного задания.

Для комбикормового цеха характерны вертикальная компоновка оборудования и обилие транспортных путей. Суммарная протяженность вертикальных транспортеров (норий), горизонтальных цепных транспортеров-распределителей, винтовых конвейеров (более 20) и т. п. составляет десятки километров. Сложность объекта управления характеризуется следующими показателями: число точек контроля 821, сигналов управления 681, аналоговых входных сигналов 56, аналоговых выходных сигналов 8, весодозирующих систем 8.

В качестве приводов транспортеров, конвейеров, задвижек, шнеков, поворотных кругов и дробилок применяют регулируемые электроприводы переменного тока с частотным регулированием скорости, а в качестве приводов грануляторов, экструдеров, аспирационных систем, опрокидывателя железнодорожного вагона — нерегулируемые приводы переменного тока.

На рис. 5.6 представлена схема системы управления комбикормового цеха по приготовлению и выдаче комбикормов. Верхний уровень представляет собой сложную интегрированную систему управления производством и решает задачи оперативного контроля выполнения производственных заданий, связи с внешними системами, включая обращения к экспертным системам для получения специально рассчитанных рецептов комбикормов и белково-витаминных добавок. В состав верхнего уровня входят персональный компьютер руководителя производства, оборудование лаборатории текущего контроля за сохранностью сырья и качеством готовой продукции, а также станция для текущего планирования и расчета оперативных рецептов для производства. Ядром

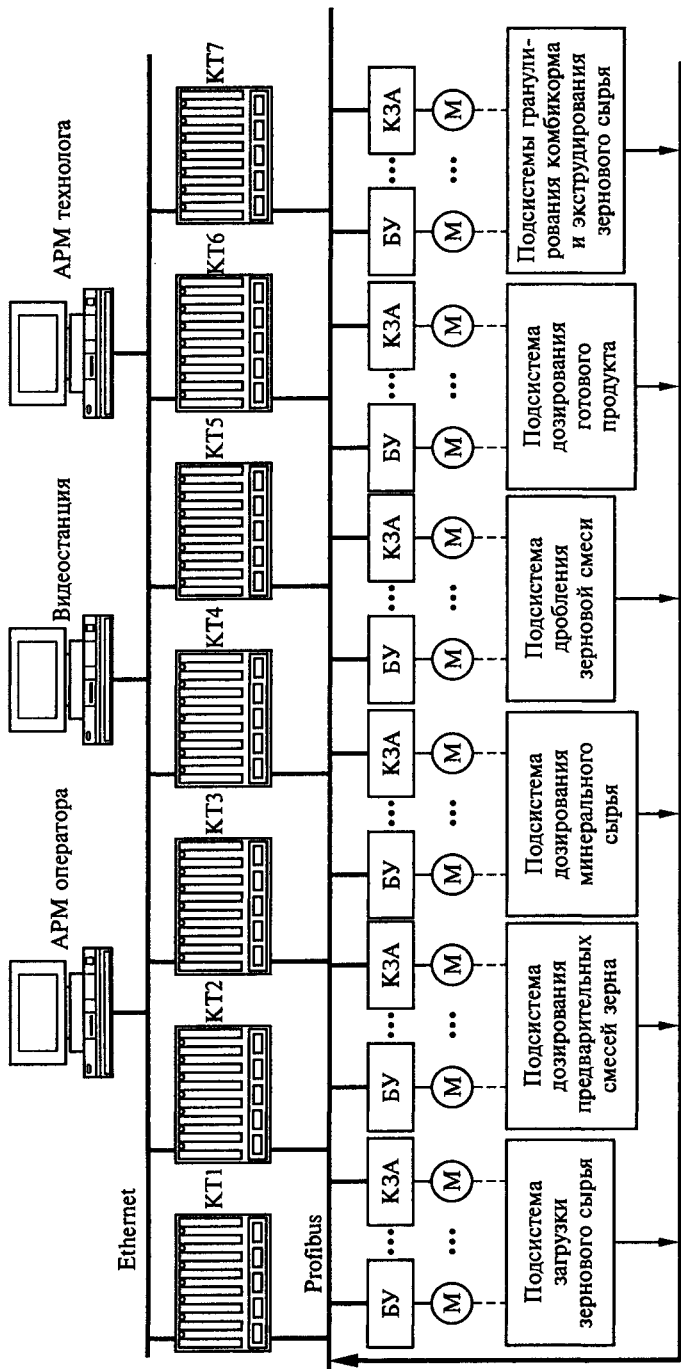


Рис. 5.6

верхнего уровня системы управления является автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора автоматизированной СУ комбикормового цеха.

Операторская станция состоит из двух независимых технологических подсистем — АРМ технолога цеха и станции оперативного управления производством.

Нижний уровень управления включает в себя технологические микроконтроллеры, которые управляют механизмами технологических участков цеха комбикорма — задвижками, нориями, шнеками, транспортерами, поворотными кругами, дозаторами, дробилками, грануляторами, экструдерами и т. п. Так, технологический микроконтроллер КТ1 управляет подсистемой загрузки зернового сырья (опрокидыватель железнодорожного вагона, транспортеры, задвижки, приводы аспирационной системы); технологический микроконтроллер КТ2 — подсистемой дозирования предварительных смесей зерна (транспортеры, конвейеры, задвижки, поворотные круги, приводы аспирационной системы, электропневматические клапаны); технологический микроконтроллер КТ3 — подсистемой дозирования минерального сырья (транспортеры, конвейеры, задвижки, приводы аспирационной системы, электропневматические клапаны, поворотные круги); технологический микроконтроллер КТ4 — подсистемой дробления зерновой смеси (приводы дробилок, задвижки, конвейер); технологический микроконтроллер КТ5 — подсистемой дозирования готового продукта (транспортеры, конвейеры, задвижки, поворотные круги, приводы аспирационной системы); технологический микроконтроллер КТ6 — подсистемой гранулирования комбикорма (конвейеры, задвижки, приводы аспирационной системы); технологический микроконтроллер КТ7 — подсистемой экструдирования зернового сырья (приводы экструдеров, вентилятор, вертикальный транспортер, задвижки).

Аппаратура нижнего уровня выполнена в виде управляющих панелей, на которых в пыле- и влагонепроницаемых кожухах размещены модули MicroPC производства фирмы «Octagon Systems». Используются следующие модули: центрального процессора — 5025A, 6012; дискретного ввода и вывода — 5700, 5710; аналого-дискретного ввода и вывода — 5648; восьмиканальный аналогового вывода — 5750; адаптер сети Ethernet — 5500; видеокарта — 5420; четырехканальный последовательной связи — 5554 и др.

Функции системы управления определяются задачами технологического процесса и включают в себя: централизованный контроль за ходом технологического процесса, состоянием оборудования, машин и механизмов; программно-логическое управление; регулирование; логическое управление аппаратами защиты; аварийное отключение оборудования цеха; непосредственное (прямое) цифровое управление; контроль и измерение технологиче-

ских параметров; косвенное измерение и вычисление технологических параметров; контроль за состоянием оборудования; планирование технологической подготовки производства; формирование статистической и отчетной информации.

Главная панель управления предоставляет оперативному персоналу обобщенную информацию о состоянии всех технологических процессов цеха комбикорма и основных элементов системы управления. На главной панели размещен ряд блоков управления по числу технологических подсистем, включая энергетическое оборудование цеха комбикорма. Главная панель управления состоит из следующих элементов: информационная верхняя строка, содержащая идентификационные параметры видеокadra и индикаторы состояния корпоративной сети связи, системы электропитания и индикатор предупредительной и аварийной сигнализации; восемь блоков обобщенных панелей управления — элементов вызова технологических подсистем; управляющая строка, на которой расположены «горячие» кнопки прямого перехода в требуемый кадр: «Конфигурация АСУ», «Журнал бункеров», «Ввод рецепта», «Технологическая карта 1186», «Рапорт»; элемент коректного выключения системы «Stop».

Программное обеспечение станций среднего и нижнего уровня написано на языке Borland Pascal 7.0 с применением ассемблерных вставок для секций программ, критичных ко времени выполнения.

## **5.4. Автоматизированные технологические комплексы добывающих производств**

### **5.4.1. Характеристика технологических комплексов**

Технологические комплексы подземной разработки полезных ископаемых разделяются на очистные и проходческие комплексы. Очистные комплексы включают в себя систему технологически, кинематически и конструктивно связанных между собой машин и механизмов, производящих следующие операции: выемку и доставку угля; передвижку забойного конвейера в бессточном призабойном пространстве; зачистку забоя; крепление и управление горным давлением в забое, а также в местах сопряжения лавы с прилегающими к ней подготовительными выработками; укладку гибкого кабеля и шлангов орошения. Очистной комплекс состоит из оборудования, смонтированного в очистном забое и размещенного в прилегающих к лаве выработках.

В лаве размещаются: угольный комбайн; цельнопередвижной или изгибающийся скребковый конвейер с погрузочно-зачистными лемехами и кабелеукладчиком; механизированная передвижная

крепь. В прилегающей к лаве выработке (штрек и т. п.) размещаются: передвижная механизированная крепь сопряжения; скребковый перегружатель, передающий уголь с забойного на установленный по штреку ленточный конвейер; энергопоезд — состав, состоящий из тележек на колесном ходу. Энергопоезд обеспечивает комплекс электроэнергией, подачу рабочей жидкости для гидросистем и орошающей жидкости к исполнительным органам комбайна и местам погрузки для пылеподавления. На тележках размещаются станции управления, насосные станции, пульта управления и другое оборудование.

Управление машинами и оборудованием очистного комплекса в процессе работы производится с пультов управления машиниста комбайна и оператора. Пульт оператора размещается в штреке.

Проходческие комплексы обеспечивают проведение подготовительных работ, в процессе которых образуется новая линия очистных забоев — технологической зоны для работы очистных комплексов. Проходческие комплексы классифицируются по следующим основным признакам: виду комбайна (проходческий, нарезной); типу проходческого комбайна (избирательного или бурового действия); углу наклона выработок (горизонтальные, с углами наклона до  $10^\circ$ , от  $11$  до  $20^\circ$ , от  $21$  до  $35^\circ$ ); форме выработки (круглая, арочная и др.); сечению выработки (однопутная, двухпутная); назначению выработки (нарезная по углю и сланцам, подготовительная по углю и смешанному забою и др.).

Основой проходческих комплексов является проходческий комбайн, обеспечивающий проведение горных выработок, погрузку разрушенной горной массы на конвейер комбайна, с него на перегружатель, установленный за комбайном, и далее в общешахтные транспортные средства. Применяются проходческие комбайны избирательного разрушения породы со стреловидным исполнительным органом в виде фрезерной головки, обрабатывающей заходками всю площадь забоя. Комбайны имеют гусеничный механизм перемещения, погрузочный орган в виде нагребавших спаренных лап, расположенных на подъемно-поворотном столе, скребковый конвейер, перегружатель и другое оборудование.

Проходческий комплекс выполняет все технологические операции проходческого цикла: разрушение горного массива, погрузку и транспортирование разрушенной горной массы, возведение крепи. Мощность электрооборудования комплексов достигает 1 МВт. Мощность электродвигателей исполнительных органов доходит до 640 кВт.

Технологические комплексы надземной разработки полезных ископаемых в зависимости от технологии работы включают в себя разнообразные машины. Основой комплексов являются экскаваторы, технологически объединяемые с транспортным оборудова-

нием — конвейерами, железнодорожным и автомобильным транспортом. При проведении буровзрывных работ в технологии выработки применяют экскаваторы типа «прямая лопата» и драглайны, при проведении непрерывных выработок применяют роторные экскаваторы. Ниже приводится пример АТК на базе роторного экскаватора (см. п. 5.4.2).

К добывающим производствам относят также первичную обработку горных пород в виде их обогащения и получения полуфабриката, являющегося сырьем для других производств. Ниже приведены примеры АТК обогатительной фабрики (см. п. 5.4.3) и дробильного производства (см. п. 5.4.4).

#### **5.4.2. Автоматизированный комплекс открытой разработки на базе роторного экскаватора**

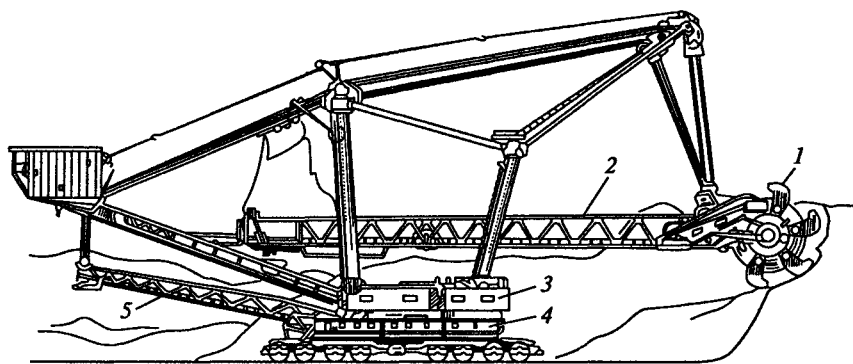
В технологический комплекс разработки полезных ископаемых открытым способом входят: роторный экскаватор, работающий в забое; конвейерная линия; главный загрузочный бункер; железнодорожный транспорт [21].

Общий вид роторного экскаватора приведен на рис. 5.7, а. Разработка грунта и полезных ископаемых производится посредством ковшей 1, установленных на роторном колесе. Роторная стрела 2 экскаватора может быть поднята тросами, задний конец ее при этом перемещается на подвижной тележке. Стрела может поворачиваться вместе с поворотной платформой 3 относительно неподвижной базы 4. В процессе работы стрела устанавливается на определенной высоте и совершает маятниковое движение относительно вертикальной оси. Ковши вращающегося ротора при повороте стрелы выполняют разработку забоя. Перемещение породы, угля или руды обеспечивается в роторных экскаваторах ленточным транспортером вдоль стрелы, а далее отвальным транспортером 5 на поворотной платформе. С последнего транспортера перемещаемый материал грузится на железнодорожные платформы или дополнительно установленные транспортеры.

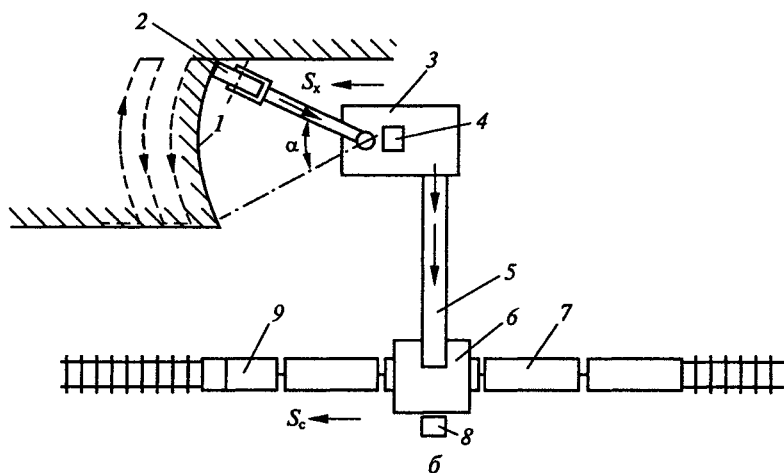
Основными электроприводами роторных экскаваторов являются приводы рабочего колеса, подъема стрелы, поворота платформы, хода и конвейеров. Управление ими осуществляется дистанционно из главной кабины или кабин погрузки. Роторные экскаваторы имеют ряд преимуществ по сравнению с драглайнами и экскаваторами типа «лопата» вследствие непрерывности рабочего цикла. Производительность этих машин от сотен до нескольких тысяч кубических метров в 1 ч.

Схема технологического комплекса показана на рис. 5.7, б, где 1 — забой; 2 — рабочее колесо; 3 — роторный экскаватор; 4 — пульт машиниста экскаватора; 5 — конвейерная линия; 6 — загрузочный бункер; 7 — железнодорожный состав; 8 — пульт оператора

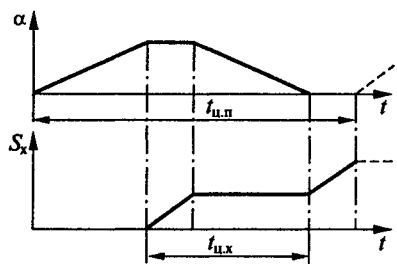




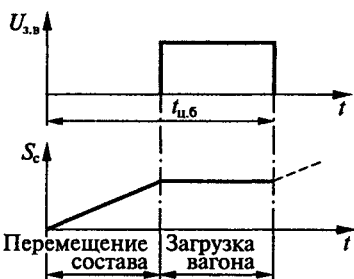
a



b



v



z

Рис. 5.7

ра; 9 — локомотив. Рабочее движение роторного экскаватора и транспортирование выработанной породы или полезного ископаемого обеспечивают следующие механизмы: многоковшовое роторное колесо, осуществляющее разработку грунта; механизм подъема стрелы с роторным колесом; поворотное устройство, позволяющее в процессе разработки грунта поворачивать стрелу с роторным колесом; механизм хода, перемещающий экскаватор вдоль забоя; транспортирующее устройство — система ленточных конвейеров, доставляющих породу от роторного колеса к главному конвейеру или в отвал. Механизмы подъема, поворота и хода относятся к механизмам циклического действия, а роторное колесо и транспортирующее устройство — к механизмам непрерывного действия.

Общий технологический цикл комплекса состоит из загрузки железнодорожного состава, его отправки и подачи нового порожнего состава. Общий цикл включает в себя внутренние циклы отдельных механизмов комплекса: поворота и хода экскаватора, открывания и закрывания бункера, дозированного перемещения состава в процессе его загрузки. Циклограммы механизмов циклического действия данного комплекса приведены на рис. 5.7, в. Механизмы поворота и хода экскаватора работают поочередно. После каждой отработки заданного угла в забое  $\alpha$  включается привод хода, который перемещает роторное колесо на заданную подачу  $S_x$ . В результате обеспечивается непрерывная разработка породы в забое.

Управление работой экскаватора осуществляется с пульта машиниста. Порода от роторного колеса через систему ленточных конвейеров подается в загрузочный бункер. На интервале времени смены вагона бункер должен быть закрыт. Закрывание и открывание бункера выполняет оператор с пульта управления, который расположен в непосредственной близости от места загрузки вагона.

Закрытому состоянию бункера соответствует нулевое значение управляющего напряжения  $U_{з.в}$  (рис. 5.7, г). На этом интервале времени состав перемещается на расстояние  $S_c$ , равное длине одного вагона. Вместимость загрузочного бункера должна быть рассчитана на прием непрерывно поступающей породы на интервале времени смены вагона.

Большая протяженность состава затрудняет машинисту локомотива выполнение маневрирования для дозированного перемещения состава в процессе его загрузки. Поэтому такая операция возлагается на оператора, пульт которого расположен непосредственно у места загрузки вагона. Автоматизация процесса загрузки состава предусматривает переключение управления локомотивом на пульт оператора. При этом машинист локомотива не участвует в перемещении состава в процессе его загрузки, однако при не-

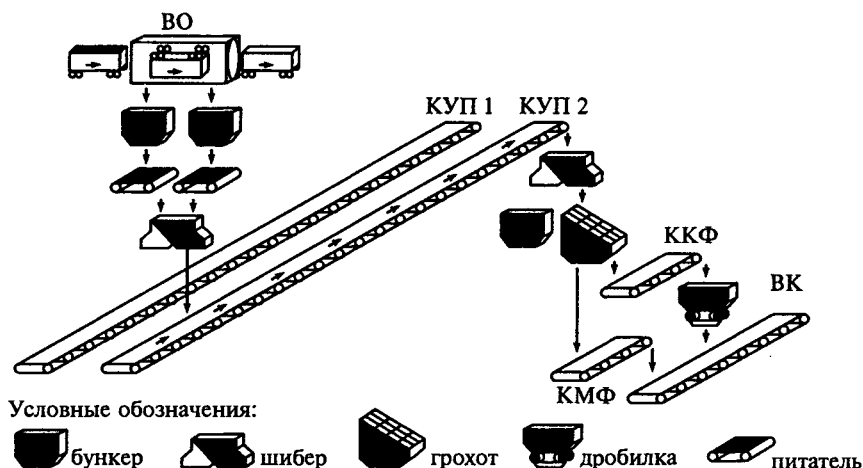
обходимости может принять участие в управлении для обеспечения безопасности маневрирования.

После загрузки всего состава управление локомотивом вновь осуществляет машинист. Если отсутствует новый состав, готовый под погрузку, то СУ выдает команду на остановку экскаватора.

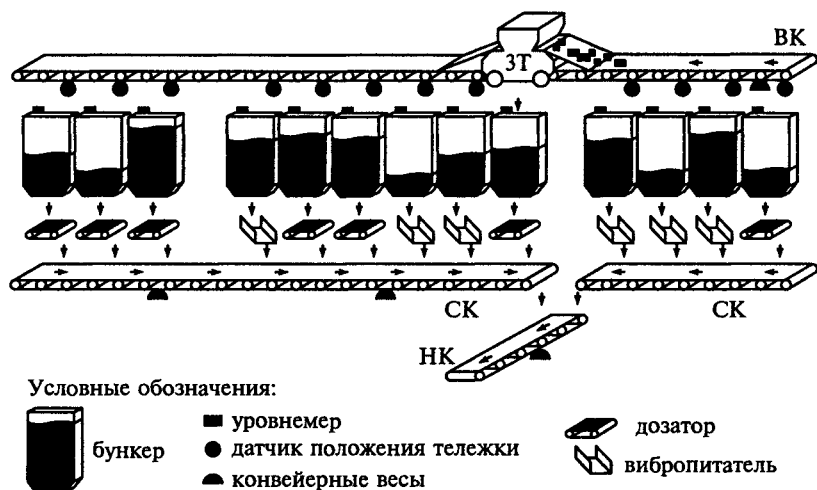
### **5.4.3. Автоматизированный комплекс углеприема обогатительной фабрики**

Цех углеприема — это комплекс, состоящий из участков и собственно цеха аккумулирующих бункеров, который предназначен для приема угля из железнодорожных вагонов с целью последующей равномерной его подачи по системе конвейеров в основные цехи фабрики. Главными технологическими объектами цеха являются аккумулирующие бункеры. В них накапливается уголь, имеющий определенный качественный состав, соответствующий различным маркам (Ж, ГЖ, Г, ОС и К). В цехе имеются 52 бункера, расположенных в четыре ряда, по 13 бункеров в каждом, разделенных на две поточно-транспортные технологические секции. В секцию входят два соседних ряда бункеров; каждый ряд имеет свой сборочный конвейер (рис. 5.8, а). На два ряда бункеров приходится один входной загрузочный конвейер секции. Со сборочных конвейеров подготовленная шихта из угля различных марок поступает на выходные конвейеры, которые транспортируют ее в основной технологический цех непосредственно для производства концентрата. Два основных технологических процесса — процесс загрузки и процесс выгрузки угля из бункеров — протекают независимо друг от друга. Первый заключается в приеме угля из накопительных питателей вагоноопрокидывателя с помощью входных конвейеров, разделении угля на крупную и мелкую фракции на сите грохотов, размельчении крупной фракции с помощью дробилок и загрузке угля в бункеры с помощью загрузочной тележки с учетом марочного состава.

На рис. 5.8, а показана одна из двух нитей поточно-транспортной системы (ПТС) от вагоноопрокидывателя ВО до входного конвейера ВК цеха аккумулирующих бункеров. Процесс выгрузки угля из бункеров происходит с помощью управляемых электромеханических вибрационных питателей (вибропитателей) и ленточных питателей, оснащенных электроприводами и обеспечивающих дозированную подачу угольной шихты на выходные конвейеры цеха (ККФ — конвейер крупной фракции, КУП — конвейер углеподготовки, КМФ — конвейер мелкой фракции). Фрагмент технологической схемы для одного ряда бункеров (одной технологической нити) показан на рис. 5.8, б (ЗТ — загрузочная тележка, СК — сборочный конвейер, НК — выходной конвейер).



а



б

Рис. 5.8

В цехе углеприема основными средствами автоматизации являются: электроприводы переменного тока (асинхронные двигатели мощностью 15 кВт фирмы АBB); радиоволновые урвнеммеры БАРС-302 отечественного производства; контроллеры, выполненные на базе процессорных плат фирмы «Octagon Systems»; устройства связи с оборудованием (УСО) фирмы «Grayhill»; универсальная плата каналов ввода-вывода UN 1096-5 фирмы «Fastwel».

Нижний уровень системы управления образуют контроллеры с процессорными платами 5025А и 5066 фирмы «Octagon Systems»,

которые установлены в герметичных шкафах и смонтированы непосредственно в распределительных помещениях (РП) вблизи коммутационной аппаратуры.

В соответствии с функциональной нагрузкой контроллеры разделяются на две группы:

процессом загрузки управляют четыре контроллера. Первый и второй управляют работой загрузочных тележек и конвейеров подачи угля от участка углеподготовки, третий и четвертый — работой оборудования участка углеподготовки, к которому относятся входные конвейеры подачи угля от вагоноопрокидывателей, а также механизмы питателей, грохотов и дробилок;

процессом выгрузки управляют два контроллера. Выгрузка производится с помощью ленточных питателей, оснащенных современными электроприводами. Для управления вибропитателем используется один цифровой 70G-OAC5A и один аналоговый 73G-OV10 модули. Ленточные питатели управляются по последовательной магистрали ModBus, которой управляет модуль 5554.

После получения задания с верхнего уровня контроллеры нижнего уровня работают полностью автономно с использованием системного таймера. На рис. 5.9 показана одна из функциональных схем подключения оборудования для управления основными технологическими процессами загрузки и выгрузки (дозирования) угля из бункеров (ПМЕ — электромагнитный пускатель на напряжение 220 В, ККФ, КМФ — конвейеры крупной и мелкой фракций соответственно).

Структурная схема управления процессами на участках углеподготовки и вагоноопрокидывателя показывает способ подключения основного оборудования к контроллеру первой технологической секции (оборудование второй секции подключается к своему контроллеру аналогично). Контроллер обеспечивает включение цепи механизмов ПТС, основным в которой является конвейер (см. рис. 5.8, а) длиной более 100 м. Для того чтобы привести в движение конвейер такой длины с углем, используют двигатель мощностью 500 кВт, который имеет высоковольтную старторную обмотку, рассчитанную на напряжение 6000 В. Поскольку конвейер расположен в наклонной галерее, то при его пуске и останове существует опасность обратного хода. Для исключения таких случаев на валу двигателя установлена электромагнитная тормозная система, а на выходном валу редуктора — храповый механизм. Эти и остальные механизмы (питатели, шиберы, грохот и др.) включаются через электромагнитные пускатели. Блок-контакты всех пускателей «опрашиваются» через модули 70G-IAC5A для контроля нормального пуска. Кроме этих сигналов, контроллер считывает множество других электрических сигналов: от концевых выключателей схода ленты; контроля напряжения цепей управления; от местных кнопок «Пуск» и «Стоп» в

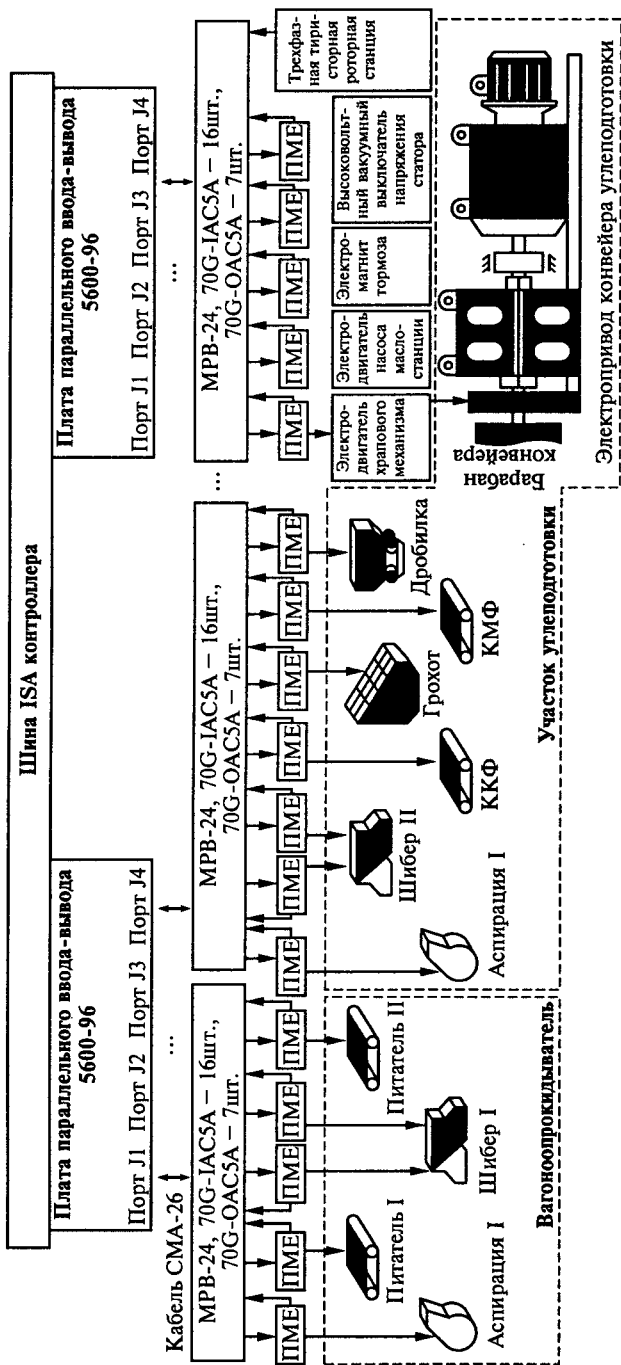


Рис. 5.9

каждой позиции; от контактов реле скорости конвейерных лент и т. д.

Контроль уровня в бункерах осуществляют радиоволновые уровнемеры (РУ), установленные над каждым из бункеров. По показаниям уровнемеров работают, в частности, системы дозирования, измерения веса и учета остатков угля в бункерах. Сигналы с выходов РУ через оптронные развязки двух стандартных адаптеров ТВІ-24 подаются на четыре многоканальных частотомера универсального модуля UN 1096. В бункере находятся 26 датчиков уровня, поэтому на каждый частотомер приходится по шесть или семь каналов. Полученный таким образом матричный способ подключения РУ (с размером матрицы  $4 \times 7$ ) позволяет максимально увеличить число измерений в единицу времени, так как четыре частотомера запускаются одновременно.

Верхний уровень управления обеспечивает: управление оборудованием цеха, которое входит в состав системы дозирования; включение оборудования дополнительных подсистем, расположенных на участках углеподготовки и вагоноопрокидывателя; выбор оператором маршрута движения загрузочной тележки в соответствии с марками угля, которые закреплены за бункерами; фиксацию последовательности нагрузки (производительности конвейеров) по маркам; определение шахтового состава остатков угля в бункерах; слежение за работой радиоволновых уровнемеров; отображение принципиальных схем электрооборудования всех позиций (с анимацией); формирование событийного экрана.

Интерфейс оператора написан на языке Borland C++ 5.02 и работает в операционной системе Windows 95/98.

Связь ПК верхнего уровня с контроллерами нижнего уровня осуществляется с помощью локальной сети ArcNet по протоколу IPX.

Для подключения наиболее удаленных сегментов в состав сети входят три концентратора. Наибольшая длина сегмента сети не превышает 500 м; к этому сегменту сети подключаются контроллеры участка углеподготовки, расположенные в отдельном помещении.

В состав системы управления входит подсистема диагностирования сигналов. Данная подсистема позволяет определять в каждый момент времени причины останова или неготовности отдельных позиций оборудования к включению. Подсистема обеспечивает архивирование событий в штатном и аварийном режимах с одновременным отображением записей на экране событий.

#### **5.4.4. Автоматизированный комплекс камнедробления**

Дробильные комплексы, содержащие в различных вариантах сочетания дробилок, грохотов, транспортеров и бункеров, применяются в рудообогатительных, литейных производствах, про-

изготовлении строительных материалов. Вопросы электросбережения в таких комплексах актуальны не только с точки зрения снижения себестоимости процесса дробления, но зачастую и вследствие ограничений мощности автономных источников питания.

На рис. 5.10 приведена схема одного из вариантов дробильно-го комплекса, где на первой стадии дробления используется конусная дробилка 1 (мощность ее электропривода 107,5 кВт); на второй стадии — роторная дробилка 3 (мощность 132 кВт).

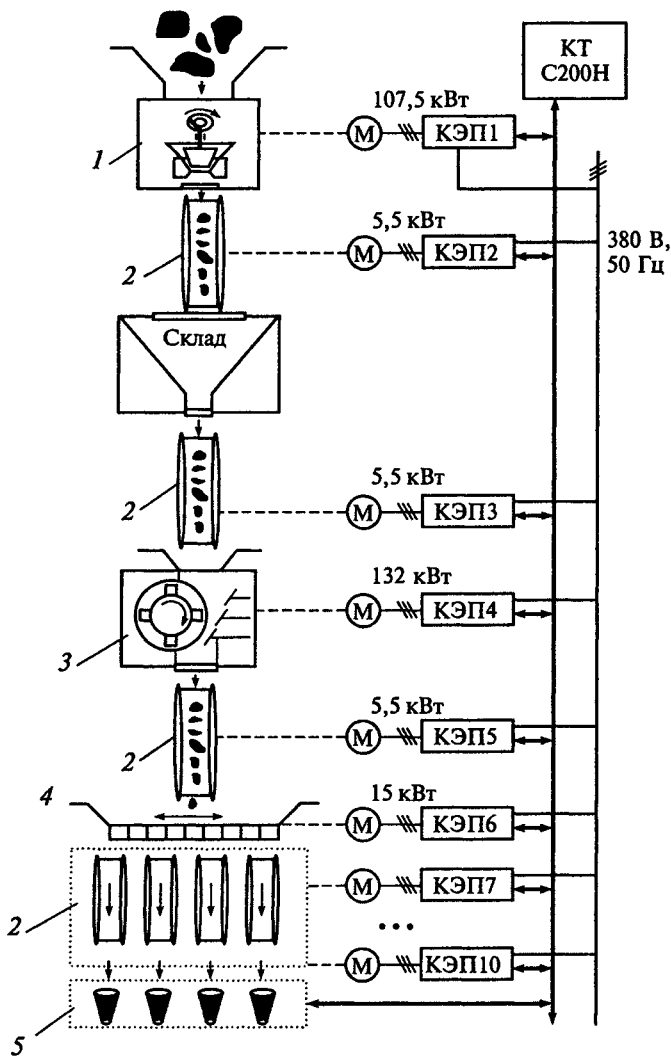


Рис. 5.10



К вспомогательному оборудованию относятся: семь питателей (конвейеров 2) мощностью 5,5 кВт; грохот 4, мощность которого 15 кВт; четыре бункера 5; склад готового продукта после первого этапа дробления. Общая мощность электроприводов дробильного комплекса 293 кВт.

Все электроприводы камнедробильного комплекса выполнены на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. В систему управления входят датчики, которые контролируют: массу на входе конусной дробилки, наличие металлических предметов в общей массе вещества, скорости конвейеров, массу дробимого материала на выходе комплекса. Применяются датчики уровня, вибраций корпуса установки, температуры опор, переполнения входного бункера.

Общее управление камнедробильным комплексом осуществляется программируемым контроллером С200Н фирмы «Omron». Контроллер обеспечивает: координацию работы оборудования комплекса, управление работой отдельных агрегатов, реализацию режима технического диагностирования всего комплекса и отдельных агрегатов, отображение процесса дробления. В состав контроллера входят: NT-терминал, пульт управления, четыре аналоговых модуля ввода и вывода на восемь входов и восемь выходов, два температурных модуля (для контроля температуры подшипников). Количество модулей обусловлено количеством датчиков, контролирующих различные технологические и технические параметры. В состав контроллера также входит флэш-карта, на которой записаны основные предустановочные параметры для процесса дробления. Объем памяти флэш-карты 8 Мбайт. Вся информация о процессе дробления отображается на NT-терминале.

Процесс дробления заключается в следующем. Камни размером 60...90 см поступают на вход конусной дробилки и дробятся. Далее они по конвейеру поступают на склад. Со склада по конвейерам (питателям) камни следуют на второй этап переработки в роторную дробилку (дробятся до размера 0...200 мм). Раздробленный материал по конвейеру направляется в грохот, где сортируется на четыре группы (по размерам). По конвейерам 2 продукты окончательного дробления поступают в соответствующие бункера 5, первый из которых предназначен для материала размером 0...3 мм, второй — 3...8 мм, третий — 8...15 мм, четвертый — 15...25 мм.

Центральное место в дробильных комплексах занимают дробильные агрегаты, различающиеся между собой способом разрушения исходного вещества. В соответствии с технологией им режимно подчинены питатели (транспортеры) и грохоты.

Кроме управления основным (дробильные агрегаты) и вспомогательным (питатели, грохоты) оборудованием, контроллер решает задачу оптимизации процесса дробления.

## 5.5. Автоматизированные технологические комплексы металлургического производства

### 5.5.1. Характеристика технологических комплексов

Одним из основных технологических процессов в металлургической промышленности является прокатное производство, связанное с обработкой металла давлением. В этом производстве наиболее широко используются системы автоматизированного электропривода.

Прокатные цехи играют главную роль при завершении технологической обработки металла в металлургической отрасли. В состав прокатного цеха входят: прокатный стан, механизмы для подготовки металла к прокатке, обработки готовой продукции, различные вспомогательные службы.

Прокатный стан — комплекс, состоящий из большого количества механизмов, объединенных одной технологической линией. В прокатном стане имеются главные механизмы — рабочие валки прокатной клетки и вспомогательные механизмы, обеспечивающие непрерывность технологического процесса.

Главные механизмы, предназначенные для обработки металла в одной или нескольких клетях прокатного стана, обеспечивают обжатие металла и придают ему требуемое сечение и форму готовой продукции.

Вспомогательные механизмы предназначены для перемещения рабочих валков, транспортирования и резания металла и других операций, обеспечивающих определенную последовательность технологического процесса прокатки.

Прокатные станы классифицируют по назначению, числу и расположению клетей, числу и расположению валков, режиму работы клетей [48].

По назначению прокатные станы (рис. 5.11)<sup>1</sup> разделяют на обжимные станы для производства полупродукта прямоугольного и квадратного сечения (блюминги, слябинги) и заготовочные станы (сортовые, предназначенные для производства сортового металла, балок, полос и т.д.; балочные, средне- и мелкосортные, проволочные и штрипсовые; толсто- и тонколистовые горячей прокатки, предназначенные для получения листовой стали; листовые станы холодной прокатки, предназначенные для производства тонкого и сверхтонкого листа с высоким качеством поверхности; трубопрокатные; специальные, предназначенные для прокатки сложных профилей, круглых и коротких тел вращения, профилей с винтовой поверхностью и др.).

<sup>1</sup> Условные обозначения под прямоугольниками на рис. 5.11 соответствуют виду (профилю) получаемого проката.

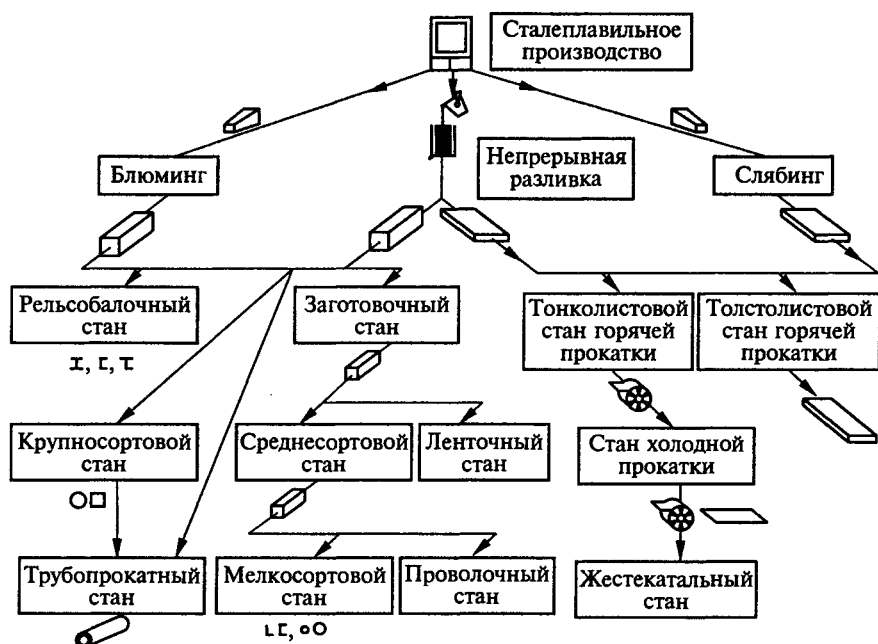


Рис. 5.11

По числу рабочих клеток прокатные станы подразделяют на одно- и многоклетьевые.

Одноклетьевые станы (рис. 5.12, а) могут быть обжимными, реверсивными толстолистовыми станами горячей прокатки и реверсивными станами холодной прокатки, направление прокатки в которых меняется, а также трубными прошивными станами, направление прокатки в которых не меняется. Многоклетьевые станы применяют для прокатки заготовок, сортового и листового металла, труб и т.д.

По расположению рабочих клеток станы подразделяют на последовательные, линейные, непрерывные, полунепрерывные, зигзагообразные и шахматные.

Последовательные станы состоят из нескольких клеток, расположенных последовательно (рис. 5.12, б), а прокатка металла в каждой из клеток происходит отдельно. Каждая клетка имеет двигатель для вращения рабочих валков. Линейные станы состоят из нескольких клеток, валки которых вращаются от одного электродвигателя (рис. 5.12, в). Направление прокатки в линейно расположенных клетях меняется. Непрерывные станы (рис. 5.12, г) состоят из группы клеток, расположенных последовательно, имеющих в своем составе ряд клеток, в которых прокатываемый металл находится одновременно в двух или нескольких клетях и направление прокатки не изменяется.

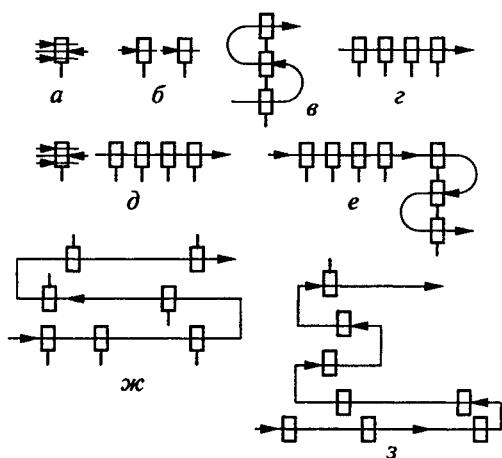


Рис. 5.12

Полунеprерывные станы имеют в своем составе непрерывную группу клетей и реверсивную клеть (рис. 5.12, д) или линейную группу (рис. 5.12, е). Прокатываемый металл меняет направление прокатки.

Зигзагообразные и шахматные станы (рис. 5.12, ж и з) служат для более компактного расположения клетей в цехе. Длина прокатываемого металла обычно меньше расстояния между клетями.

В табл. 5.2 приведены сводные данные для различных станов по наиболее характерным классификационным признакам прокатного производства.

Кроме основной операции — прокатки металла — на прокатном стане производится ряд вспомогательных операций: перемещение металла в продольном и поперечном направлениях относительно линии стана, подача металла к валкам, кантовка и резание металла, регулировка положения прокатных валков и т.д. Эти операции осуществляются с помощью различных механизмов стана, называемых вспомогательными.

По назначению вспомогательные механизмы прокатных станов разделяются на ряд групп: транспортные механизмы — механизмы перемещения и изменения положения металла (слитковозы, рольганги, манипуляторы, кантователи, поворотные и подъемно-качающиеся столы, шлепперы, упоры, толкатели и т.д.); установочные механизмы (нажимные устройства для установки верхнего валка, реже верхнего и нижнего валков одновременно, устройства перевалки валков, перемещения клетей и т.д.); механизмы резания металла (ножницы поперечного и продольного резания, пилы и т.д.); механизмы для сматывания и разматывания металла (моталки, разматыватели).

В зависимости от режима работы различают: вспомогательные механизмы с режимом продолжительной нагрузки S1 (некоторые рольганги, дисковые ножницы, правильные механизмы); механизмы с режимом кратковременной нагрузки S2 (нажимные устройства сортовых и листовых непрерывных станов, механизмы перевалки валков, некоторые толкатели и упоры); механизмы с режимом повторно-кратковременной нагрузки S3 (приемные и рабочие рольганги, манипуляторы, кантователи, нажимные устройства, ножницы обжимных станов и т. д.).

Различают вспомогательные механизмы без регулирования скорости (приемные, подводящие, отводящие и некоторые транспортные рольганги, кантователи, пилы, толкатели, упоры и т. д.) и механизмы с регулированием скорости (слитковозы, рабочие и некоторые транспортные рольганги, нажимные устройства, манипуляторы, кантователи, ножницы и т. д.).

Для привода механизмов, работающих в режиме продолжительной нагрузки, применяют наиболее дешевые и удобные в эксплуатации асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором. Механизмы, работающие в режимах длительной или повторно-кратковременной нагрузки и требующие регулирования скорости, приводятся от АД или двигателей постоянного тока (ДПТ). Однако в случае, когда производится согласованное регулирование скорости ряда двигателей, например двигателей индивидуального привода роликов транспортного рольганга, применяют короткозамкнутые двигатели с питанием от общего преобразователя частоты. Для механизмов, работающих в режиме повторно-кратковременной нагрузки и не требующих регулирования скорости, выбор типа двигателя определяется числом включений в 1 ч привода механизма. При числе включений не более 150... 200 в 1 ч применяются короткозамкнутые АД, при числе включений 500... 700 в 1 ч используются АД с фазным ротором, а при числе включений до 1000... 1200 в 1 ч применяют ДПТ.

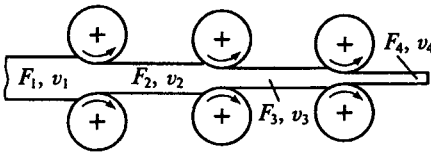
**Непрерывные станы горячей прокатки.** Наиболее прогрессивной формой прокатки с точки зрения увеличения производительности стана и получения высокого качества проката является непрерывная прокатка металла, при которой прокатываемая заготовка одновременно находится в двух или более клетях, образуя непрерывную группу клетей (см. рис. 5.12, з). Наличие непрерывной группы, входящей в состав полунепрерывных и непрерывных станов различного назначения и состоящей из большого количества клетей, позволяет вести прокатку в одном направлении, когда в каждой из клетей заготовка обжимается только один раз.

Основными особенностями непрерывного процесса являются одновременное нахождение металла в нескольких клетях и ударное приложение нагрузки, связанное с захватом металла валками на полной рабочей скорости. В современных быстроходных широ-

Станы	Размеры рабочих валков		Количество клетей	Типы по расположению клетей
	Диаметр, мм	Длина, мм		
Обжимные: блюминг	800... 1500	2000... 3000	1 ... 2	Одноклетьевые, последователь- ные Одноклетьевые
слябинг	1100... 1150	2000... 3000	1	
Заготовочные	450... 900	—	До 10 ... 14	Линейные, непрерывные, полунепрерыв- ные
Сортовые: рельсобалоч- ные	750... 900	—	3...8	Последова- тельные
крупносорто- вые	600... 800	—	До 8	Зигзагообраз- ные, линейные
среднесорто- вые	350... 550	—	До 18	Полунепрерыв- ные
мелкосорто- вые	250... 350	—	До 27	Полунепрерыв- ные, непрерывные
проволочные	250... 350	—	20 ... 42	Непрерывные
Листовые горя- чей прокатки: толстолисто- вые	—	2000... 5500	1...6	Последователь- ные, непрерывные
тонколисто- вые	500... 1000	800... 3600	1...14	Полунепрерыв- ные, непрерывные
Листовые хо- лодной прокатки: реверсивные	2... 150	—	1	Одноклетьевые
непрерывные	—	До 2200	2...6	Непрерывные

Таблица 5.2

Скорость прокатки, м/с	Масса исходной заготовки, т	Готовая продукция	Тип привода
4...6	До 15	Квадратная и близкая к ней заготовка (блюм) размером 400 × 400... 350 × 350 мм	Реверсивный
4...6	До 45	Прямоугольная заготовка (сляб) размером (250... 300) × (2000... 2200) мм	»
3...7	6...11	Заготовки квадратного сечения 50 × 50... 240 × 240 мм и прямоугольного сечения (50... 100) × (50... 400) мм	Реверсивный или нереверсивный
До 9	До 20	Рельсы, балки высотой 150... 750 мм	Нереверсивный
До 10	4... 20	Квадратные и круглые заготовки размером до 200 мм; уголки 8... 16	»
8... 15	—	То же, до 80 мм; уголки 4... 12	»
15... 20	—	То же, до 40 мм; уголки до 6	»
20... 50	—	Круглый профиль размерами до 29; 5... 12 мм	»
4...5	20... 30	Лист толщиной 4... 50 мм	Реверсивный или нереверсивный
10... 18	1,5... 27	Лист толщиной 1,5... 13, шириной 500... 2500 мм	То же
—	—	Лист толщиной 0,0015... 1 мм	Реверсивный
До 37	60	То же, 0,15... 2 мм	Реверсивный или нереверсивный



копалосных станах захват происходит на промежуточной скорости 10...12 м/с и затем металл разгоняют до скорости 18...21 м/с.

Основным условием непрерывной прокатки является постоянство секундного объема металла по клетям (рис. 5.13) в установившихся и переходных процессах, т.е.  $F_1 v_1 = F_2 v_2 = \dots = F_n v_n = \text{const}$ , где  $F_1, \dots, F_n$  и  $v_1, \dots, v_n$  — соответственно сечение металла и линейная скорость движения металла перед входом в соответствующую клеть (см. п. 4.8.1).

В зависимости от соотношения угловых скоростей валков смежных клетей возможны три режима прокатки: свободная прокатка, когда  $v_2/v_1 = \lambda$  или  $\omega_2/\omega_1 = \lambda(1 + S_1)/(1 + S_2)$ ; прокатка с натяжением металла, когда  $v_2/v_1 > \lambda$  или  $\omega_2/\omega_1 > \lambda(1 + S_1)/(1 + S_2)$ ; прокатка со сжатием металла (для тонких профилей с образованием петли), когда  $v_2/v_1 < \lambda$  или  $\omega_2/\omega_1 < \lambda(1 + S_1)/(1 + S_2)$ , где  $\lambda = F_1/F_2$  — коэффициент вытяжки;  $S_1$  и  $S_2$  — опережение металла;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — угловые скорости валков.

Наиболее предпочтительной является свободная прокатка, обеспечивающая наилучшее заполнение калибра металлом и образующая точный требуемый профиль проката. Однако такой вид прокатки неустойчив, и его трудно длительно поддерживать.

Прокатка с натяжением приводит к вытяжке металла, поэтому необходимо иметь по возможности минимальное и постоянное значение натяжения для получения минимальной разницы толщины металла по длине.

Прокатка со сжатием (подпором) характерна для толстых заготовок в заготовочных, крупносортовых станах, черновых группах мелкосортовых станов. При этом режиме прокатки в случае сильного сжатия может произойти поломка валков.

Прокатка с петлей характерна для мелкосортовых и проволочных станов, обеспечивает хорошее заполнение калибров в клетях. При большой длине заготовки петля может оказаться чрезмерно большой, поэтому существуют специальные регуляторы.

Основное условие непрерывной прокатки — поддержание постоянства секундного объема металла — должно соблюдаться как в установившихся, так и в переходных процессах. Переходные процессы связаны с ударным приложением нагрузки, поэтому необходимо предъявлять определенные требования к характеру переходного процесса для соблюдения качественного технологического режима. На рис. 5.14 показаны графики переходного процесса в двух смежных клетях после захвата металла валками. В периоды



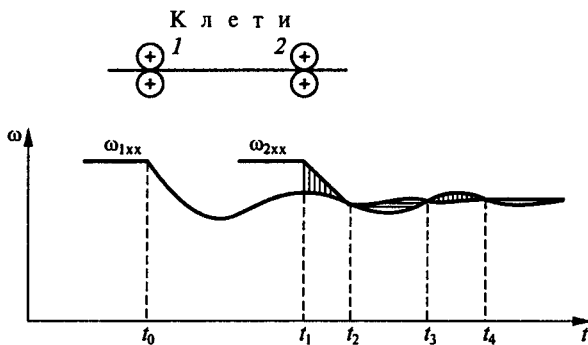


Рис. 5.14

времени  $t_1 \dots t_2$  и  $t_3 \dots t_4$  возможно растяжение металла, в периоды  $t_2 \dots t_3$  и  $t_4 \dots t_5$  — сжатие металла. Очевидно, что в процессе работы необходимо свести эти усилия к минимальным значениям, поэтому переходный процесс должен быть минимален по времени и перерегулированию.

Непрерывные группы клеток входят в состав заготовочных, сортовых, проволочных, листовых станов горячей и холодной прокатки и некоторых других.

Заготовочные станы выполняют непрерывного типа с чередующимися рабочими клетями, горизонтальными и вертикальными валками и индивидуальными главными приводами, разделенными на две непрерывные группы и реже на три группы с общим количеством клеток от 10 до 14. Схема расположения клеток непрерывного заготовочного стана 900/700/500 показана на рис. 5.15, где 1 — обжимная группа; 2 — черновая группа; 3 — чистовая группа; 4 — вертикальные валки; 5 — горизонтальные валки.

В черновой группе диаметр валков 700...850 мм, а в чистовой — 500...600 мм. Выходная скорость — до 7 м/с с прокаткой в режиме натяжения. Диапазон регулирования скорости  $D = 3 : 1$ .

Широкополосные станы горячей прокатки выполняют из двух групп: черновой — 4 или 5 клеток, расположенных последовательно, и чистовой — 6 или 7 клеток в непрерывном исполнении. Широкополосные станы имеют длину бочки валка 1000...2500 мм, диаметр рабочих валков чистовой группы 500...600 мм при скоро-

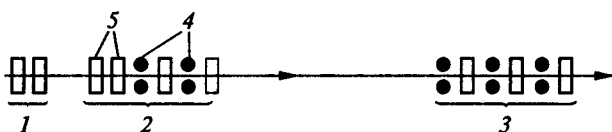


Рис. 5.15

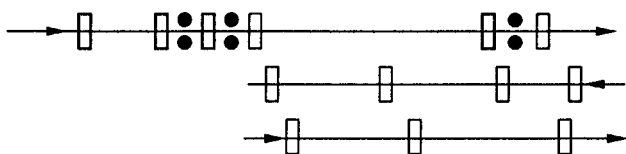


Рис. 5.16

сти прокатки на выходе из последней клетки 10...20 м/с и диапазоне регулирования скорости  $D = 2 : 1$ .

Из-за отсутствия калибра в листовых станах для обеспечения устойчивости полосы в валках необходимо вести прокатку с натяжением. Для фиксации уровня натяжения между клетями устанавливают петлерегуляторы, создающие силовую петлю в металле. По уровню отклонения петлерегулятора фиксируется натяжение.

Сортные станы непрерывного действия можно подразделить на крупно-, средне- и мелкосортные.

Крупносортные станы строят в основном полунепрерывного типа (рис. 5.16). Рабочие клетки выполняют с горизонтальными и вертикальными валками, расположенными в несколько линий. Скорость прокатки — до 10 м/с, диаметр рабочих валков 600...900 мм, диапазон регулирования обычно  $D = 2 : 1$ .

Средне- и мелкосортные станы непрерывного действия могут выполняться в одну (рис. 5.17, где 1 — черновая группа; 2 — промежуточная группа; 3 — чистовая группа) и в несколько нитей, т. е. когда в одной клетке одновременно может находиться несколько заготовок. Эти станы состоят из 8...27 рабочих клеток с горизонтальными и вертикальными валками. Выходная скорость прокатки 15...35 м/с, диапазон регулирования  $D = 6 : 1$ .

Проволочные непрерывные станы выполняют с четырехниточной прокаткой в черновой группе клеток и с двухниточной прокаткой в чистовых клетях (рис. 5.18, где 1 — черновая группа; 2 — первая промежуточная группа; 3 — вторая промежуточная группа; 4 — чистовая группа). Между группами клеток обычно устанавливают петлевые ямы с петлерегуляторами. Количество клеток в этих станах составляет до 40. Выходная скорость прокатки 25...40 м/с, требуемый диапазон скоростей  $D = 4 : 1$ .

Электропривод непрерывных станов должен удовлетворять требованиям обработки ударного приложения нагрузки в процессе захвата металла и ведения прокатки с соблюдением постоянства се-

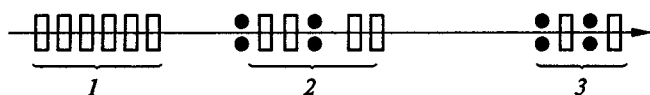


Рис. 5.17

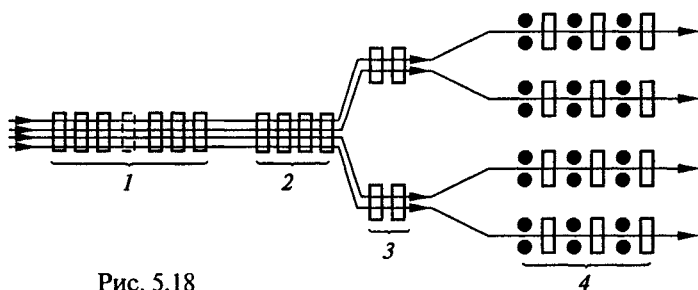


Рис. 5.18

кундного объема металла, обеспечения требуемого диапазона, раздельного и совместного управления клетями непрерывной группы.

Статические характеристики должны обеспечивать изменение скорости при действии нагрузки от 2 до 0,1 %. Меньшие значения относятся к более быстроходным станам. Динамическое изменение скорости не должно превышать 0,5...3 %. Диапазон регулирования в зависимости от типа стана (2:1)...(6:1).

На широкополосном стане горячей прокатки осуществляется прокатка листовой стали толщиной 1,5...10 мм, шириной до 2000 мм при скоростях 15...20 м/с на выходе из чистой группы.

**Непрерывные станы холодной прокатки.** Прокатка тонкой стальной полосы толщиной менее 1 мм возможна только при холодной обработке металла, поскольку тонкая лента в горячем состоянии обладает малой прочностью, а кроме того, окалина, образующаяся в процессе нагревания металла в печах, соизмерима по толщине с полосой, что не позволяет вести устойчивую прокатку с получением высокого качества поверхности и структуры металла.

Станы холодной прокатки подразделяются на непрерывные (многоклетьевые) (рис. 5.19, а) и реверсивные (одноклетьевые) (рис. 5.19, б). Кроме клеток, где происходит обжатие металла, в состав стана входят разматыватель 1 и моталка 2, которые обеспечивают смотку и намотку металла с постоянным натяжением.

Непрерывные станы изготовляют трех-, четырех- и пятиклетьевыми. Трех- и четырехклетьевые станы обычно предназначены для прокатки твердых сталей (трансформаторных, автомобильных и др.), а пятиклетьевые — для прокатки мягких сталей (жести, кровельного железа и др.). Клетки непрерывных станов выполняют четырехвалковыми. Они предназначены для получения полосы толщиной 0,25...0,2 мм со скоростями прокатки 20...45 м/с.

Реверсивные станы предназначены для прокатки небольших партий листов, скорость прокатки у которых составляет до 15 м/с. Реверсивные станы широко распространены для прокатки тонких и сверхтонких полос толщиной от 0,2 мм до 1...2 мкм с высокой степенью точности по толщине. Для получения точной прокатки тонких полос необходимо снижать диаметр рабочего вала, так

К л е т и

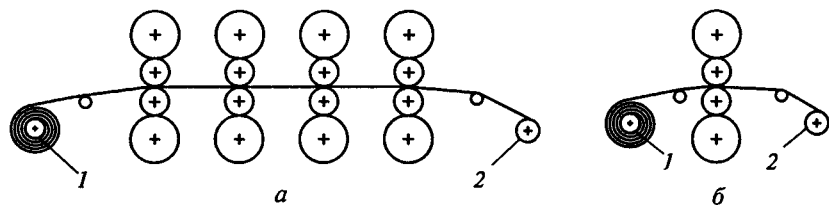


Рис. 5.19

как требуется соблюдать условие  $D_p = (1000 \dots 2000)h$ , где  $D_p$  — диаметр рабочего вала;  $h$  — толщина полосы. В связи с этим для прокатки тонких и сверхтонких полос нужен очень малый диаметр рабочего вала при большой длине. Это приводит к снижению жесткости вала. Следовательно, даже при наличии двух опорных валков очень трудно обеспечить высококачественную прокатку металла. По этой причине станы холодной прокатки, предназначенные для прокатки тонких полос, выполняют 6-, 12- и 20-валковыми. При прокатке полос в клетях, имеющих диаметр рабочего вала меньше 350...400 мм, в качестве приводных валков используют опорные валки, что упрощает конструкцию прокатной клетки.

При рассмотрении процесса прокатки следует выделить из всего комплекса оборудования прокатного стана намоточные и разматывающие устройства, расположенные на входной и выходной сторонах стана. Их основное назначение — стабилизация натяжения полосы при смотке и намотке в рулон. От натяжения зависят толщина и качество поверхности прокатываемой полосы, качество намотки и количество обрывов. Обычно натяжение достигает 70 % предела текучести прокатываемого металла, что требует создания электроприводов намоточных устройств, имеющих мощность двигателя до 70...80 % мощности главного привода клетки.

Технологический режим на станах холодной прокатки состоит из следующих основных этапов: заправка полосы с разматывателя в рабочую клетку (или клетки для непрерывных станов) и моталку; установление заданного натяжения металла; одновременный разгон двигателей клеток, разматывателя и моталки; работа на установившейся скорости прокатываемой полосы; торможение двигателей. В процессе работы качество прокатываемой полосы во многом определяется постоянством натяжения металла, поэтому в процессе работы целесообразно снижать время переходных процессов двигателя рабочей клетки и обеспечивать такой принцип управления скоростью моталки, чтобы в период намотки (или размотки) скорость двигателя намоточных устройств изменялась в зависимости от радиусов рулонов.

### 5.5.2. Система автоматизации транспортно-технологического комплекса подготовки и подачи слитков к обжимному прокатному стану

Транспортно-технологический комплекс обеспечивает подачу нагретых слитков к приемному рольгангу обжимного прокатного стана. На рис. 5.20 показан один из вариантов схемы системы управления комплексом. Охлажденные слитки подаются с помощью электровоза 8 в зону нагревательных колодцев 3 (нагревательный пролет) и перегружаются в колодцы мостовым краном 10 с клещевым захватом. Слитки с помощью индукционного нагрева нагреваются до температуры пластичных деформаций. После завершения нагрева слитки загружаются тем же краном в слитковоз 6 (слитковоз представляет собой тележку с установленным на ней оборудованием) и доставляются к приемному рольгангу 2. Перегрузка нагретых слитков со слитковоза на рольганг осуществляется манипулятором (сталкивателем) 1. Движение транспорта (6 и 8) осуществляется по рельсовому пути 9 стандартной ширины 1540 мм. На рис. 5.20 приняты следующие обозначения: ЦПС — цеховая подстанция; ШР — шкаф распределительный, ШЭ — шкафы электрооборудования; 4 — датчики температуры; 5 — путевые датчики; 7 — датчик давления, фиксирующий загрузку слитковоза.

В шкафах электрооборудования находятся комплектные электроприводы, комплектные устройства питания и управления нагревательными колодцами. В зависимости от требуемой производительности комплекса применяют возвратно-поступательные или кольцевые (эллиптические) системы слиткоподачи. Во втором случае используются 3...5 слитковозов. Схемотехнический план нагревательных пролетов с пятью колодцами для двух систем слиткоподачи приведен на рис. 5.21, а, б, где 1 — манипулятор (сталкиватель); 2 — приемный рольганг; 3 — слитковоз; 4 — пост оператора; 5 — нагревательные колодцы; 6 — рельсовый путь; 7 — источник электропитания слитковоза;  $l_0$  — общая длина подъездных путей слитковоза;  $l_1$  — расстояние до приемного конца рольганга;  $l_2$  — интервал между колодцами;  $l_3$  — расстояние до конечной части пути;  $l_4 = 0,5l_0$ ;  $l_5$  — расстояние до источника питания;  $l_6$  — расстояние между путями.

Система управления может работать в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах. В ручном режиме происходит обслуживание каждого колодца с участием оператора. В полуавтоматическом режиме оператор задает число и последовательность разгружаемых колодцев, и система реализует это задание. Далее следует новое задание. В автоматическом режиме оператор дает только начальную команду запуска системы, происходит непрерывное обслуживание колодцев с учетом их готовности после за-

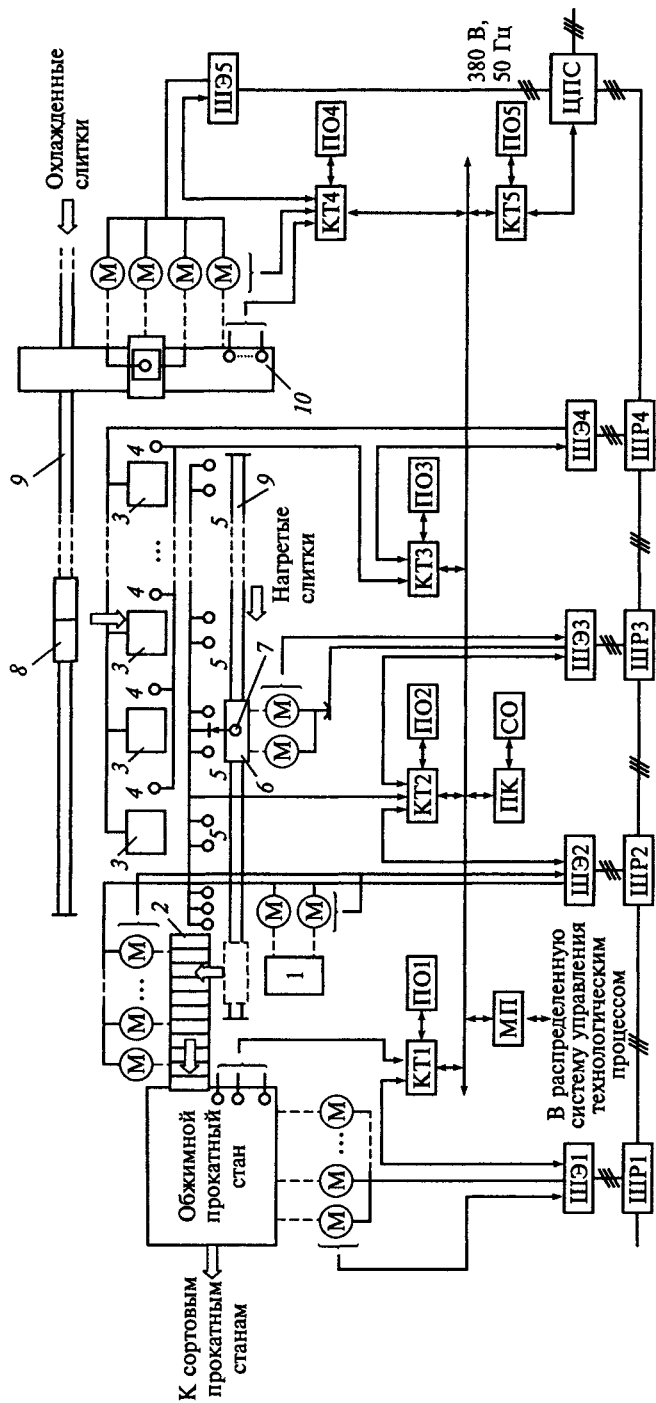


Рис. 5.20

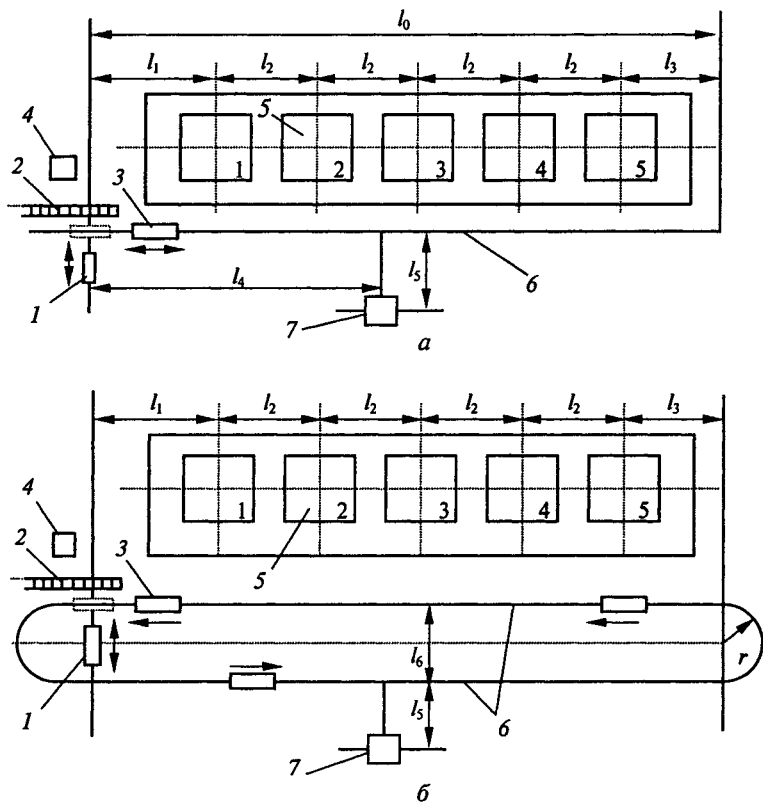


Рис. 5.21

грузки охлажденных слитков. В исходном положении слитковоз находится у приемного рольганга.

Цикл обслуживания одного колодца состоит из следующих операций:

автоматический пуск слитковоза с разгоном до максимальной скорости, движение с этой скоростью до путевых датчиков, обеспечивающих снижение скорости до «ползучей», движение на «ползучей» скорости до путевых датчиков, обеспечивающих остановку на оси заданной группы колодцев;

погрузка слитка на слитковоз мостовым краном;

автоматический пуск загруженного слитковоза с разгоном до максимальной скорости, движение слитковоза с этой скоростью, замедление по сигналу путевого датчика до средней скорости и движение с ней, снижение скорости до уровня «ползучей» по сигналу следующего путевого датчика и движение с этой скоростью до путевого датчика, обеспечивающего точную остановку у рольганга;

обеспечение необходимой паузы для перегрузки слитка на приемный рольганг сталкивателем.

Смещение программы на один шаг производится автоматически после начала движения слитковоза от печей к рольгангу.

Управление механизмами крана (моста, тележки, подъема) выполняется аналогично управлению механизмами слитковоза в режиме возвратно-поступательного движения. Электропривод клещевого захвата выполняется как силовой моментный.

Питание к электрическому оборудованию слитковоза подводится через контактные провода. Электропривод перемещения может быть групповым или индивидуальным, т. е. один двигатель может работать на одну ось или на несколько. На валу двигателя жестко крепится шкив электромагнитного тормозного устройства.

На рис. 5.22 показаны скоростная  $v = f_1(t)$  и нагрузочная  $M = f_2(t)$  диаграммы. Время цикла  $T_{ц}$  работы слитковоза определяется исходя из максимального числа поездов за слитками. Для возвратно-поступательной системы  $T_{ц} = 3600/N_{ц}$ , где  $N_{ц}$  — число поездов за слитками в 1 ч; для кольцевой системы  $T_{ц} = 3600N_T/N_{ц}$ , где  $N_T$  — число тележек.

Для расчета диаграмм движений слитковоза необходимо знать: число групп нагревательных колодцев, расстояния между ними, расстояния от осей крайних групп до рольганга и до конца прямолинейного участка, максимальную ( $v_{max}$ ), среднюю ( $v_{cp}$ ) и «ползучую» ( $v_{min}$ ) скорости движения слитковоза.

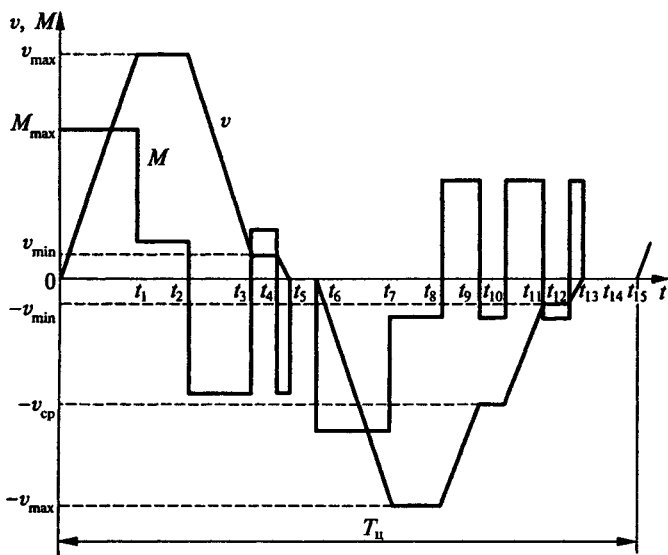


Рис. 5.22



Значение допустимого ускорения (замедления) слитковоза при построении скоростной диаграммы определяется по условию отсутствия пробуксовки колес. Максимально возможное (критическое) значение этого ускорения (замедления)  $a_{\max} = \varphi gn/N$ , где  $\varphi = 0,12 \dots 0,15$  — коэффициент сцепления (трения) колес с рельсами;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения;  $n$  — число ведущих колес;  $N$  — общее число колес. Значение допустимого ускорения  $a = (0,5 \dots 0,8)a_{\max}$ . Для возвратно-поступательной слиткоподачи при движении слитковоза от рольганга расчет выполняют по следующим формулам:

время разгона  $t_{0,1} = v_{\max}/a$ , пройденный путь  $l_{0,1} = 0,5 v_{\max} t_{0,1}$ ;

время замедления до  $v_{\min}$  при подходе к печам  $t_{2,3} = (v_{\max} - v_{\min})/a$ , пройденный путь  $l_{2,3} = 0,5(v_{\max} - v_{\min})t_{2,3}$ ;

время торможения до полной остановки  $t_{4,5} = v_{\min}/a$ , пройденный путь  $l_{4,5} = 0,5v_{\min}t_{4,5}$ ;

время движения на «ползучей» скорости  $t_{3,4}$  определяется из условия, что пройденный при этом путь  $l_{3,4}$  равен примерно 5% значения  $l_{2,3}$ ;

время движения на максимальной скорости  $t_{1,2} = l_{1,2}/v_{\max}$ , пройденный путь  $l_{1,2} = l_1 - \sum(l_{0,1} + l_{2,3} + l_{3,4} + l_{4,5})$ , где  $l_1$  — расстояние до определенной группы колодцев;

время покоя слитковоза  $t_{\text{пк}}$ , включающее в себя время загрузки слитка  $t_{5,6}$ , время выгрузки  $t_{13,14}$  и время ожидания  $t_{14,15}$ , определяют из равенства  $t_{\text{пк}} = T_{\text{ц}} - \sum t_{\text{ip}}$ , где  $\sum t_{\text{ip}}$  — полное время работы слитковоза.

При движении груженого слитковоза к рольгангу значения ускорений и замедлений принимаются такими же, как и при движении порожнего слитковоза, поэтому по приведенной методике можно рассчитать время замедления при изменении скорости от  $v_{\max}$  до  $v_{\text{ср}}$ , от  $v_{\text{ср}}$  до  $v_{\min}$  и время движения со средней скоростью, а также пути, пройденные за расчетные промежутки времени. Путь, пройденный при движении с «ползучей» скоростью у рольганга, следует принять равным 5% значения  $l_{2,3}$ .

В случае кольцевой слиткоподачи расчет проводится аналогично. Отличия состоят лишь в том, что участки закругления пути слитковоз должен проходить на пониженной скорости  $v_{\text{ср}}$ , и направление движения (знак скорости) порожнего и груженого слитковозов сохраняется неизменным (рис. 5.23).

Система управления реализована на контроллере фирмы «Omron» C200HG CPU43, имеющем следующие основные характеристики: число инструкций — 168 (12 основных и 156 специальных); время выполнения основной инструкции — 0,75...2,25 мкс, специальной — 34...724 мкс; память — 8 кбайт; Timer/Counter — 512 (000—511); максимальные токи по цепи напряжением 5 В — 4,6 А, по цепи напряжением 26 В — 0,6 А; максимальная мощ-

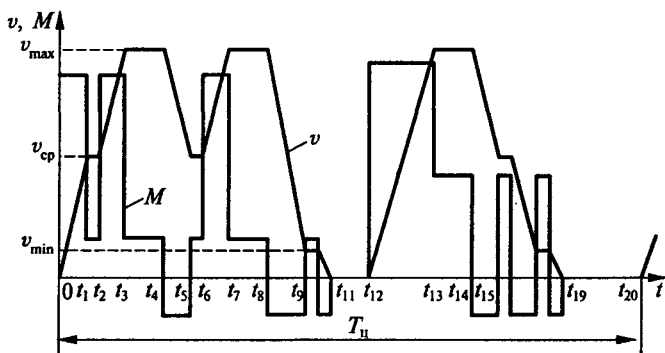


Рис. 5.23

ность 20...23 Вт. В состав контроллера также входят следующие модули ввода и вывода:

блок дискретных входов С200Н-ID212, имеющий уровень входного напряжения 24 В; рабочее входное напряжение 20,4...26,4 В; входное сопротивление 3 кОм; входной ток при напряжении 24 В — 7 мА; напряжение ON (min) 14,4 В; напряжение OFF (max) 5,0 В; ON время ответа (max) 1,5 мс (при напряжении 24 В и температуре окружающей среды 25 °С); OFF время ответа (max) 1,5 мс (при таких же напряжении и температуре); число цепей — 16 входов плюс общий; потребляемый ток (max) 10 мА (при напряжении 5 В);

блок аналоговых входов С200Н-AD002, имеющий входное напряжение: (1...5), (0...10), (-10...10) В; входной ток (4...20) мА; разрешение (max) 1/4000; точность при температуре окружающей среды 25 °С — 0,25 % по напряжению, 0,4 % по току; точность при температуре 55 °С — 0,6 % по напряжению, 0,8 % по току; время преобразования 2,5 мс; входное сопротивление по напряжению > 1 МОм, по току 250 Ом; максимальное напряжение входного сигнала  $\pm 15$  В; максимальный ток входного сигнала 24 мА; потребляемая мощность 400 мВт при напряжении питания 5 В;

блок транзисторных выходов С200Н-OD212, имеющий максимальный переключаемый ток 0,3 А (при напряжении 24 В); максимальный ток утечки 0,1 мА; ON время ответа (max) 0,2 мс; OFF время ответа (max) 0,3 мс; число цепей — 16 входов плюс общий; потребляемый ток (max) 180 мА (при напряжении 5 В);

блок дискретных выходов С200Н-OC225, имеющий уровень входного напряжения 24 В; рабочее входное напряжение 20,4...26,4 В; входное сопротивление 3 кОм; входной ток 7 мА при напряжении 24 В; напряжение ON (min) 14,4 В; напряжение OFF (max) 5 В; ON время ответа (max) 1,5 мс (при напряжении 24 В и температуре окружающей среды 25 °С); OFF время ответа (max) 1,5 мс (при тех

же напряжении и температуре); число цепей — 16 входов плюс общий; потребляемый ток (max) 10 мА при напряжении 5 В.

Программа реализуется в соответствии с методиками, изложенными в работе [39].

### 5.5.3 Система автоматизации обжимного прокатного стана

Автоматизированная система управления технологическим процессом прокатки на участке обжимной клетки 850 крупносортового стана на нижнем уровне управления включает в себя пять взаимосвязанных и структурно согласованных между собой систем, осуществляющих информационные функции и функции управления. При этом не ставится задача обеспечения полного автоматического управления участком без участия оператора, что объясняется особенностями технологии и конструкции механизмов, требующих визуального контроля за правильностью выполнения операций и изменения стратегии управления в зависимости от ситуаций, возникающих в процессе управления. На рис. 5.24 представлен план расположения оборудования участка обжимной клетки 850, где 1 — раскатные рольганги; 2 — рабочие рольганги; 3 — манипуляторные линейки; 4 — кантователь; 5 — клеть 850; 6 — нажимное устройство.

Технологический процесс реверсивной прокатки в клетке заготовок, поступающих от нагревательных печей, состоит из следующих операций:

подачи заготовок к клетке по рольгангам;

перемещения заготовок в поперечном направлении манипуляторными линейками для последующей подачи в калибры валков клетки;

кантовки (при необходимости) заготовок прямоугольного сечения крюковым кантователем, встроенным в манипуляторную линейку;

перемещения верхнего валка нажимным устройством перед процессом при необходимости изменения раствора валков;

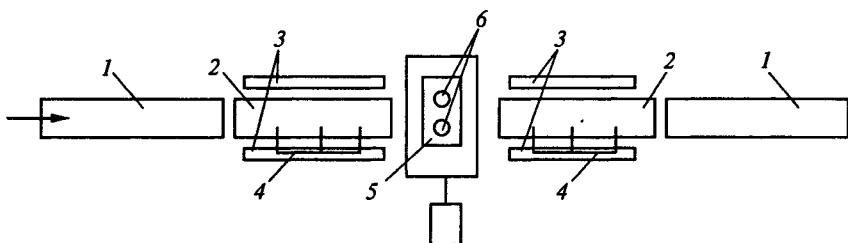


Рис. 5.24

подачи заготовок в калибры валков для прокатки попеременно рабочими рольгангами (и раскатными при увеличении длины заготовки), расположенными перед и за клетью;

увеличения скорости прокатки после захвата металла и снижения ее перед выбросом металла из валков.

Такие операции, как кантовка заготовок и подача в калибры с учетом изгиба и деформации их концов, как правило, может выполнять только оператор при ручном управлении. При необходимости он осуществляет также и правку заготовок сведением линеек манипулятора до упора в металл.

Схема СУ представлена на рис. 5.25. Автоматизированная система управления скоростными режимами (АСУ СР) выполняет функции совместного управления раскатными, рабочими рольгангами и главным приводом с согласованием скоростей при использовании одного задающего аппарата (командоконтроллера). Подача и захват металла осуществляются на пониженной скорости захвата. Далее следует автоматическое увеличение скорости главного привода до заданного программой прокатки значения, а затем снижение ее до скорости выброса (при этом рассчитывается текущее значение непрокатанной части заготовки с помощью фотодатчиков положения конца заготовки и импульсного датчика, установленного на приводе валков).

Автоматизированная система управления нажимным устройством (АСУ НУ) обеспечивает автоматическую установку верхнего валка в соответствии с заданной программой прокатки при счете числа пропусков (от трех до девяти). В качестве датчика положения верхнего валка используется датчик абсолютного значения координаты (кодовый датчик).

Автоматизированная система управления манипуляторами и кантователями (АСУ МК) обеспечивает установку линеек с заготовкой у нужного калибра по заданной программе. При этом предусматривается возможность корректировочного перемещения

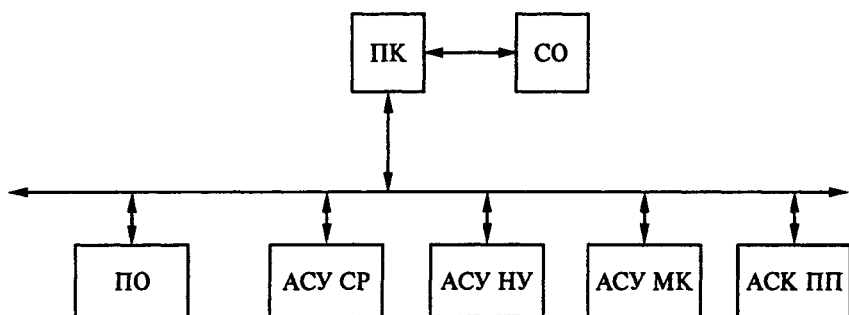


Рис. 5.25

линеек оператором и включение кантовки при ручном управлении.

Автоматизированная система контроля параметров прокатки (АСК ПП) выполняет измерение и архивирование данных параметров прокатки на заданном промежутке времени (температура заготовки, усилие прокатки, частота вращения, ток нагрузки главного привода).

Перечисленные системы реализованы на программируемом контроллере, связаны информационно с верхним уровнем управления (станция оператора с ПК), обеспечивающим ввод программ и схем прокатки, а также визуализацию состояния объекта и хода технологического процесса.

#### 5.5.4. Система автоматизации участка ножниц поперечного резания листового прокатного стана

Система автоматизации участка ножниц поперечного резания реализует управление последовательным линейным технологическим процессом в рамках комплексной автоматизированной системы управления листовым прокатным станом, которая включает в себя системы: управления электроприводами (СУ ЭП), измерения длины листа (СИ ДЛ), формирования задания мерной длины (СФЗ МД).

Участок ножниц поперечного резания имеет следующее технологическое оборудование (рис. 5.26):

рольганг 1 перед ножницами;

устройство установки листа (манипуляторы 2, смещающие лист к борту рольганга для выравнивания его вдоль этого борта с целью обеспечения перпендикулярности поперечного реза);

ножницы поперечного резания 3 с механизмом прижима листа;

устройство уборки обрезки 4, выполненное в виде тележки, совершающей возвратно-поступательные движения от ножниц к контейнеру обрезки 5 (сброс обрезки производится открыванием дна тележки);

качающийся рольганг 6, совершающий качательное движение вместе с перемещением верхнего ножа ножниц;

рольганг 7 за ножницами;

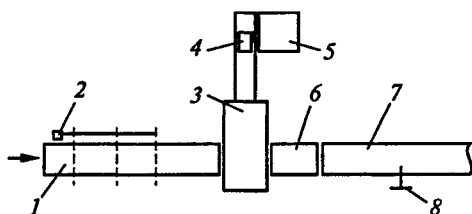


Рис. 5.26

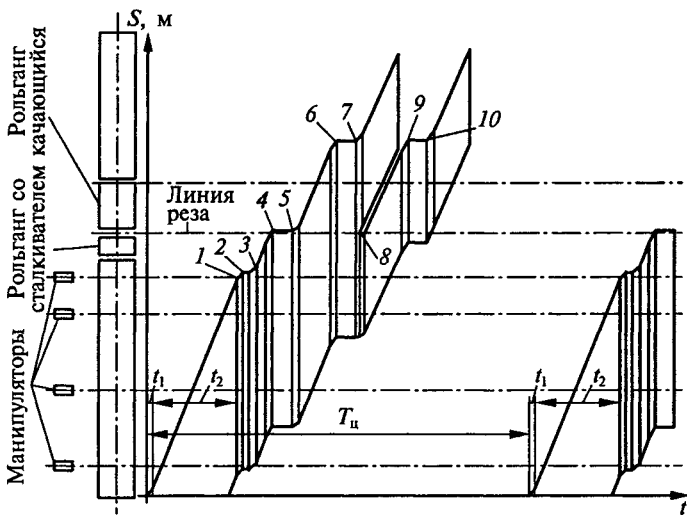
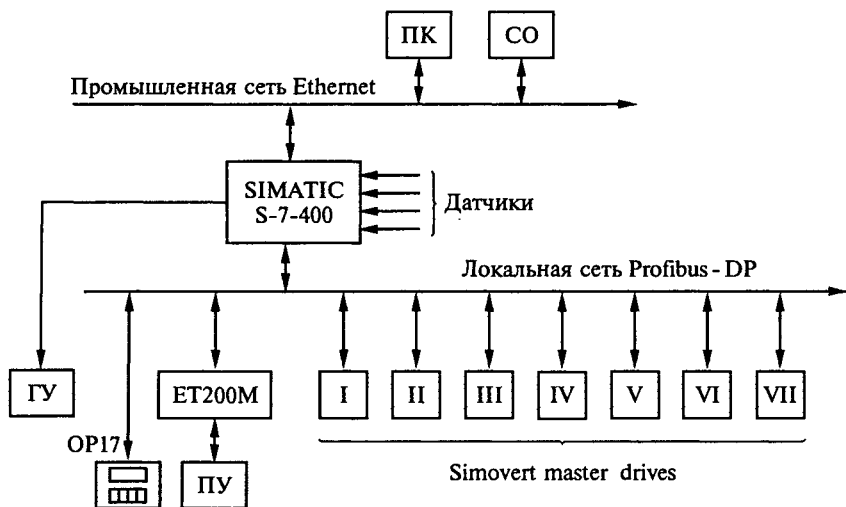


Рис. 5.27

передвижной упор 8, устанавливаемый в соответствии с заданной мерной длиной реза и снабженный механизмом подъема и опускания щита упора.

Технологический процесс, характеризующийся последовательностью операций, иллюстрируется графиком перемещения, по



*a*

Рис. 5.28, *a*



оси абсцисс которого отложено время, а по оси ординат — расстояние с координатами расположения оборудования участка (рис. 5.27).

Координаты положения переднего конца листа отмечены точками: 1 — поступление листа на рольганг перед ножницами; 2 — остановка листа для выравнивания у борта рольганга; 3 — окончание выравнивания листа; 4 — установка листа для резания переднего конца; 5 — окончание резания переднего конца; 6 — установка листа на мерный рез (в данном случае деление на две части) при перемещении по рольгангам; 7 — окончание резания листа с включением рольгангов качающегося и за ножницами; 8 — включение рольганга перед ножницами для транспортирования второй части листа для резания заднего конца; 9 — остановка второй части листа для отрезания заднего конца; 10 — окончание резания заднего конца и выключение рольганга.

Функциональная схема СУ ЭП приведена на рис. 5.28, а. Она реализует управление частотно-регулируемыми комплектными электроприводами Simovert master drives механизмов с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. Электрическая принципиальная схема СУ ЭП показана на рис. 5.28, б.

Главный привод ножниц (привод механизма резания) I выполнен двухдвигательным для уменьшения суммарного момента инерции (два двигателя управляются по схеме «ведущий-ведомый» по связи SIMOLINK с заданным коэффициентом распределения нагрузок по моменту 0,5).

Программно-логическое управление приводами осуществляет программируемый контроллер SIMATIC S-7-400 по сети Profibus, связывающей пульт управления ПУ через систему модулей удаленного ввода-вывода сигналов управления и сигнализации типа ET200M и текстовую панель оператора OP17 с программируемой функциональной клавиатурой для вывода технологических сообщений, параметров и задания режимов работы.

Сигналы датчиков положения механизмов и проката поступают на входные модули контроллера и обрабатываются программой диагностирования и контроля состояния объекта. С выходных модулей контроллера поступают сигналы включения электромагнитов систем гидроуправления (ГУ) механизмами прижима листа и другими вспомогательными механизмами.

В СУ ЭП выполняются в автоматическом режиме следующие группы операций:

остановка и выравнивание листа перед резом (приводы III...V, см. рис. 5.28, б);

установка листа на мерный рез при беспорочной остановке рольгангов, приводы которых работают в позиционном режиме, или с передвижным упором при повышенной точности резания (приводы II);



управление главным приводом в позиционном режиме с включением прижимов листа на время резания (привод I);

управление устройством уборки обрезки, тележка которого в перерыве между резаниями совершает цикл движений, возвращаясь в исходное положение (привод VI).

В функции ручного управления оператора участка входят: установка листа для отрезания концов, которые могут иметь различную форму и протяженность дефектной части («язык»); разрешение на включение каждой из описанных групп операций автоматического управления; задание технологических режимов работы участка и управление всеми операциями в наладочном режиме.

Температурное расширение металла учитывается СФЗ МД при задании мерной длины реза

$$L = L_0[1 + 0,000012(T - T_0)], \quad (5.1)$$

где  $L_0$  — заданная мерная длина при  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ;  $T$  — текущее значение температуры листа в диапазоне от минус 10 до плюс 600 °С, измеряемой пирометром с программной обработкой выходного сигнала.

Значение  $L$  используется для задания положения передвижного упора или задания позиционному приводу рольгангов в режиме безупорной остановки листа.

Для измерения текущей длины листа (от передней кромки до линии реза) при движении его по рольгангам предназначена СИ ДЛ.

Принцип бесконтактного измерения длины листов основан на контроле положения передней кромки листа на базовых расстояниях от линии резания (реперных метках) с измерением текущей координаты в промежуточных положениях путем счета количества импульсов, поступающих от импульсного датчика, связанного с роликом рольганга.

### **5.5.5. Система управления непрерывным станом холодной прокатки**

Процесс холодной прокатки в металлургическом производстве заключается в следующем. Полосовая листовая сталь, прокатанная в горячем состоянии до толщины от одного до нескольких миллиметров, подвергается затем завершающей прокатке в холодном состоянии до тонкой листовой стали, которая служит материалом для корпусов автомобилей и бытовых электроприборов. Таким образом, холодная прокатка является завершающим процессом, в результате которого достигаются необходимые потребителям размеры и качество. В связи с требованиями высокой точности изделий по толщине, размерам и другим параметрам в прокатных ста-

нах, выполняющих холодную прокатку, применяют управление начальной настройкой и прямое цифровое управление с помощью управляющих компьютеров и устройств, задающих последовательность операций. Модель, по которой осуществляется управление начальной настройкой, называют настроечной моделью; управление выполняется известными в теории прокатки способами. С помощью такой модели, исходя из размеров, типа и других параметров горячекатаной листовой стали, являющейся заготовкой для холодной прокатки, вычисляют режимы работы прокатного стана, обеспечивающие получение окончательных размеров и формы (зазоры между валками прокатного стана, скорость прокатки, натяжения и т.п.). Управление по такой модели является наиболее важным видом управления, определяющим производительность, стабильность и качество холодной прокатки.

Непрерывный стан холодной прокатки (рис. 5.29) имеет клетки  $K_1 \dots K_5$ , в которых одновременно происходит прокатка металла. Металл движется в одном направлении, и в каждой рабочей клетке производится последовательное его обжатие. Все клетки, разматыватель и устройство намотки в рулон (моталка) оснащают автоматизированными электроприводами, осуществляющими регулирование скорости, поддержание межклетьевых натяжений и толщины металла в заданных пределах.

Управление раствором валков рабочих клеток осуществляется автоматизированными электроприводами, обеспечивающими заданные режимы позиционирования и слежения с синхронизацией двигателей электроприводов.

Нормальный режим прокатки металлической полосы до заданных параметров (толщины, ширины, качества поверхности) возможен при стабилизации соотношения скоростей валков всех клеток прокатного стана и одновременном регулировании скоростей электроприводов для того, чтобы получить необходимые заправочные и рабочие скорости. Требования к соотношению скоростей устанавливаются из условия равенства количества металла, проходящего в единицу времени, а заданные растворы валков — из условий технологии прокатки металла.

Схема системы управления двумя клетями  $K_i$  и  $K_{i+1}$  показана на рис. 5.30. Обжатие металла в клетях  $K_i$  и  $K_{i+1}$  производится до толщин  $H_i$  и  $H_{i+1}$ . Управление скоростью и соотношением скоростей валков выполняется с помощью электродвигателей  $M_2$ ,  $M_4$ . Управление раствором валков  $d_i$  и  $d_{i+1}$  выполняется с помощью нажимных винтов  $HВ1$  и  $HВ2$  и следящих электроприводов с электродвигателями  $M_1$ ,  $M_3$ . Для простоты исследования вместо двух синхронизированных по положению и скорости следящих систем на каждой клетке рассматривается одна следящая система, что эквивалентно полной синхронизации двух следящих систем.

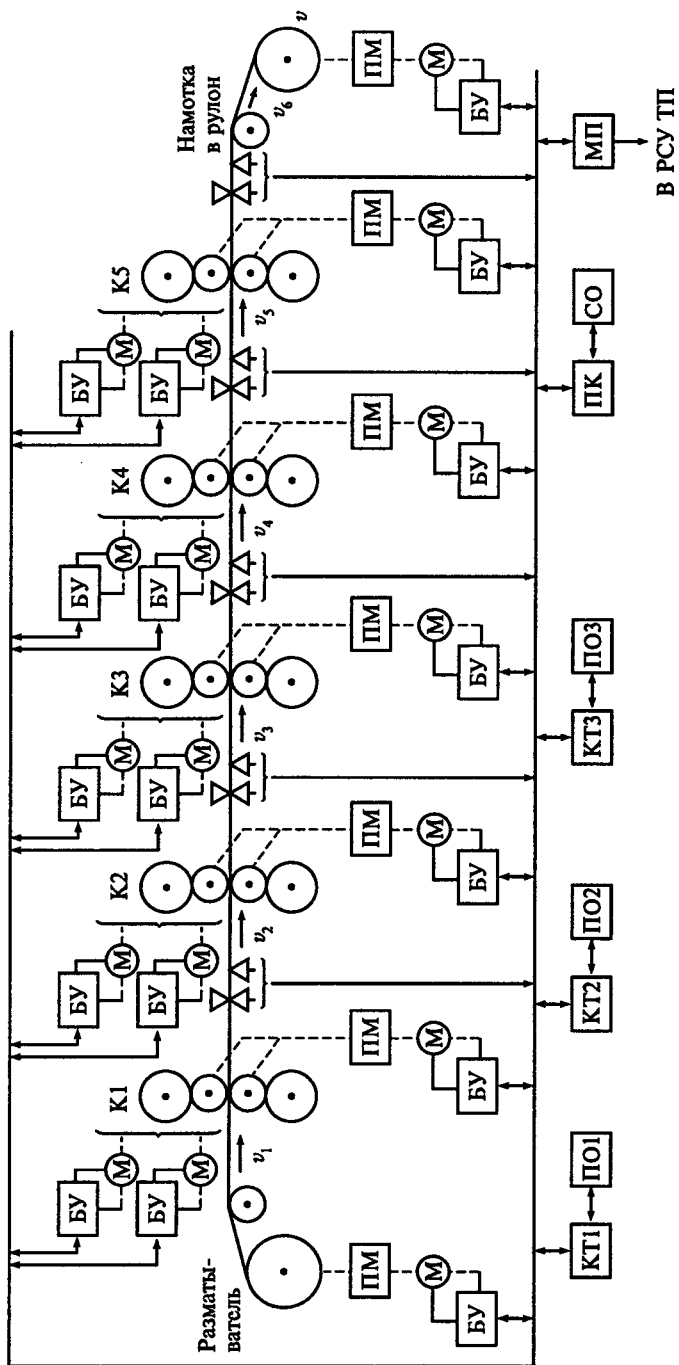


Рис. 5.29

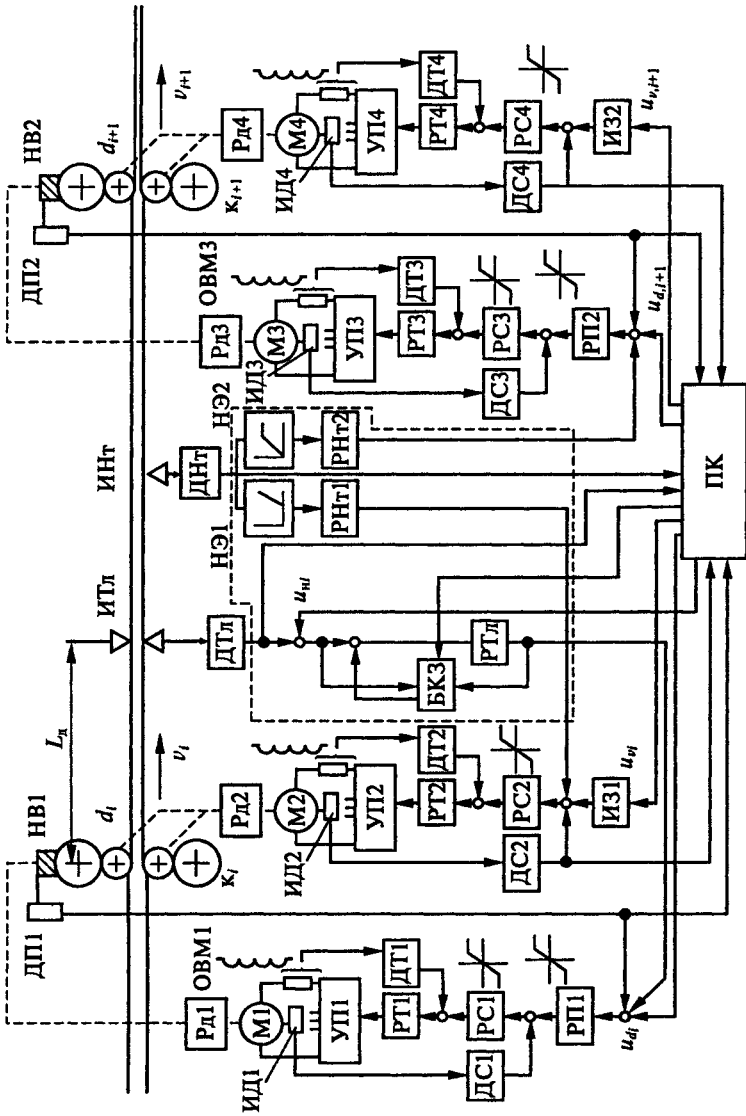


Рис. 5.30

Управление натяжением полосы металла выполняют по двум каналам с помощью измерителя ИНт и датчика ДНт натяжения, нелинейных элементов НЭ1, НЭ2 и регуляторов натяжения РНт1, РНт2. Нелинейные элементы согласованы таким образом, что при малых натяжениях работает канал с элементами НЭ2 и РНт2, при больших — канал с элементами НЭ1 и РНт1.

Упрощенная линеаризованная механическая модель прокатного стана, отражающая упругие взаимосвязи клеток через гибкую металлическую полосу и упругие связи приводов с валками, совместно с контурами регулирования производных обобщенных координат и упругих сил (натяжений) показана на рис. 5.31.

Межклетьеовое натяжение зависит от разности скоростей металла на выходе клеток  $v_i, v_{i+1}$  и значений раствора валков  $d_i, d_{i+1}$ . Результирующее натяжение

$$F_{i, i+1} = F'_{i, i+1} + F''_{i, i+1} + F'''_{i, i+1}. \quad (5.2)$$

Отдельные составляющие этого равенства определяются следующим образом:

$$F'_{i, i+1} = -W'_T(p)d_i, \quad F''_{i, i+1} = W''_T(p)d_{i+1}. \quad (5.3)$$

Для конкретных параметров технологического режима прокатки, передаточные функции  $W'_T(p), W''_T(p)$  можно записать в более простом виде. Для  $i$  и  $i + 1$  клеток

$$W'_T(p) = \frac{k_{T1}}{T_{T1}p + 1}; \quad (5.4)$$

$$W''_T(p) = \frac{k_{T2}}{T_{T2}p + 1}, \quad (5.5)$$

где  $k_{T1}, k_{T2}, T_{T1}, T_{T2}$  — соответственно технологические коэффициенты и постоянные времени.

Составляющая  $F'''_{i, i+1}$ , зависящая от разности скоростей металла в смежных клетях, определяется с учетом межклетьеового расстояния

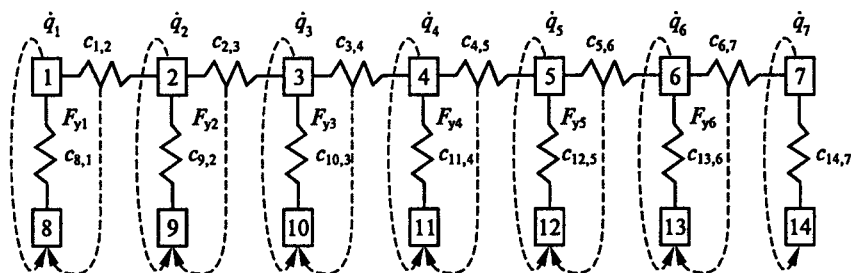


Рис. 5.31

яния  $L_{i, i+1}$ , жесткости  $c_{i, i+1}$ , коэффициента демпфирования  $b_{i, i+1}$  полосы металла и вытяжки  $\lambda_{i+1} = 1$ :

$$F''''_{i,i+1} = \left( \frac{c_{i,i+1}}{p} + b_{i,i+1} \right) [v_{i+1} - v_i (1 + \epsilon_{i+1})]; \quad (5.6)$$

$$\epsilon_{i+1} = \frac{1}{L_{i,i+1}} \frac{1}{c_{i,i+1} + b_{i,i+1}p} F''''_{i,i+1}, \quad (5.7)$$

где  $\epsilon_{i+1}$  — относительное удлинение полосы.

Структурная схема системы управления смежными клетями показана на рис. 5.32. В связи с тем, что эта схема является частью более общей схемы, действия на агрегаты, предшествующие агрегату  $i$  и следующие за агрегатом  $i+1$ , учтены в виде их реакций  $F_{i-1,b}$ ,  $r_{i-1}$  и  $F_{i+1,i+2}$ ,  $r_{i+2}$ . Взаимосвязь сепаратных систем управления агрегатами осуществляется по цепи нагрузки и по цепи управления для задания общей скорости и соотношения скоростей агрегатов. Последнее выполняет технологический программируемый микроконтроллер.

Взаимосвязи агрегатов иллюстрируются переходными характеристиками  $v_1(t)$ ,  $v_2(t)$ ,  $F_{1,2}(t)$ , ( $i = 1, i+1 = 2$ ), полученными при ступенчатом изменении момента электродвигателя  $M_{c2}$  в разомкнутых системах управления (см. рис. 1.27). Аналогичные результаты получаются при изменении момента  $M_{c3}$ . Выполнив сепаратные системы управления скоростью и соотношением скоростей с использованием типовых алгоритмов управления (ОМ — в электромагнитных контурах, СО — в механических), реализовав частоты среза контуров регулирования скоростями  $\omega_{c1}$  и  $\omega_{c2}$  из условия  $\omega_{c1} \geq 6\omega_{y1}$ ,  $\omega_{c2} \geq 6\omega_{y2}$ , получим хорошо декомпозированную динамическую систему, в которой сепаратные системы можно рассматривать квазиавтономными. Это иллюстрируется переходными характеристиками (см. рис. 1.28), полученными при ступенчатых изменениях возмущающих и управляющих воздействий в замкнутых системах управления.

Использование изложенных приемов декомпозиции систем и типовых алгоритмов управления дает благоприятные возможности для адаптивных настроек сепаратных систем и взаимосвязанных систем управления в целом в режимах наладки и рабочего функционирования.

Система управления толщиной включает в себя замкнутую систему управления раствором валков  $d_i$ , регулятор толщины РТл (см. рис. 5.30), блок компенсации транспортного запаздывания БКЗ, датчик толщины ДТл и измеритель толщины ИТл. Задание на толщину  $u_{ni}$  и управление БКЗ осуществляются от ПК. К ПК относятся также и часть схемы, ограниченная на рис. 5.30 штриховой линией.

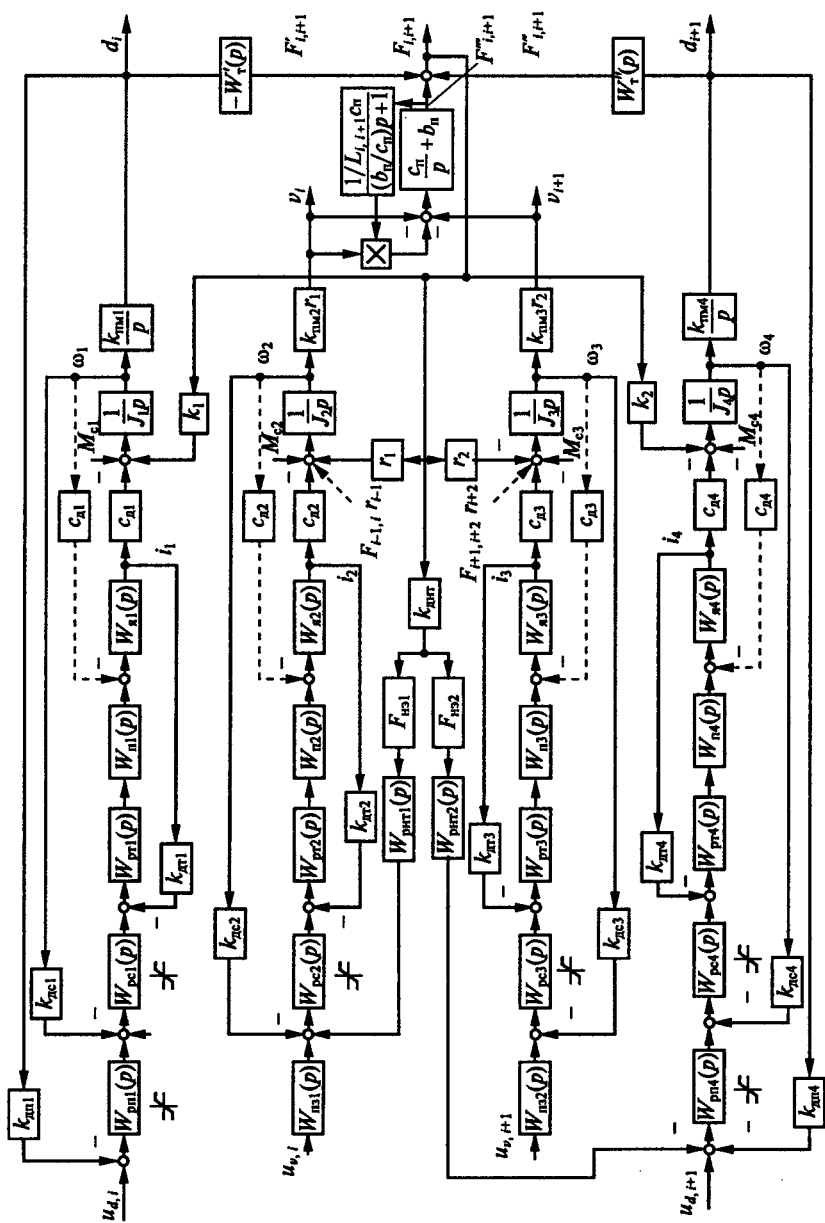


Рис. 5.32

Транспортное запаздывание возникает вследствие того, что ИТл можно устанавливать только на некотором расстоянии  $L_d$  от клетки. Поэтому от момента изменения  $d_i$  до момента измерения толщины  $H_i$  проходит время  $\tau_1 = L_d/v_i$ , где  $v_i$  — скорость полосы на выходе из клетки  $K_i$ .

Так как  $v_i$  является регулируемой переменной, а  $L_d$  может меняться при переналадке системы, то значение  $\tau_1$  является переменным.

Наличие транспортного запаздывания  $\tau_1$  приводит к увеличению динамических ошибок системы, а при больших значениях — к нарушению устойчивости системы. Поэтому выполняют компенсацию транспортного запаздывания введением искусственной задержки сигнала в БКЗ на время компенсации  $\tau_2$  и обеспечивают условие  $\tau_2 = \tau_1$ . Если  $\tau_1 = \tau_1(t) = \text{var}$ , то условие  $\tau_2(t) = \tau_1(t)$  обеспечивается при изменении значений  $\tau_2(t)$  с помощью блоков адаптивного управления.

Структурная схема адаптивной системы управления толщиной  $H_i$  показана на рис. 5.33, а, где  $k_n$  — технологический коэффициент толщины;  $e^{-\tau_1 p}$  — оператор звена транспортного запаздывания;  $k_{дтл}$  — коэффициент датчика толщины;  $F(p)$  — оператор БКЗ;  $W_{РТл}(p)$  — передаточная функция РТл.

Записав передаточную функцию, связывающую переменные  $M_{\tau_1}$ ,  $d_i$  и выполнив приведение воздействий  $M_{c1}$  и  $M_{\tau_1}$  ко входу регулятора положения и раскрыв структуру оператора  $F(p)$ , получим преобразованную структурную схему, показанную на рис. 5.33, б, где  $W_m(p)$ ,  $W_{3д}(p)$  — передаточные функции модели объекта контура управления толщиной и замкнутой системы управления раством валков  $d_i$ ;  $W_{31}(p)$ ,  $W_{32}(p)$  — эквивалентные передаточные функции преобразованной системы;  $e^{-\tau_2 p}$  — оператор звена компенсационного запаздывания;  $F'(p)$  — оператор беспойсковой адаптивной настройки  $\tau_2$ .

Адаптивная настройка осуществляется с помощью тестового сигнала  $u_{нт}$ , который периодически поступает в систему управления вместе с сигналом задания толщины  $u_{нi}$ . Выявляя и оценивая ошибку системы  $\epsilon'$  (часть полной ошибки  $\epsilon$ ), значение и знак которой являются функцией  $\Delta\tau(t) = \tau_1(t) - \tau_2(t)$ , определяют шаг изменения  $\Delta\tau_{2j}$  на каждом полупериоде  $jT_0$  тестового сигнала для того, чтобы в течение нескольких значений  $j$  получить равенство  $\tau_2(t) = \tau_1(t)$ . При достижении равенства  $\epsilon' = 0$  автоматическая подстройка заканчивается и тестовый сигнал отключается. Временные диаграммы процесса адаптивной настройки  $\tau_2$  показаны на рис. 5.33, в.

Оценка  $\sigma_j$  ошибки  $\epsilon_j$  на каждом интервале  $jT_0$  выполняется в виде интегральной квадратической оценки  $\sigma_j = \int_0^{T_0} \epsilon_j^2 dt$ . Шаг  $\Delta\tau_{2j}$  ус-





танавливается в виде  $\Delta\tau_{2j} = k_a \sigma_j$ , где  $k_a$  — коэффициент настройки, определяющий сходимость алгоритма адаптации с заданным качеством. Полупериод частоты сигнала  $u_{нт}$  определяется временем  $\tau_1$ , временным интервалом  $\Delta t_{и} = t_2 - t_1$  оценки  $\sigma_j$ , быстродействием системы управления толщиной при условии  $\tau_2 = \tau_1$ .

## 5.6. Автоматизированные технологические комплексы машиностроения

### 5.6.1. Характеристика технологических комплексов

В машиностроении в качестве средств автоматизации процессов изготовления деталей и сборки используют оборудование с числовым программным управлением (ЧПУ), автоматизированные линии (АЛ), роботизированные технологические комплексы (РТК), гибкие производственные системы (ГПС). Выбор средств определяется программой выпуска, номенклатурой и конструктивными особенностями деталей.

Основным оборудованием для механической обработки различных по назначению деталей и сборки являются АЛ или состоящие из них системы. В условиях крупносерийного и массового производства АЛ выполняют от одной до десяти различных деталей.

Необходимым элементом перехода от локальной автоматизации к ГПС являются РТК. Организационно РТК могут функционировать отдельно как самостоятельный вид оборудования или быть объединены в роботизированные технологические линии (РТЛ) и роботизированные технологические участки (РТУ).

Состав РТК определяется характером выполняемого технологического процесса и формируется на основе следующих данных: числа изготавливаемых деталей; заданной годовой программы выпуска; состава технологического оборудования; организации потока материалов (транспортирование, промежуточное хранение деталей и заготовок); числа подразделений обслуживания оборудования. Конструктивные, технологические, планировочные, информационные и другие связи внутри РТК и между ними определяют характер выполняемого процесса.

Рекомендуется специализация РТК по двум группам выполняемых операций: для черновых и получистовых операций; для заключительных операций, на которых достигается требуемая точность.

Гибкие производственные системы (рис. 5.34) механической обработки классифицируют по ряду признаков: организационному, комплексности изготовления изделий, виду обработки, разновидности изготавливаемых изделий, уровню автоматизации [34].

На рис. 5.34 приняты следующие обозначения: 1 — склад приспособлений-спутников; 2 — склад инструментальных магазинов; 3 — робот-штабелер; 4 — склад заготовок и деталей; 5 — монтажный стол; 6 — накопители с автоматической загрузкой; 7 — станки; 8, 9 — самоходные транспортные робокары; 10 — измерительная машина; 11 — пункт оперативного накопления; 12 — ПК; 13 — пульт оператора; 14 — отделение заточки режущего инструмента; 15 — отделение комплектации и настройки инструмента; 16 — отделение сборки приспособлений-спутников; 17 — отделение комплектации магазинов инструментов. Гибкая производственная система связана с системами: I — автоматизированная система управления предприятием (АСУП) (календарное планирование, расчет сменных заданий, контроль выполнения плана); II — система автоматизированного проектирования (САПР) обрабатываемых деталей, инструмента, приспособлений технологий, управляющих программ; III — автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУПТ), обработки, контроля, транспортирования.

Гибкую производственную систему строят по принципу специализации: технологическому, предметному, поддетальному.

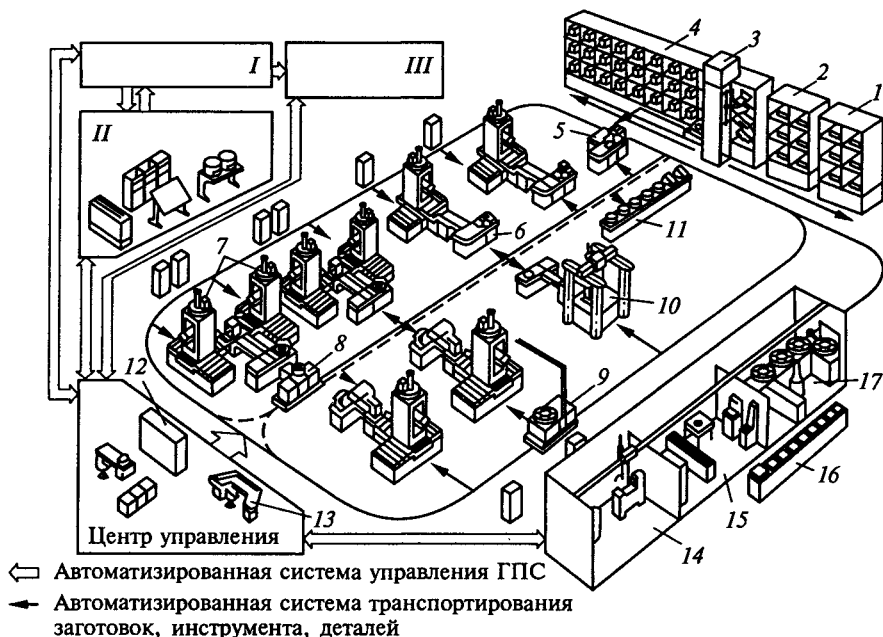


Рис. 5.34

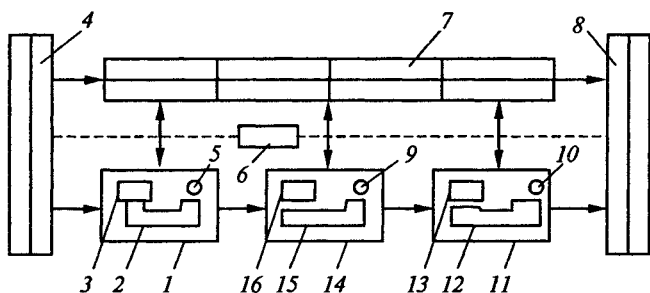


Рис. 5.35

В основу функционирования ГПС, построенной по технологическому принципу (рис. 5.35) положен принцип «верни на место». На рис. 5.35 приняты следующие обозначения: 1, 11, 14 — гибкий производственный модуль (ГПМ); 2, 12, 15 — взаимозаменяемое оборудование; 5, 9, 10 — накопители; 3, 13, 16 — роботы (манипуляторы); 4, 7, 8 — склады; 6 — автоматизированная транспортная система; стрелками обозначены материальные потоки.

Центральным элементом ГПС является автоматизированный межоперационный склад, через который изготавливаемые детали транспортируются от одного технологического модуля к другому. Последние укомплектованы группами взаимозаменяющего оборудования (многоцелевых станков). Преимущества такой схемы следующие: более полная загрузка оборудования благодаря концентрации всего объема обработки в технологическом модуле ГПС; возможность изменения номенклатуры деталей без перепланировки ГПС. Недостатки следующие: длинные и сложные технологические маршруты обработки заготовок; многократное их транспортирование между оборудованием и складом; необходимость запасов заготовок, инструмента и приспособлений для обеспечения бесперебойной работы ГПС на протяжении определенного времени (смена, сутки, недели и т. д.), для чего должны быть увеличены вместимость склада и объем незавершенного производства.

Предметная специализация ГПС (рис. 5.36) устраняет указанные недостатки, поскольку осуществляется обработка заготовок комплектов деталей для одного или нескольких однородных изделий.

На рис. 5.36 приняты следующие обозначения: 3, 6, 9, 19, 22, 25 — ГПМ; 4, 7, 10, 20, 23, 26 — оборудование; 5, 8, 12, 15, 17, 18 — накопители; 1, 13, 14, 21, 24, 27 — роботы (манипуляторы); 2, 11, 16 — автоматизированная транспортно-накопительная система (АТНС); стрелками обозначены материальные потоки. Технологические модули ГПС комплектуют из взаимодополняющего оборудования, располагающегося по маршруту изготовления ком-

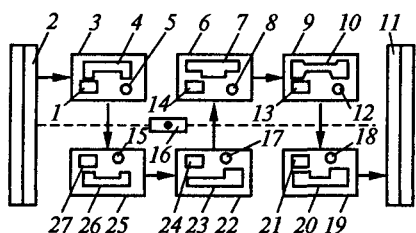


Рис. 5.36

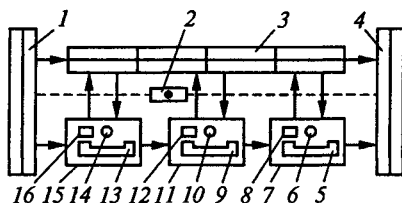


Рис. 5.37

плектов деталей. В таких ГПС уменьшается объем транспортных и складских работ. Однако наличие взаимодополняющих единиц оборудования снижает способность ГПС к перестройке на выпуск изделий других наименований. Требуется значительные затраты на перепланировку оборудования.

Подетальная специализация ГПС (рис. 5.37) обладает преимуществами двух рассмотренных схем. На рис. 5.37 приняты следующие обозначения: 7, 11, 15 — ГПМ; 5, 9, 13 — оборудование; 8, 12, 16 — роботы (манипуляторы); 6, 10, 14 — накопители; 1—4 — АТНС; стрелки — материальные потоки. Такие ГПС работают по групповой технологии, их модули располагаются согласно маршруту изготовления деталей и обладают универсальностью, аналогичной модулям ГПС, которая построена по технологическому принципу.

Несмотря на разнообразие, можно выделить три основных компоновки ГПМ, характеризующиеся видом применяемого устройства манипулирования (УМ) заготовкой и его расположением относительно рабочей зоны основного оборудования. Эти типы компоновки показаны на рис. 5.38, где: 1 — токарный станок с ЧПУ; 2 — манипулятор; 3 — периферийное оборудование. Первый тип компоновки ГПМ (см. рис. 5.38, а) строят на базе токарного станка ЧПУ с магазином инструментов и УМ портального типа с расположением портала параллельно оси вращения шпинделя станка. Такая линейная компоновка наиболее компактна и доступна для технического обслуживания. Приблизительно 70...80 % всех ГПМ для токарной обработки строят по такой схеме.

Второй тип компоновки (см. рис. 5.38, б) характеризуется применением УМ портального типа, работающих в прямоугольной пространственной системе координат. Такая схема характеризуется максимальным удобством с точки зрения размещения периферийного оборудования, обслуживаемого УМ (накопители, позиции контроля и др.), а также меньшим временем обслуживания вследствие меньших перемещений по сравнению с перемещениями при линейной компоновке. К недостаткам такой схемы отно-

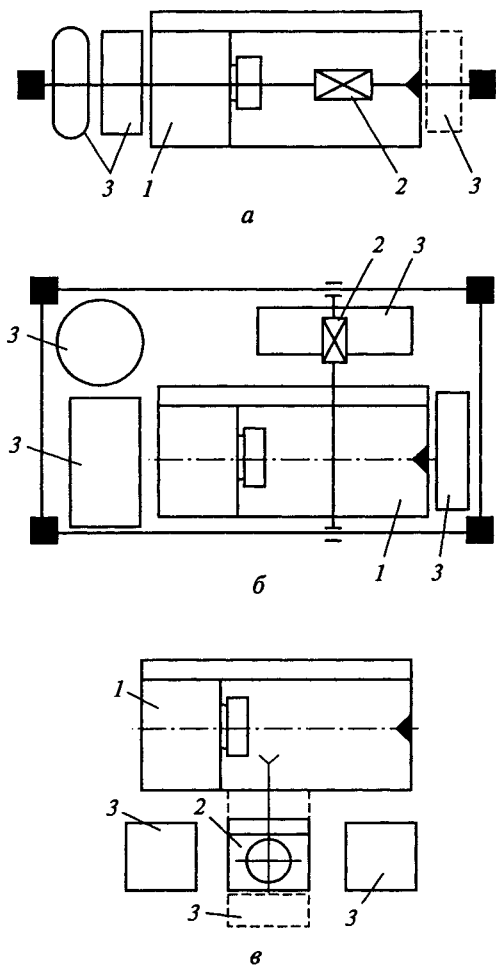


Рис. 5.38

сяет большая стоимость ГПМ за счет роста стоимости УМ и увеличение занимаемых площадей.

Третий тип компоновки (см. рис. 5.38, в) характеризуется применением напольных или встроенных УМ, расположенных перед рабочей зоной многоцелевого станка (МС).

При выборе типа и компоновки оборудования для автоматической сборки конкретного изделия нужно учитывать: длительность и программу изготовления; размеры, массу и геометрические параметры; производительность оборудования; число, сложность и последовательность выполнения операций сборки; возможность автоматической загрузки собираемых деталей, требу-

емую точность их относительной ориентации. В машиностроении применяются различные сборочные автоматы, одно- и многопозиционные сборочные станки, сборочные станки непрерывного действия, комбинированные станки, сборочные роботы и центры и другое оборудование [34].

### 5.6.2. Автоматизированный робототехнический комплекс (станок, робот, транспорт)

Рассмотрим применение промышленных роботов (ПР) в РТК механообработки [41, 53]. В зависимости от компоновки все модели металлорежущих станков могут быть разделены на две группы. К первой группе относятся станки с горизонтальной осью шпинделя типа токарных, шлифовальных, лоботокарных и других центровых и патронных станков.

На рис. 5.39 показан один из видов РТК этой группы на базе токарного станка с ПР напольного исполнения для механической обработки деталей типа тел вращения диаметром 25...70 мм и длиной 60...75 мм. В РТК входит станок первой группы — токарный полуавтомат 1 и ПР напольного типа 6. Особенностью комплекса является наличие 24-позиционного поворотного устройства 4. На этом устройстве смонтированы накопители и механизмы поштучной выдачи заготовок. Оператор укладывает заго-

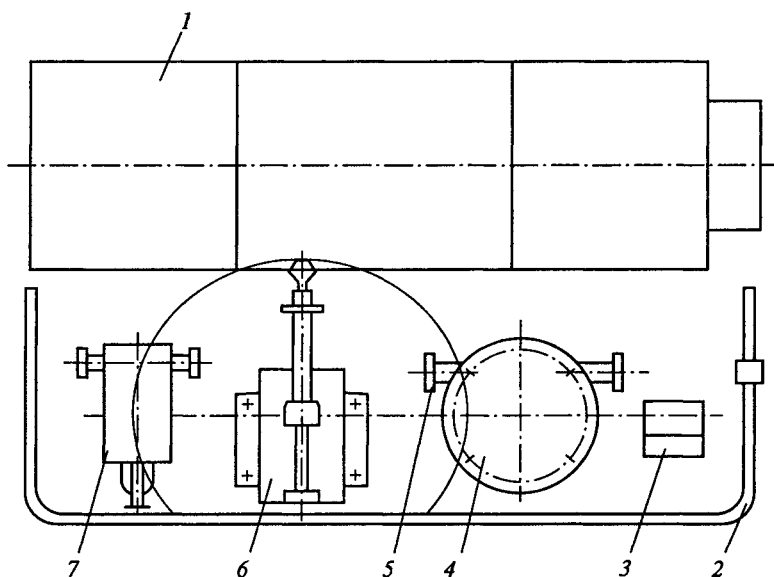


Рис. 5.39

товки в кассеты поворотного устройства 4, ПР 6 захватным устройством извлекает заготовки из накопителя, загружает токарный полуавтомат 1 и включает обработку детали по программе. По окончании процесса обработки ПР снимает готовую деталь со станка и помещает в тару, которая находится на тележке 7. Заготовки поочередно подаются в кассеты пневмоцилиндром 5, и накопитель поворачивается по программе от устройства управления 3.

Манипулятор робота, перемещаясь вверх, извлекает заготовку из кассеты. Когда в кассете не остается деталей, поступает команда на поворот устройства накопителя от датчиков, установленных на тяге пневмоцилиндра. Все механизмы расположены внутри ограждения 2.

Особенностью комплексов, создаваемых на базе станков первой группы, является то, что заготовка при подаче в рабочую зону (на линию центров этих станков) должна в процессе установки в патрон или центр выполнять дополнительное движение в продольном направлении. Это следует учитывать в конструкции манипулятора и захватного устройства ПР.

Ко второй группе относятся станки с горизонтальным столом и вертикальным расположением оси шпинделя: типа вертикально-фрезерных, горизонтально-фрезерных, вертикально-сверлильных, токарных вертикальных и др. Наиболее широко в промышленности применяют фрезерные и сверлильные станки этой группы, на базе которых преимущественно создаются РТК, например РТК, изображенный на рис. 5.40, где: 1 — вертикально-сверлильный станок; 2 — приспособление для зажима обрабатываемой детали; 3 — тара; 4 — захватное устройство; 5 — промышленный робот; 6 — пульт управления; 7 — бункерно-загрузочное устройство шибера типа с механизмом поштучной выдачи заготовок [59]. Комплекс предназначен для выполнения центровки, сверления, снятия фасок и других операций на деталях типа осей. В состав комплекса входят станок и ПР. Для обеспечения работы вертикально-сверлильного станка в автоматическом режиме предлагается использовать механизм автоматической подачи шпинделя, который устанавливается на сверлильной головке станка взамен привода ручного перемещения шпинделя. Этот механизм представляет собой пневматический привод.

Заготовки засыпают в бункерно-загрузочное устройство 7, из которого каретка подъемного механизма поштучно перемещает их в горизонтальном положении в поворотный лоток, устанавливающий заготовку в вертикальное положение на исходную позицию. Захватное устройство ПР 4 переносит и устанавливает заготовку в зажимное приспособление 2, расположенное на рабочем столе станка 1. Рычаги приспособления при закреплении заготовки воздействуют на путевой выключатель, который дает



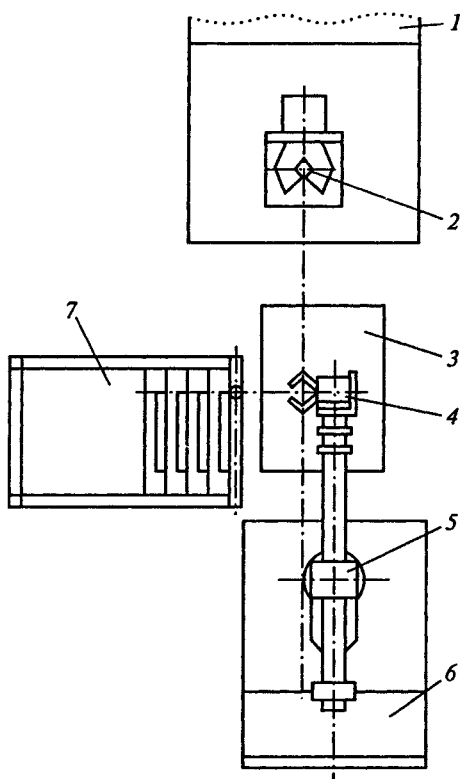


Рис. 5.40

сигнал для работы механизма автоматической подачи шпинделя станка. Происходят быстрый подвод инструмента, сверление с заданной подачей и глубиной обработки и быстрый отвод инструмента в исходное положение. После полного вывода инструмента из детали заготовка в приспособлении разжимается, захватывается манипулятором ПР и отводится назад механизмом горизонтального перемещения манипулятора. При необходимости заготовка поворачивается на угол  $180^\circ$  механизмом ротации захватного устройства и вновь устанавливается в зажимное приспособление. Деталь обрабатывается с другой стороны. По окончании процесса полной обработки деталь перемещается в тару, и циклы повторяются. Стружку с базовых поверхностей сдувают воздухом.

В общем случае основные факторы, влияющие на схемы загрузки станков, а следовательно, и на конструктивное оформление ПР, следующие: характер ориентации детали перед загрузкой; тип устройства для подачи деталей на позицию загрузки и

для их хранения (стационарная пара, магазин, транспортер и т. д.); вид выполняемых операций (например, перенос детали из тары на станок и обратно без изменения базовой поверхности или дополнительный перенос детали с одного станка на другой с изменением базовой поверхности, обеспечение кантования детали вне или внутри цикла обработки на одном станке и т. д.); компоновка станков (вертикальная или горизонтальная для станков токарной группы, вертикальное или горизонтальное положение плоскости стола для станков фрезерной и сверлильной групп); число станков, одновременно обслуживаемых ПР; планировка РТК, ГПС и других систем (линейная, линейно-параллельная, круговая).

В простейшей производственной системе на каждом таком многоцелевом станке до его переналадки непрерывно обрабатывают детали лишь одного типоразмера. Однако с введением в такую систему управления от ПК количество типоразмеров одновременно обрабатываемых деталей возрастает, что повышает гибкость процесса.

### 5.6.3. Автоматизированный участок металлообработки (группа станков, транспорт, склад-штабелер)

Рассмотрим автоматизированный участок металлообработки фирмы «Murata» (рис. 5.41) [53]. На рис. 5.41 приняты следующие обозначения: 1 — трасса передвижения робокаров; 2 — робокар; 3 — устройство автоматической смены спутников; 4 — участок механической обработки; 5 — участок доставки заготовок на склад; 6 — кран-штабелер; 7 — многоярусный склад с автоматическим складированием и поиском; 8 — конвейер готовых деталей; 9 —

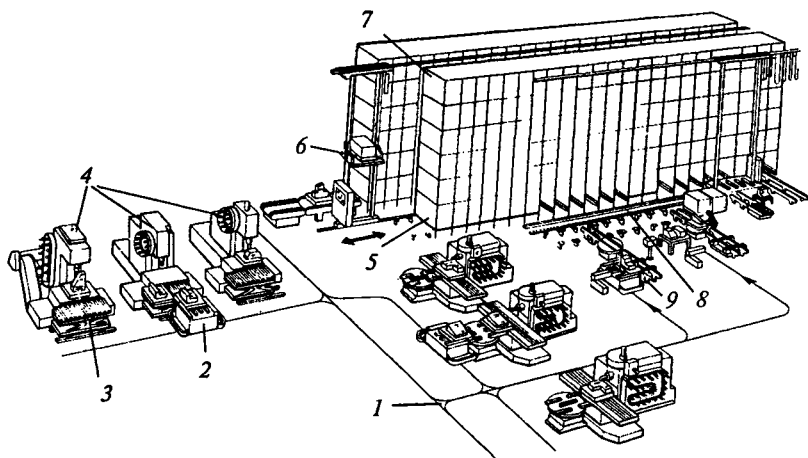


Рис. 5.41

подготовительный участок. Для обслуживания шести входящих в ГПС роботизированных технологических комплексов, созданных на базе трех токарных обрабатывающих центров, многоцелевого, кругло- и плоскошлифовального станков, в складе предусмотрено 543 стеллажа. Все станки оснащены ЧПУ типа CNC и обслуживаются двумя робокарами модели Roveatran фирмы «Poivak Automaiten».

Для привода робокаров обычно используют электродвигатели постоянного тока со смешанным возбуждением. Скорости движения от 30 для небольших робокаров до 60 м/мин для большинства типов, используемых в механических цехах. Обычно в робокарах применяют рекуперативное торможение и механическое торможение с помощью электромагнитов.

На автоматизированном участке металлообработки фирмы «Murata» применяют робокары с индуктивным управлением, которые имеют возможность поворота на угол  $90^\circ$ , а некоторые даже на угол  $360^\circ$ . Обычно индуктивный кабель размещают в полу цеха в узких траншеях шириной 3... 10 мм на глубине 10... 200 мм. Индуктивное управление робокарами обеспечивается подаваемым по индуктивному кабелю переменным током низкой частоты. Вокруг кабеля возникает концентрическое электромагнитное поле. На робокаре установлены две отклоняющие катушки, регистрирующие напряжение, подаваемое на управляющее устройство робокара. Для сохранения постоянства перемещения робокара вдоль кабеля управляющее устройство непрерывно воздействует на управляющий двигатель для того, чтобы устранить разность напряжений между двумя катушками.

Применяют робокары с тремя, четырьмя и восемью колесами.

На некоторых робокарах устанавливают систему управления по световому лучу. Луч освещает выполненную на полу цеха флуоресцирующую полосу или уложенную на нем флуоресцирующую ленту. Фотодатчики регистрируют флуоресценцию и передают полученные сигналы на отклоняющие катушки робокара.

Кроме возможности перемещения робокара вдоль индуктивного кабеля нередко требуются сведения о его местонахождении и наличии груза. Для получения подобной информации в полу цеха в определенных местах устанавливают постоянные магниты. Такие места находятся, например, до пересечения трасс или непосредственно перед позицией загрузки-разгрузки. Для передачи управляющих сигналов перемещающимся робокаром в пол цеха могут быть вмонтированы также переключаемые катушки.

О наличии груза на робокаре сигнализируют фотоэлектрические датчики или конечные выключатели. Когда робокар прибывает на рабочую позицию станка, готовность к его приему определяется с помощью различных датчиков, например инфракрасных. После приема сигнала о готовности позиции (станции) робокар разгружается, а по окончании загрузочно-разгрузочных ра-

бот производится дальнейший обмен сигналами о готовности тележки к перемещению.

Для загрузки робокаров применяют несколько различных систем, простейшей из которых является встроенный гидравлический подъемник. Робокар с опущенной платформой входит между двумя опорными направляющими спутниками, затем приподнимает платформу, чтобы снять спутник с направляющих, и выходит обратно. Такая система пригодна для транспортирования спутников со складов на подготовительные участки или к промежуточным накопителям, но не может применяться при наличии на станках устройств автоматической смены спутников. Робокары могут быть также снабжены роликами, устанавливаемыми на их приемной площадке. Для перемещения спутника по этой площадке можно использовать ролики с приводом или без него. В последнем случае требуется толкатель или съемник. В робокар, транспортирующий спутники на станки, оснащенные устройствами автоматической смены спутников, следует встроить толкатель или съемник. Спутник можно снять с робокара также с помощью двух выдвигающихся направляющих. При наличии большого числа загрузочных позиций выгодно встраивать загрузочное устройство непосредственно в робокар.

Управление робокарами осуществляется от ПК или технологического контроллера. Управление планированием маршрута робокара производится с помощью установленного на нем контроллера.

Кроме робокаров могут применяться транспортные тележки, которые перемещаются по стальным рельсам, прикрепленным к полу цеха. Для направления роликов тележки служит центральный рельс. Тяговое усилие тележки обеспечивает электродвигатель переменного тока. Загрузочно-разгрузочное устройство имеет гидравлический привод. При подъезде к рабочей позиции станка тележка считывает установленные на полу цеха кодовые пластины, и ее управляющее устройство останавливает тележку на соответствующей позиции. Тележки могут передвигаться вперед и назад только по прямой.

Рассмотрим функциональную схему робототехнического комплекса в составе автоматизированного участка металлообработки (рис. 5.42) [9].

Координирующий ПК, на базе которого реализуются задачи управления, выдает оптимальную программу запуска деталей на обработку в устройство управления складом УУС, которое реализуется на базе технологического контроллера; УУС выдает программы обработки деталей на технологическом оборудовании и управляет процессом выдачи (приема) деталей со склада на загрузочно-разгрузочное место 3М склада и транспортной системы ТС. Если ТС не оборудована манипулятором, промышленный ро-

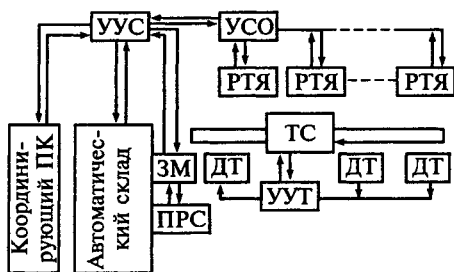


Рис. 5.42

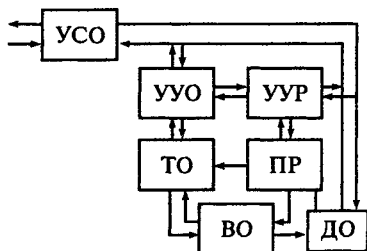


Рис. 5.43

бот склада ПРС загружает ТС. Затем управление передается устройству управления транспортом УУТ, которое в соответствии с информацией, поступающей от датчиков транспорта ДТ, обеспечивает обслуживание роботизированных технологических ячеек РТЯ. В состав РТЯ (рис. 5.43) входят непосредственно участвующее в процессе производства автоматическое технологическое оборудование ТО, промышленные роботы ПР, вспомогательное оборудование ВО, датчики состояния оборудования ДО, устройство управления ПР УУР и устройство управления оборудованием УУО.

В дальнейшем по сигналам, поступающим от ДО через устройство связи с объектом УСО в устройство управления складом, выдается определенная деталь для РТЯ и задается адрес движения ТС.

Автоматическую работу склада обеспечивает система управления, построенная на основе ПК. Исходными данными для организации управления служат плановые задания на подготовку и передачу грузов на каждое рабочее место, поступающие от подсистемы оперативно-календарного планирования.

В структуру управления транспортно-складского комплекса (ТСК) входят следующие основные элементы: пункты ввода и вывода грузов, оснащенные специализированным оборудованием для обработки грузов и устройствами приема и передачи информации; роботы-штабелеры; транспортные системы.

Схема системы управления ТСК представлена на рис. 5.44 [9]: УУРШ — устройство управления роботом-штабелером; РШ — робот-штабелер; СК — стеллажная конструкция; ПОГ — пункт обмена грузами; УУТС — устройство управления транспортной системой; УУ — устройство управления РТЯ; ПВВГ — пункт ввода-вывода грузов с РТК; УОИ — устройство обмена информацией.

По заявкам РТЯ на доставку инструмента или заготовок, выгрузку готовой продукции или технологических отходов в соответствии со сменно-суточным заданием, поступающим с уровня оперативно-календарного планирования, УУС выдает задание УУРШ, которое управляет работой робота-штабелера. Одновре-

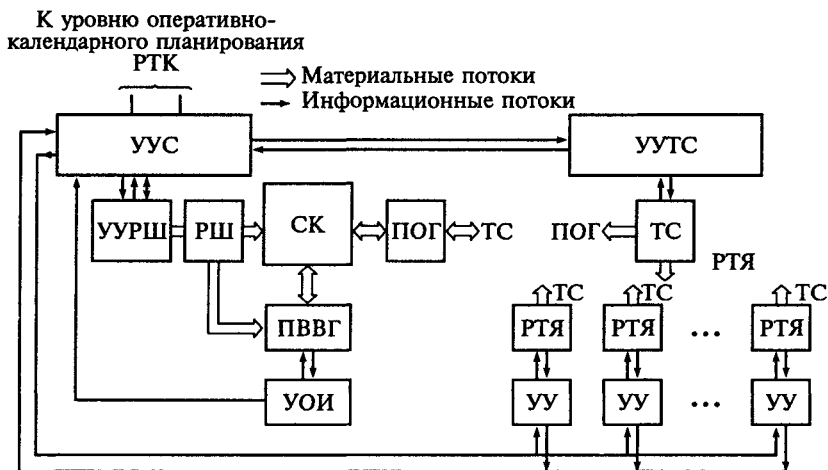


Рис. 5.44

менно УУС выдает соответствующие задания на УУТС, управляющие работой транспортных систем. Робот-штабелер по командам УУРШ осуществляет все операции по приему и выдаче грузов. Транспортные системы обеспечивают выполнение всех операций по транспортированию грузов между складом и РТЯ. ТСК может функционировать в режиме внешнего обмена материальными потоками, который осуществляется РШ с помощью ПВВГ и УОИ в свободное от работы по обслуживанию РТЯ время.

#### 5.6.4. Автоматизированный комплекс с многопозиционным прессом

Автоматизированный комплекс представляет собой автономный центр для штамповки деталей фасонного профиля (рис. 5.45) [53]. На рис. 5.45 приняты следующие обозначения: 1 — устройство автоматической смены штампов с блокированной позицией; 2 — устройство поворота заготовок на угол 180°; 3 — выдвигная подштамповочная плита; 4 — многопозиционный пресс.

Центр включает в себя также устройство для подачи полосы (ленты) из рулона, склад для хранения материала. К вспомогательным механизмам комплекса относятся механизмы перемещения заготовок на столе, транспортирования готовых изделий и др. Управление центром осуществляется от ПК. Пресс может программироваться и управляться автоматически и вручную. Перед пуском пресса оператор каждый раз вводит в управляющее устройство несколько параметров, среди которых подлежащее выпуску количество деталей данного типоразмера и закрытая высота

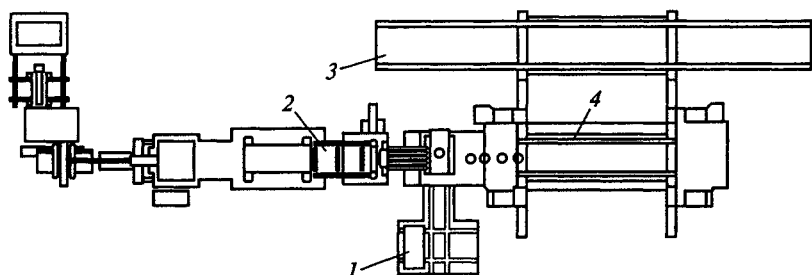


Рис. 5.45

штампа. Эти параметры могут вводиться автоматически и дистанционно.

Собственное управляющее устройство имеет каждый участок центра, а также транспортная система. В задачи ПК входит синхронизация работы различных агрегатов участка, например, подавателей, пресса с ЧПУ и разгрузочного устройства.

На одном конце его транспортной системы на складе расположены рулоны стальной полосы. Для их передачи от склада к устройству подачи рулона в пресс служит система манипулирования. Непрерывность процесса между этим устройством и прессом достигается встраиванием установок для обрезки и сварки рулонов: первая обеспечивает обрезку и удаление использованного рулона, а вторая — приваривание начала нового рулона к концу предыдущего.

Вдоль пресса установлены комплекты штампов, которые меняют автоматически после смены типоразмера изделия.

На рис. 5.46 показана структурная схема системы управления гибким многопозиционным прессом, в которой: А — цепь управления подавателем металла; Б — цепь управления длиной подачи; В — цепь управления штамповым стеллажом; Г — сигналы системы контроля качества продукции; Д — цепь управления автоматической регулировкой высоты штампа; Е — цепь управления выталкивателем деталей; Ж — цепь управления зажимом заготовки; З — сигналы поперечного направления полосы; И — команды на автоматическую регулировку; 1 — подаватель рулонов; 2 — штамповый стеллаж; 3 — устройство для смены штампов; 4, 6 — подаватели листового металла; 5 — универсальный пресс; 7 — выбрасыватель отходов; 8 — центрователь кромки заготовки.

Штамповочный центр выполнен на базе многопозиционного пресса с подвижными штамподержателями, выдвигающимися с одной его стороны. Вдоль пресса расположен трехпозиционный конвейер с тремя комплектами штампов.

Стол пресса, на котором может быть установлен лист размерами  $0,914 \times 1,83$  м, может перемещаться по осям  $X$  и  $Y$ , поэтому





К бумаго- и картоноделательным комплексам относятся бумаго- и картоноделательные машины, состоящие из ряда функциональных частей — секций, в которых непрерывно осуществляется формирование бумажного или картонного полотна, придание ему требуемых качественных свойств и характеристик. Основными параметрами, характеризующими бумаго- и картоноделательные комплексы, являются скорость и ширина вырабатываемой бумаги или картона. Наиболее широкими и быстродействующими являются машины, предназначенные для выработки газетной бумаги. Ширина бумажного полотна, получаемого на них, превышает 10 000 мм, скорость привода достигает 2000...2500 м/мин. При этом установленная мощность привода машины 7...8 МВт.

К отделочным агрегатам относятся меловальные машины, продольно-резательные станки, суперкаландры, на которых осуществляется окончательная отделка, резание и намотка продукции в рулоны товарного размера. В отличие от бумаго- и картоноделательных комплексов, отделочные агрегаты характеризуются циклическим режимом работы. Вследствие этого, расчетная скорость отделочных агрегатов в 1,5...2 раза превышает максимальную рабочую скорость бумаго- и картоноделательных машин. В настоящее время наблюдается тенденция к объединению бумаго- и картоноделательных комплексов и отделочных агрегатов, например интегрирование меловальных установок в бумагоделательные машины, производящие высококачественные сорта бумаги для офсетной печати.

Производство бумаги начинается с подготовки сырьевых материалов, таких как древесная масса, целлюлоза и брак для получения бумажной массы. Перечисленные составляющие массы после прохождения необходимой обработки собираются в бассейнах, где они смешиваются, образуя массу заданной композиции. Готовая масса высокой концентрации аккумулируется в машинном бассейне, откуда подается к смесительному насосу. В смесительном насосе густая масса разбавляется оборотной водой, поступающей с регистровой части бумагоделательной машины. Разбавленная масса проходит очистку, а затем через напускное устройство подается на машину.

Современные бумагоделательные машины обычно состоят из напускного устройства, сеточного стола, прессовой и сушильной частей, каландра и наката. Технологическая схема бумагоделательной машины показана на рис. 5.47. Поступление массы на сетку обеспечивает напускное устройство. В его задачи входят поддержание однородности подаваемой массы и ее равномерное распределение по ширине машины. На сеточном столе начинается процесс формирования бумажного полотна, характеризующийся интенсивным обезвоживанием массы для придания полотну

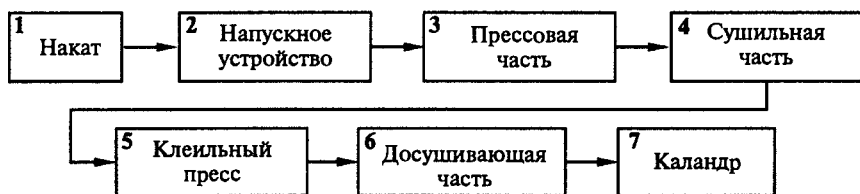


Рис. 5.47

начальной прочности. Сформированное полотно подвергается дальнейшему обезвоживанию в прессовой части, состоящей из нескольких прессов, механически связанных прессовыми сукнами. Далее бумажное полотно поступает в предварительную сушильную часть, где оно прижимается сушильными сетками к поверхности вращающихся нагретых цилиндров, что сопровождается интенсивным испарением оставшейся свободной влаги с поверхности полотна. После предварительной сушки производится поверхностная проклейка бумажного полотна в клеильном прессе с последующей передачей бумаги в досушивающую часть. В этой секции полотно досушивается с удалением связанной влаги, после чего бумага имеет конечную влажность 5... 8%. После каландрирования полотно приобретает необходимые гладкость, лоск, плотность. Далее полотно наматывается в рулоны заданного диаметра на накате и проходит последующую обработку на отделочных агрегатах, где осуществляются мелование, резание, маркировка, упаковка и транспортировка готовой продукции на склад.

Технологическая схема производства картона почти не отличается от описанной выше схемы производства бумаги. Разница заключается в том, что картон является многослойным композиционным материалом, для внутренних слоев которого применяются менее дефицитные волокнистые материалы (макулатурная масса, небеленые полуфабрикаты), чем для наружных слоев. Для выпуска многослойного картона картоноделательные машины оснащаются несколькими напускными устройствами, в которых осуществляется формование и обезвоживание элементарных слоев картона. После соединения элементарных слоев сформированное картонное полотно передается в прессовую часть и проходит дальнейшую обработку в описанном выше порядке.

### 5.7.2. Технологические комплексы полиграфического производства

Основное назначение печатного оборудования отражено в его названии и заключается в выполнении технологического процесса печатания, т. е. многократного получения идентичных оттисков

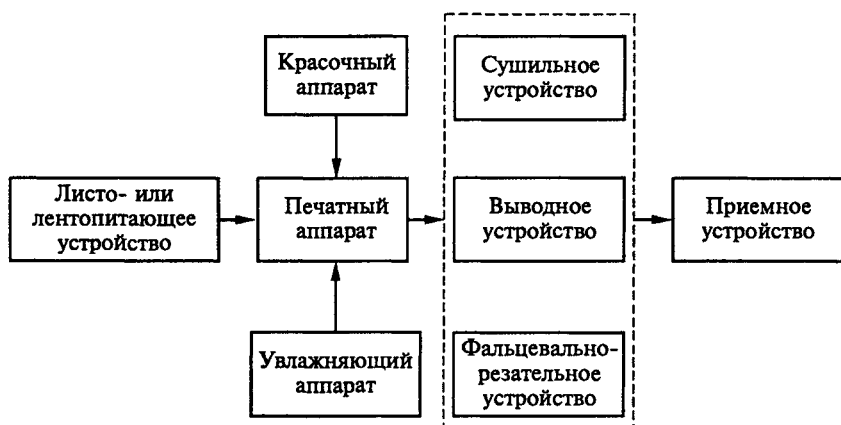


Рис. 5.48

в процессе нанесения краски на материал. Кроме использования по основному назначению оно приспособляется также для тиснения, высекания и перфорации материала.

Структурная схема печатной машины изображена на рис. 5.48, где штриховой линией обведены узлы, которые в отдельных видах машин могут отсутствовать. Название устройства соответствует выполняемому им технологическому процессу.

Классификация печатных машин, отражающая лишь главные принципы их построения, представлена на рис. 5.49. По виду обрабатываемого материала (ленты, разматываемой с рулона, или листов, подаваемых из стопы) машины называют соответственно

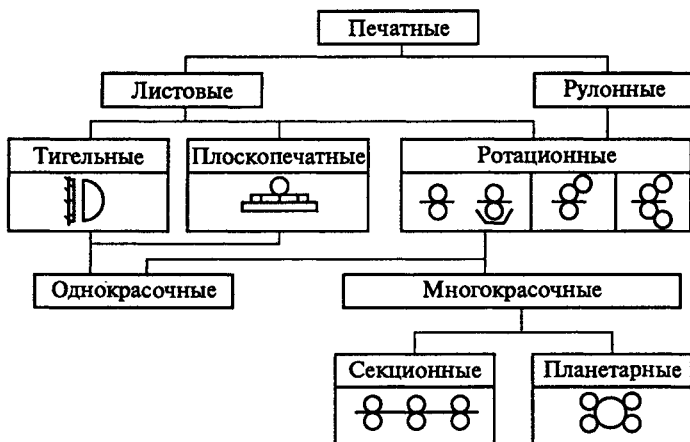


Рис. 5.49

рулонными или листовыми. По форме собственно печатающих поверхностей они делятся на ротационные, плоскочечатные и тигельные.

Машины, в которых печатающие органы выполнены в виде цилиндров, называют *ротационными*. Машины, в которых рабочая поверхность печатной формы расположена в плоскости, а давящая поверхность цилиндрическая, называют *плоскочечатными*.

Машины, в которых обе рабочие печатающие поверхности плоские, называют *тигельными*.

В зависимости от числа получаемых на оттиске в машине красок ее называют многокрасочной или однокрасочной. Плоскочечатные и тигельные машины выпускают в виде однокрасочных автоматов для обработки листовых материалов.

Ротационные машины строят исключительно в виде автоматов для печатания на листовых или ленточных материалах. При этом широкое распространение получили одно- и многокрасочные машины.

Многокрасочные машины, составленные из однотипных однокрасочных печатных секций, называются секционными, а многокрасочные машины, имеющие один общий печатный цилиндр, вокруг которого установлены другие цилиндры (см. рис. 5.49), — планетарными.

Плоскочечатные и тигельные машины строят для высокого способа печати, а ротационные — для высокого, офсетного и глубокого способов печати.

Кроме перечисленных выше распространены двухсторонние ротационные машины, в которых материал одновременно или последовательно запечатывается с двух сторон.

Наиболее высокую скорость работы имеют рулонные ротационные машины, так как большинство механизмов этих машин являются механизмами непрерывного однонаправленного движения с постоянной скоростью. Наименьшей скоростью обладают тигельные и плоскочечатные машины, имеющие цикловые механизмы привода массивного печатного аппарата и вследствие этого подвергающиеся значительным инерционным нагрузкам, которые и определяют их скоростные возможности. Листовые ротационные машины по своим скоростным возможностям занимают промежуточное положение между рулонными ротационными и плоскочечатными машинами.

### **5.7.3. Система автоматизации картоноделательной машины**

Схема картоноделательной машины показана на рис. 5.50. В технологической части машины *I* из четырех машинных бассейнов покровного слоя, подслоя, среднего и нижнего слоев густая масса

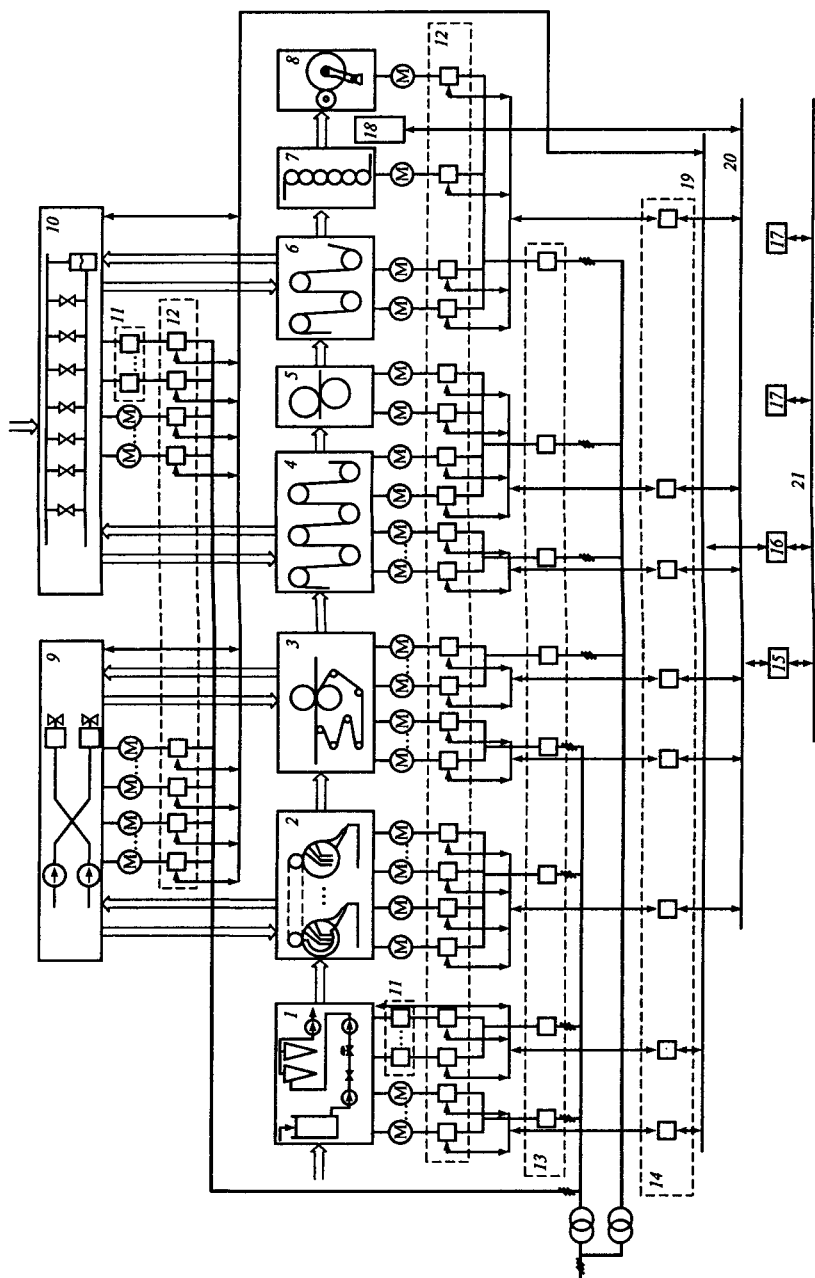


Рис. 5.50

подается с помощью массных насосов в кольцевые трубопроводы, давление в которых регулируется изменением скорости электроприводов насосов. Далее из кольцевых трубопроводов через задвижки переключения потоков масса с помощью первых смесительных насосов подается на вихревые конические очистители, где под действием центробежной силы из нее удаляются тяжелые частицы. После очистки масса поступает на вторые смесительные насосы, в которых густая масса смешивается с водой до достижения заданной концентрации. Вода в смесительные насосы поступает из сборников подсеточной воды. Поток массы регулируется перед первыми смесительными насосами при помощи клапанов 11. На выходе вторых смесительных насосов масса может подвергаться дополнительной очистке после пропускания ее через перфорированное сито. Далее масса поступает в потокораспределители формеров.

Сеточная часть машины 2 состоит из восьми формеров, в комплект которых входят восемь напусковых устройств для подачи массы. Формование элементарного слоя картона осуществляется на участке поверхности формера, ограниченного верхней регулируемой и нижней неподвижной губами. Процесс формования и обезвоживания слоя осуществляется в вакууме, создаваемом отсасывающей камерой, установленной внутри формера. Сформированный элементарный слой картона соединяется с движущимся съемным сукном и поступает под отжимной вал. Отжим служит для обезвоживания образовавшегося полотна картона, передачи на съемное сукно элементарных слоев и соединения их в единое картонное полотно. Вакуум в отсасывающих зонах формеров и цилиндрах прессов создается с помощью вакуумных вентиляторов и насосов, относящихся к технологической части машины 9. Вакуум в отсасывающих зонах формеров и отсасывающем шабере создается двумя вакуумными вентиляторами. Вакуумная система прессовой части машины состоит из семи вакуумных насосов.

Дальнейшее обезвоживание картонного полотна и улучшение качества его поверхности происходит в прессовой части 3, которая состоит из поворотного пресса, отсасывающего гауч-пресса, трехвального комби-пресса, пресса с желобчатым валом и пресса Нипко.

После прессовой части полотно поступает в сушильные части 4 и 6, где удаляется оставшаяся влага. Движущееся картонное полотно прижимается к нагретой поверхности цилиндров сушильными сетками. Сушильная часть состоит из восьми групп: первая приводная группа включает в себя 11 сушильных цилиндров, приводные группы со второй по седьмую имеют по 12 сушильных цилиндров каждая, восьмая приводная группа состоит из 10 сушильных и двух холодильных цилиндров.

Сушильные части машины разделены клеильным прессом 5, установленным между шестой и седьмой приводными группами.

Картон поступает на клеильный пресс при сухости 80...85 %. Он непрерывно орошается с обеих сторон клеем и проходит через валы пресса. После клеильного пресса картонное полотно, во избежание образования складок, равномерно расправляется по ширине разгонным валом и поступает в досушивающую часть 6, где обеспечивается сухость ( $93\frac{1}{2}$ %) и выравнивается влажность поверхностного и нижнего слоев. В конце сушильной части картон охлаждается на двух холодильных цилиндрах и увлажняется на 1...2 % для повышения его гладкости при каландрировании, которое производится в шестивальном каландре 7.

С каландра картон поступает на периферический накат 8 с пневматической системой прижима, где выполняется его намотка в тамбур.

Пароконденсатная система 10 обеспечивает принудительную циркуляцию пара, обеспечивающую постоянство заданного теплового режима в каждой группе сушильных цилиндров, а также возможность использования тепла поступающего пара и высокую теплопередачу в результате принудительного отвода неконденсируемых газов.

Картоноделательная машина имеет предварительную и дополнительную (досушивающую) сушильные части. Дополнительная сушильная часть осуществляет примерно 40 % всей сушки и предназначена для удаления оставшейся влаги после прохождения полотном клеильного пресса. Сушка картона производится при постепенном повышении температуры поверхности цилиндров. Для этого вся сушильная часть разделена по пару на пять групп, три из которых образуют предварительную сушильную часть и две — дополнительную. Пар, поступающий по общему трубопроводу из котельного цеха, распределяется между пятью группами в заданном соотношении. Третья, четвертая и пятая группы имеют раздельное пароснабжение верхних и нижних цилиндров с целью выравнивания влажности верхних и нижних слоев картона. В сушильных цилиндрах конденсируется необходимое для сушки картона количество пара. Образующийся конденсат и необходимое для обезвоживания количество пара отводятся через сифон по сборному трубопроводу к соответствующему сепаратору. Для регулирования давления пара в сушильных группах используются электромагнитные клапаны 11 и термокомпрессоры.

В частях 2... 8 машины имеются 27 силовых приводных точек. Мощности электроприводов от 37 кВт для валов клеильного пресса до 200 кВт у каландра и центрального вала трехвальцового пресса. Мощности электроприводов насосов и задвижек в частях 1, 9, 10 машины находятся в пределах от 0,5 до 90 кВт. Электропитание силовых электроприводов выполняется от двух трансформаторов мощностью по 1600 кВт·А, преобразующих напряжение 6 кВ в 380 В. Многодвигательная система электроприводов выполнена в соот-

ветствии с концепцией распределенной системы ACS 600 MultiDrive (см. гл. 2).

Энергетическая магистраль комплекса включает в себя питающие трансформаторы, неуправляемые выпрямители с фильтрами 13, автономные инверторы напряжения 12. Распределенная система управления включает в себя контроллеры управления группами электроприводов 14, объединенные информационной полевой шиной, технологические контроллеры 15 и 16, станции оператора 17.

**Компьютерные средства автоматизации.** Система управления машиной многофункциональна, она решает задачи управления качеством и простого локального регулирования параметров процесса. Система состоит из аппаратуры и программного обеспечения, которые помогают оператору управлять технологическим процессом.

Аппаратура, представленная на функциональной схеме (рис. 5.51) аппаратной части системы, состоит из следующих основных устройств: технологических контроллеров 15, 16; операторских станций 17; сканирующей интеллектуальной платформы (сканера) 18 с датчиками массы, влажности и толщины; принте-

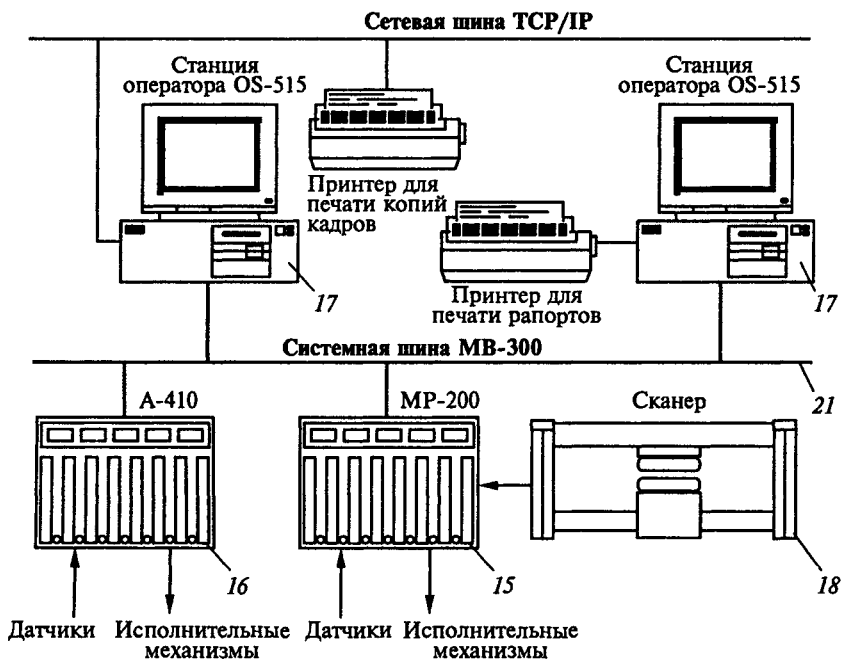


Рис. 5.51



ров; системной шины 21; сетевой шины TCP/IP (на рис. 5.50, 5.51 нумерация позиций одинаковая).

Технологические контроллеры предназначены для получения информации о состоянии технологического процесса от различных датчиков, обработки полученной информации в соответствии с заложенной программой, выдачи управляющих воздействий. К технологическому контроллеру 15 (см. рис. 5.50) подключен сканер, датчики и исполнительные механизмы постоянной части машины. К технологическому контроллеру 16 подключены датчики и исполнительные механизмы для подачи густой массы и химикатов, пароконденсатной и вакуумной систем (19, 20 — информационные шины).

Станции оператора 17 предназначены для отображения информации о технологическом процессе, заданий режимов управления процессом и ввода заданий параметров процесса.

Сканер, или интеллектуальная платформа 18, предназначен для перемещения установленных на нем датчиков массы, влажности и толщины движущегося картонного полотна. Для измерения используется радиоактивный источник излучения частиц. Сканер оснащен контроллером, который обрабатывает информацию, поступающую с датчиков, и передает по специальной связи в технологический контроллер 15. Для обеспечения постоянной точности измерения контроллер автоматически выводит датчики за край картонного полотна и проводит стандартизацию. Сканер в режиме непрерывного сканирования собирает информацию о продольном и поперечном профиле картонного полотна по массе, влажности и толщине.

В системе используются два принтера: струйный цветной для печати копий кадров; матричный, подключенный к станции оператора на накате, для печати рапортов.

Информация от технологического контроллера на станцию оператора и обратно передается по системной шине. Сетевая организация системы позволяет выводить на операторскую станцию информацию с любого технологического контроллера, подключенного к сети.

Сетевая шина предназначена для подключения сетевого принтера и обеспечения возможности подключения к другим системам управления, учета и т. д.

Программное обеспечение системы включает в себя следующие основные программы-модули управления: массой 1 м<sup>2</sup> картонного полотна вдоль машины; влажностью картонного полотна вдоль машины; координированного сушкой картонного полотна; координированного изменения скорости машины; восемью формерами; подачей массы по слоям; концентрацией; локальным регулированием. Система разделена на две части: DCS (Digital Control System) — локальная цифровая система управле-

ния и QCS (Quality Control System) — система управления качеством. Первая реализует следующие функции: проверку состояния оборудования перед пуском; пуск и остановку оборудования (локальных исполнительных устройств — электроприводов, насосов, клапанов); контроль состояния оборудования в процессе рабочего функционирования. Вторая реализует: регулирование температуры и давления пара сушильных групп, технологических переменных (влажности и массы  $1 \text{ м}^2$  картонного полотна); подачу массы по слоям, управление концентрацией; автоматическую оптимизацию процесса в режиме рабочего функционирования.

Модуль управления массой  $1 \text{ м}^2$  картонного полотна вдоль машины обеспечивает функции управления сканированием и по информации, полученной со сканера, рассчитывает текущее значение  $1 \text{ м}^2$  массы для регулятора количества массы. Управляющее воздействие в виде задания суммарного расхода густой массы (перед смесительными насосами) поступает в систему управления распределением подачи массы по слоям.

Модуль управления влажностью вдоль машины осуществляет функции управления сканированием. Из полученного со сканера значения влажности рассчитывается текущее значение влажности для регулятора влажности. Управляющее воздействие, в виде задания давления пара, поступает в регулятор давления пара в сушильной группе V. При достижении предельных значений (минимального или максимального) задания в сушильной группе V выдается новое задание в сушильную группу III для вывода пара в сушильной группе V в рабочий режим.

Координированное управление сушкой уменьшает потери тепла в процессе сушки во время обрыва полотна и уменьшает вероятность пересушивания при перезаправке. Когда происходит обрыв, все контуры управления паром снижают задания и остаются постоянными. Задание определяется в виде доли предшествовавшего обрыву задания или в виде определенного заранее абсолютного значения давления. К концу обрыва все задания снова автоматически меняются до значений, предшествовавших обрыву.

Координированное управление изменением скорости обеспечивает координированное изменение скорости с упреждением заданий в другие контуры управления продольным профилем полотна для обеспечения стабильности показателей качества при изменении производительности (скорости) машины; позволяет программно изменять задания локальным контурам управления и координировать эти изменения заданий с учетом различия транспортных запаздываний и динамических свойств контуров, стабилизируя этим качество картона при изменении скорости машины.

Система управления формерами регулирует соотношение струя/сетка на каждом формере для обеспечения механических свойств картона при смене сорта и увеличении скорости машины.

Система управления подачей массы по слоям предназначена для обеспечения подачи густой массы к смесительным насосам так, чтобы: поддерживать заданный суммарный расход массы; при изменении оператором расхода массы на один из формеров, суммарный расход массы оставался неизменным; компенсировать колебания концентрации поступающей массы. Система управления подачей массы при поступлении нового задания от верхних уровней управления распределяет изменение задания на формах, определенных оператором.

Система последовательного компенсационного управления концентрацией массы предназначена для подстройки показаний датчиков концентрации по лабораторным анализам, а также дополнительной фильтрации значений концентрации перед передачей данных в систему управления подачей массы.

Система локального регулирования предназначена для построения локальных контуров регулирования параметрами технологического процесса. На ее базе построено непосредственно цифровое регулирование параметров пароконденсатной системы, системы управления густой массой и нижнего уровня управления мокрой частью машины.

Управление процессом осуществляется со станций оператора, в состав которых входит монитор, специальная клавиатура и трекбол. На мониторе отображается вся информация о процессе в виде функциональных кадров. Система управления дает оператору возможность: видеть состояние параметров технологического процесса; управлять параметрами технологического процесса в различных режимах, начиная с ручного управления клапанами и другими исполнительными механизмами до автоматического управления массой  $1 \text{ м}^2$  картонного полотна, влажностью и т. д.; отображать предшествующее состояние технологического процесса в виде трендов (графиков изменения значений параметров во времени), на которых можно произвольным образом совмещать одновременно до шести параметров; печатать рапорта; печатать копию экрана.

**Реализация управления на нижнем уровне.** Системы управления нижним уровнем обеспечивают реализацию заданных значений переменных в локальных контурах регулирования. Эти системы управления могут также служить интерфейсом пользователей, находящихся на более высоком уровне управления. Системы управления на нижнем уровне получают задающие значения для исполнительных устройств от оператора посредством человеко-машинного интерфейса или от внешней программы, каковой может являться программа реализации верхнего уровня управления. В системе реализованы следующие функции управления на нижнем уровне:

P, PI, PD или PID алгоритмы управления;

возможность задания параметров управления со станции оператора;

осуществления нескольких режимов управления (балансового, ручного, автоматического или внешнего);

назначения приоритетов при выборе режимов управления;

управления с различными методами отслеживания заданного значения;

регулирования скорости изменения заданного значения;

установки пределов для значений заданий и выходных сигналов;

безударного перехода от одного режима управления к другому; сигнализации и управления событиями.

В режиме ручного управления возможно ручное управление локальным контуром. Режим автоматического управления — автоматический режим, в котором задание для локального контура поступает и изменяется со станции оператора. Изменение задания контроллера в этом режиме происходит в определенном темпе. В режиме внешнего управления задание для локального контура поступает от внешней программы.

Системы управления нижним уровнем, включающие в себя системы управления исполнительными механизмами, получают задания от систем управления верхнего уровня, которые реализуют регулирование технологических переменных (массы, влажности) на основе упреждающей коррекции и коррекции по обратной связи.

**Реализация управления на верхнем уровне.** Системы управления верхним уровнем выполняются как комбинированные системы, в которых коррекция технологической переменной выполняется по цепи обратной связи и возмущению.

Коррекция по возмущению выполняется упреждающей. При коррекции по обратной связи на входе процесса производится сравнение выходной величины процесса и задания, после чего рассогласование обрабатывается системой управления. Упреждающая коррекция используется для снижения воздействия на процесс возмущений. Если некоторые из этих возмущений могут быть измерены, то возможно управлять процессом так, чтобы последствия этих возмущений не присутствовали на выходе. Например, изменение концентрации потока густой массы вызывает изменение основной массы на накате. Вместо того чтобы ждать сигнала обратной связи, рассчитывается способ регулирования входного параметра процесса (регулируется сам поток густой массы) для нейтрализации эффекта изменения концентрации (меньше концентрация, больше поток). В этом случае эффективность коррекции не может быть проверена, поэтому приходится полагаться на соотношения, заложенные в системе и используемые для расчетов необходимых изменений, а также на заранее рассчитанную длительность этих изменений. Например, при изменении скорос-



ти машины без изменения вида продукции меняется пропускная способность машины (больше или меньше картона производится в единицу времени). Это требует изменений потока густой массы и давления пара для поддержания текущей основной массы и влажности при новой скорости. Основываясь на соотношениях, заложенных в системе в виде модели технологического процесса, можно заблаговременно определить, какое количество пара и густой массы необходимо изменить для работы с новой скоростью. Таким образом, для предотвращения нарушения процесса в случае управления по обратной связи можно воспользоваться информацией о будущих изменениях в процессе при переходе на новую скорость. Компенсирующие корректирующие воздействия для потока густой массы и пара рассчитываются так, что свойства вырабатываемой продукции не меняются в течение и после изменения скорости.

Наравне с использованием упреждающей коррекции применяется управление по обратной связи для поддержания задания контуров регулирования технологических переменных процесса в течение длинного периода времени. Динамическая модель, имеющаяся в системе управления процессом, учитывает запаздывание, которое может быть разделено на время задержки на мокрой части и в транспортных механизмах. Транспортное запаздывание зависит от скорости машины.

Рассмотрим процессы управления массой и влажностью полотна, координированного управления скоростью машины, используя функциональные схемы систем управления рис. 5.52, 5.53.

Системы управления массой и влажностью полотна (см. рис. 5.52) имеют ряд функциональных модулей и блоков, соответствующих структуре комбинированной системы.

В *модуле преобразования задания* происходит преобразование значения, заданного оператором, в формат, с которым оперирует система управления. В функционирующей системе управления задание находится в виде единиц сухой массы. Если оператор вводит новое значение основной (фактической) массы, то задание для системы управления в виде сухой массы рассчитывается по новому значению основной массы и влажности.

*Блок регулятора* объединяет модуль ПИ-регулятора с модулями управления заданием, режимами, проверкой на предельные значения сигналов. При изменении задания для системы управления новое задаваемое значение проверяется на соответствие допустимому диапазону задания. Если значение нового задания находится в пределах этого диапазона, то текущее значение задания изменяется до нового заданного значения в заранее определенном темпе. Если новое значение задания выходит за допустимый предел, то текущее задание изменяется до этого предела, и на станцию оператора поступает сигнал о превышении предела. Максимальное допустимое значение ошибки рассчитывается исходя

из коррекции по обратной связи и изменения задания. При изменении задания ошибка резко возрастает. При фиксировании чрезмерной ошибки на станцию оператора выдается соответствующее сообщение сигнализацией, а блок управления режимами останавливает работу блока регулятора.

Модуль управления режимами связывает регулятор с рабочим режимом контроллеров нижнего уровня, рабочим режимом сканера, а также выполняет функции остановки процесса управления при получении соответствующих сигналов модулей регулятора и человеко-машинного интерфейса (управление режимами станции оператора).

Модуль проверки осуществляет проверку задания контроллера на соответствие возможному диапазону реагирования исполнительного механизма. Если это значение выходит за допустимые пределы, то модуль проверки выдает сигнал на прекращение управления. Блок регулятора совместно с моделью процесса выполняет функцию компенсации транспортного запаздывания.

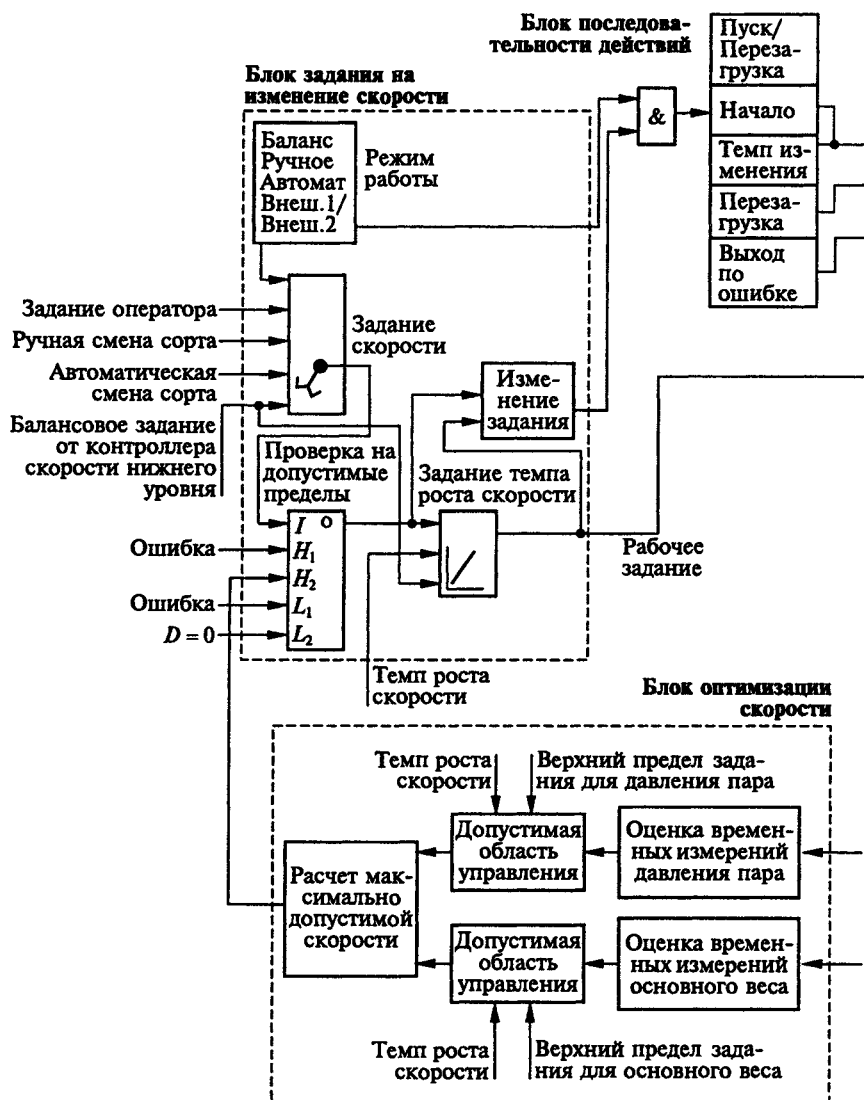
*Блок развязки* собирает в себе все текущие упреждающие корректирующие действия для исполнительных механизмов. Источниками этих корректирующих действий служат изменения технологических переменных процесса: сухой массы, влажности, изменения скорости. Так как технологические переменные взаимосвязаны между собой, то блок развязки обеспечивает условия квази-автономности управления каждой из переменных.

*Блок задания* на исполнительный механизм принимает сигналы заданий от блоков регулятора и развязки. В нем вырабатывается поправка к поступающим корректирующим сигналам в процессе координированного управления скоростью. Сформированное в результате управляющее воздействие, перед тем как поступить на регулятор исполнительного механизма, проверяется на соответствие допустимому диапазону значений задания. Если значение задания не входит в допустимый диапазон, то на станцию оператора поступает сообщение сигнализацией.

*В блоке модели процесса* на основе параметров процесса, таких как постоянная времени переходного процесса и время транспортного запаздывания, моделируется динамическая характеристика процесса. Время запаздывания рассчитывается в специально предназначенном для этого модуле на основе текущей скорости машины и транспортной дистанции от места расположения исполнительного механизма до сканирующей платформы.

*В модуле оценки ошибки* подлинная характеристика процесса сравнивается со смоделированной для определения ожидаемой ошибки. Эта ошибка в сочетании с измерениями характеристики процесса во времени используется для коррекции значения входного задания.

Процесс управления сухой массой включает в себя управление потоком сухой волокнистой массы при наличии изменений



концентрации густой массы. Координация концентрации производится регулированием задания для потока густой массы. Текущие измерения концентрации проходят фильтрацию с целью устранения присущего им шума. Вызванные изменениями концентрации упреждающие корректирующие воздействия для потока густой массы задерживаются во времени до момента прихода потока с измененной концентрацией к устройству регулиро-



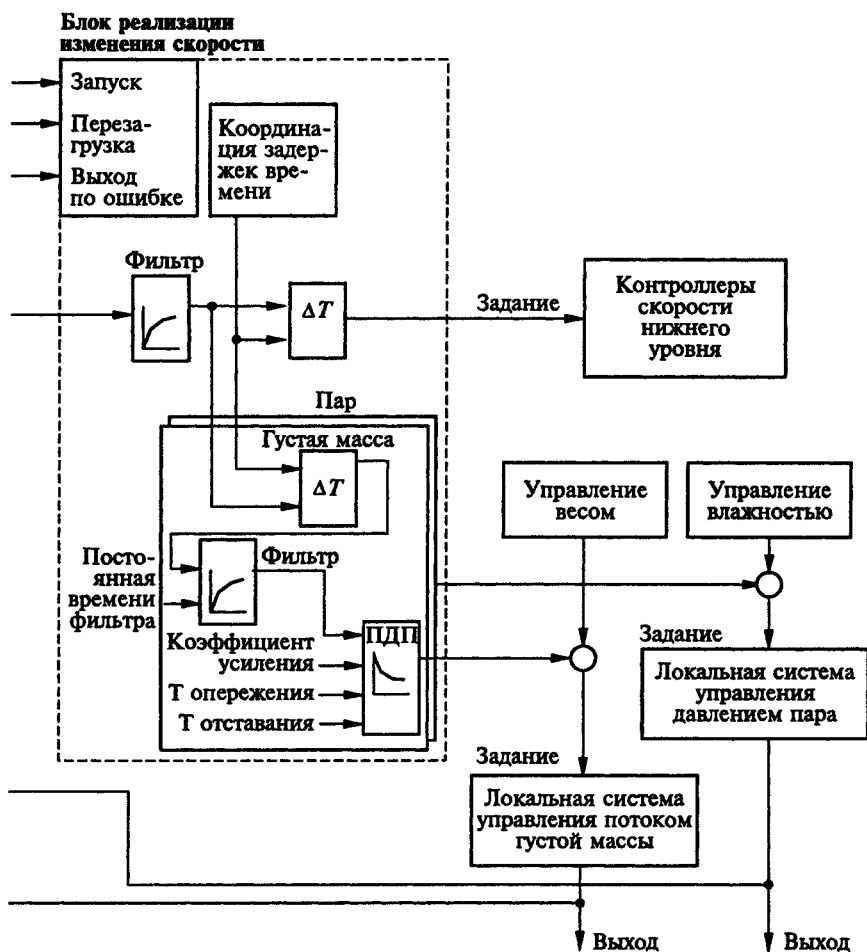


Рис. 5.53

вания потока густой массы. Объем трубопроводов между датчиком концентрации и устройством регулирования потока густой массы является заданным. На его основе система управления динамически рассчитывает время запаздывания в зависимости от потока густой массы. При этом между частичными изменениями концентрации и потока густой массы предполагается линейная зависимость.

В формерах осуществляется подача волокнистой густой массы на движущуюся сетку так, чтобы готовое картонное полотно имело необходимую прочность и отвечало требованиям по всем остальным параметрам. Свойства картонного полотна регулируются непосредственно изменением соотношения струя/сетка, которое представляет собой отношение скорости истечения густой массы из формера к скорости сетки. Соотношение струя/сетка изменяют, меняя скорость двигателей смесительных насосов формеров. При изменении скорости меняется напор струи и, следовательно, скорость ее истечения. Расчет и регулирование соотношения струя/сетка осуществляется технологическим контроллером. Для регулирования используется ПИ-регулятор.

Система координированного управления скоростью и оптимизации скорости (см. рис. 5.53). Система управления рассчитывает поправки заданий для задействованных в процессе исполнительных механизмов на основе взаимосвязей между переменными процесса с учетом динамики процесса. Координация производится с определенными выдержками времени, которые непрерывно рассчитываются с учетом текущей скорости машины. Для расчета максимально возможной скорости выполняются оценки допустимых пределов управления для исполнительных механизмов. В качестве верхнего предела задающего значения скорости рассматривается рассчитанное в текущий момент времени значение максимально возможной скорости.

Система координированного управления скоростью выдает управляющее задание на системы регулирования скорости нижнего уровня, которое включает в себя сигналы от блока задания на изменение скорости и упреждающие сигналы от других систем управления.

Блок оптимизации скорости выдает скорректированный сигнал на блок задания исходя из значения максимально допустимой скорости и поддерживает границы области заданий для систем управления нижнего уровня.

Рассмотрим основные функции и блоки системы координированного управления скоростью.

В задачи блока задания на изменение скорости входит управление: режимами работы, заданием, выходами. Блок может находиться в балансовом, ручном, автоматическом, внешнем 1 или внешнем 2 режимах управления. Управление заданием возможно только в автоматическом режиме или в режиме внешнего управления («Внешнее 2»). В режиме «Автомат» блок задания может управлять заданием при введении оператором нового значения скорости. При этом контроллер скорости нижнего уровня переходит в режим управления «Внешнее 1». Оператор может перевести контроллер координированного изменения скорости в режим ручного управления, выключив управление. Если это сделано во время

текущего изменения скорости, то изменение немедленно прекратится.

В режиме управления «Внешнее 1» блок задания получает задание от внешних функций управления процессом (смена сорта картона). В этот режим блок задания устанавливается по флагу (признаку) функции смены сорта. По окончании смены сорта блок переходит в режим ручного управления.

В режиме управления «Внешнее 2» контроллер координированного изменения скорости получает задание от блока оптимизации скорости. Переход блока в этот режим происходит при активизации функции оптимизации скорости. В этом случае задание может изменяться в соответствии с возможной областью управления исполнительными механизмами нижнего уровня.

Различают следующие виды заданий: оператора; от функции автоматической смены сорта; от функции ручной смены сорта; от функции оптимизации скорости; балансовое задание от контроллера скорости нижнего уровня. Когда задание отличается от текущего значения скорости, блок задания начинает процесс изменения скорости при условии, что он находится в режиме «Автомат». Перед тем как задание будет отработано, оно проверяется на соответствие допустимым пределам.

Когда блок задания находится в режиме управления балансовом, ручном или «Автомат», оператор в любой момент может ввести новое задание. При этом оно проверяется на соответствие допустимым пределам и, в случае его выхода за эти пределы, отклоняется с выдачей сообщения на дисплей станции оператора.

Когда блок задания находится в режиме «Внешнее 2», задание ему приходит от блока оптимизации скорости. При этом оператор не может ввести задание.

В процессе изменения скорости рабочее значение задания изменяется до значения, заданного оператором, со скоростью изменения, определенной параметрами настройки системы. Изменение продолжается до момента достижения заданного оператором значения. В процессе изменения скорости оператор может ввести новое значение.

Когда блок задания находится в режиме «Внешнее 1», по флагу смены сорта задание поступает от модуля автоматической или ручной смены сорта. При этом оператор не может ввести задание. Задание от автоматической или ручной смены сорта проверяется на соответствие допустимым пределам. Если новое задание выходит за один из пределов, его ограничивают этим пределом. В качестве верхнего предела используют расчетную максимально допустимую скорость, которая меняется с изменением параметров технологического процесса.

Если функция проверки задания на соответствие допустимым пределам не задействована, то в качестве ограничений использу-

ют жестко определенные верхний и нижний пределы задания. Обычно в качестве этих ограничений используют допустимые пределы задания для контроллера нижнего уровня, но могут также использоваться жестко запрограммированные пределы в программе координированного управления скоростью.

Если изменение скорости по какой-либо причине прерывается, то управление заданием «подстраивается» под балансовое задание от контроллера скорости нижнего уровня для того, чтобы избежать немедленного начала нового изменения скорости после выхода из состояния прерывания.

Когда блок задания не находится в режиме «Автомат», его выход отслеживает сбалансированное задание контроллера скорости нижнего уровня. Когда блок находится в режиме «Автомат», его выход тестируется на соответствие допустимым пределам выходного сигнала. Если появляется флаг, указывающий на то, что для контроллера скорости нижнего уровня появилось ограничение значения задания, то в качестве верхнего предела рабочего задания используют последнее текущее значение выходного сигнала блока задания. Это относится и к нижнему пределу выходного сигнала.

*Блок реализации изменения скорости* включает в себя модули координации задержек времени и расчета упреждающих воздействий для каждого используемого исполнительного механизма.

Программа блока реализации изменения скорости выполняется каждые 2 с. Выходной сигнал после каждого исполнения программы в качестве задания на изменение скорости подается на участвующие в процессе исполнительные механизмы. Другие компенсационные воздействия, такие как выравнивание давления пара в соответствии с изменением потока массы, обеспечиваются функциями управления, для которых данный исполнительный механизм является первичным. Например, давление пара при изменении потока массы компенсируется функциями управления массой и влажностью.

«Статус участвующих» координируемых исполнительных механизмов определяется следующим образом. Для того чтобы исполнительный механизм получил «статус участвующего», контроллер скорости нижнего уровня должен находиться в режиме управления «Внешнее 1» (получая задание от системы управления верхнего уровня), и для данного исполнительного механизма должна быть разрешена упреждающая коррекция скорости с помощью переключателя на экране настройки параметров скорости на станции оператора. Система координированного изменения скорости запоминает исполнительные механизмы, задействованные в изменении скорости.

Если в процессе изменения скорости условия функционирования какого-либо исполнительного механизма не могут выполняться, то происходит перезагрузка программы блока реализации изменения скорости, и ее выполнение прекращается. Если в про-

цессе изменения скорости эти условия выполняются для исполнительного механизма, который не был задействован в процессе изменения с начала процесса, то этот механизм не включают в число задействованных, но в дальнейшем при изменении скорости он получит «статус участвующего». Исполнительные механизмы, которые в текущий момент имеют «статус участвующих», отображаются на экране станции оператора.

Управление блоком реализации изменения скорости осуществляется с помощью *блока последовательности действий*. Последовательность состоит из четырех этапов:

блок последовательности инициирует изменение скорости, что влечет за собой поступление входных параметров в блок реализации и проверку их на соответствие допустимым значениям перед подачей воздействия на исполнительный механизм;

в блоке реализации происходит текущая координация и выдача воздействий на исполнительные механизмы, продолжается проверка на возможные несоответствия и завершается изменение скорости;

после успешного завершения изменения скорости происходит перезагрузка программы блока реализации, и ее выполнение прекращается;

последний этап выполняется, если изменение скорости было прекращено. Условия прекращения изменения скорости фиксируются на втором этапе, после чего сразу происходит переход к четвертому этапу, где происходит перезагрузка. Задание блока задания на изменение скорости «подстраивается» под балансовое задание от контроллера скорости нижнего уровня, выдается сообщение сигнализации о выполнении четвертого этапа.

Эта последовательность выполняется тогда, когда блок задания находится в режиме управления «Автомат» или «Внешнее 2». Условием выполнения первого этапа является фиксирование блоком задания изменения задания скорости. Текущее отклонение рабочего задания от задания оператора постоянно сравнивается с зоной возможных отклонений (нечувствительности) задания, которая является настроечным параметром. Если при изменении оператором задания отклонение рабочего задания превышает зону нечувствительности, то выполняется первый этап и начинается процесс изменения скорости.

Задержки времени, необходимые для координации изменения скорости, постоянно рассчитываются в модуле координации задержек времени. Транспортная дистанция между исполнительным механизмом и сканером вместе с текущей скоростью машины используется для непрерывного расчета транспортного запаздывания, которое суммируется со временем нечувствительности самого исполнительного механизма для получения общего времени задержки.

В модуле координации задержек определяется максимальное время задержки, необходимое для координации исполнительного механизма. Рассматриваются задержки только для «участвующих» механизмов. Максимальное определенное время задержки используется для задержки рабочего задания. Каждое упреждающее воздействие на исполнительный механизм задерживается на время, представляющее собой разницу между максимальным временем задержки и временем задержки, необходимым для данного исполнительного механизма. Исполнительный механизм с максимальным временем задержки не получает ее.

В модуле расчета упреждающих воздействий время задержки, рассчитанное для данного исполнительного механизма, используется модулем задержки времени для задержки рабочего задания. Для построения упреждающей коррекции используется ПДП-регулятор, который необходим для того, чтобы обеспечить динамическую компенсацию отклонений технологической переменной в результате изменения скорости. Для динамического согласования условий формирования упреждающей коррекции, учитывающих влияние на технологические переменные (массу, влажность) изменений скорости и регулируемых переменных первичным исполнительным механизмом (скорости потока густой массы или давления пара), является фильтр. Постоянная времени фильтра — настроечный параметр. Выходные величины ПДП-регулятора используются в качестве задания на изменение скорости для исполнительного механизма. Далее произошедшее фиксируется соответствующей функцией управления, которая генерирует значение задания для контроллера исполнительного механизма нижнего уровня.

*Блок оптимизации скорости* рассчитывает максимально допустимую скорость. Этот расчет основан на оценках возможной области управления для задействованных исполнительных механизмов. После определения возможной области управления для исполнительного механизма расчет изменения скорости ведется на основе характеристики контролируемой технологической переменной относительно исполнительного механизма и скорости. Изменения скорости, соответствующие возможным областям управления для исполнительных механизмов, сравниваются, и наименьшее возможное изменение скорости суммируется с текущим значением скорости, в результате чего получается максимально допустимая скорость. Возможные области управления определяются постоянно с целью обновления данных о максимально допустимой скорости.

#### **5.7.4. Система автоматизации ротационной машины**

Рулонные ротационные машины — самый производительный и перспективный вид печатного оборудования из-за рационального построения печатного аппарата и непрерывной подачи ма-

териала в виде ленты. Они представляют собой сложную высокоавтоматизированную электромеханическую систему, агрегатированную из секций различного технологического назначения, в том числе секций для последующей обработки запечатанной ленты. Рулонные ротационные машины сочетают в себе преимущества ротационного построения аппаратов с принципом непрерывного питания их ленточным материалом (бумажная лента), что позволяет доводить скорость печатания до 8... 10 м/с при частоте вращения цилиндров до 500... 700 мин<sup>-1</sup>. Они применяются для двусторонней высокой, офсетной или глубокой печати, при изготовлении одно- или многокрасочной продукции. Рулонные машины позволяют легко получать различные совокупности красок на обеих сторонах ленты, а готовую продукцию — в виде тетрадей и их подобранных комплектов; в виде листов, уложенных в стопу; в виде ленты, смотанной в рулон; при установке швейных аппаратов — в виде брошюр, журналов и даже книг.

Рассмотрим технологический процесс печатания на ленточном материале на примере его реализации в малоформатной рулонной машине офсетной двусторонней печати, имеющей относительно простую конструкцию. Машина (рис. 5.54) имеет лентопитающее устройство ЛПУ, печатный аппарат, образованный тремя формными цилиндрами 18 и двумя офсетными цилиндрами 19, три красочных аппарата КА и три увлажняющих аппарата УА, фальцевально-резальное устройство ФРУ и тетрадное приемное устройство (на рис. 5.54 не показано).

Для расширения технологических возможностей машина снабжена листовым приемным устройством ПУ (рис. 5.55), имеющим резальное устройство РУ, цилиндр 1, совокупность валиков и тесемочных транспортеров, формирующих перекрытие отрезанных листов и выкладывающих их в стопу. Стрелкой показано направление движения ленты при выпуске листовой продукции.

Лента (см. рис. 5.54) разматывается с рулона 2 офсетными печатающими цилиндрами 19. Разматываемая лента огибает направляющие валики и амортизационный валик на подпружиненном рычаге 13, компенсирующем периодический избыток и недостаток подаваемой ленты 14. На формные цилиндры 18 эластичными валиками (на рис. 5.54 все эластичные валики имеют штриховку, а металлические цилиндры показаны без штриховки), соприкасающимися с ними и называемыми накатными, наносится тонкий слой соответствующей краски, которая цилиндром 16 при его вращении (против часовой стрелки в левом верхнем и нижнем КА) поступает из красочного ящика 15 и качающимся валиком 17 порциями-полосками передается в раскатную цилиндрическую группу красочного аппарата. Металлические цилиндры, кроме вращательного, имеют также осевое циклическое перемещение относительно эластичных валиков, что обеспечивает раскат краски по

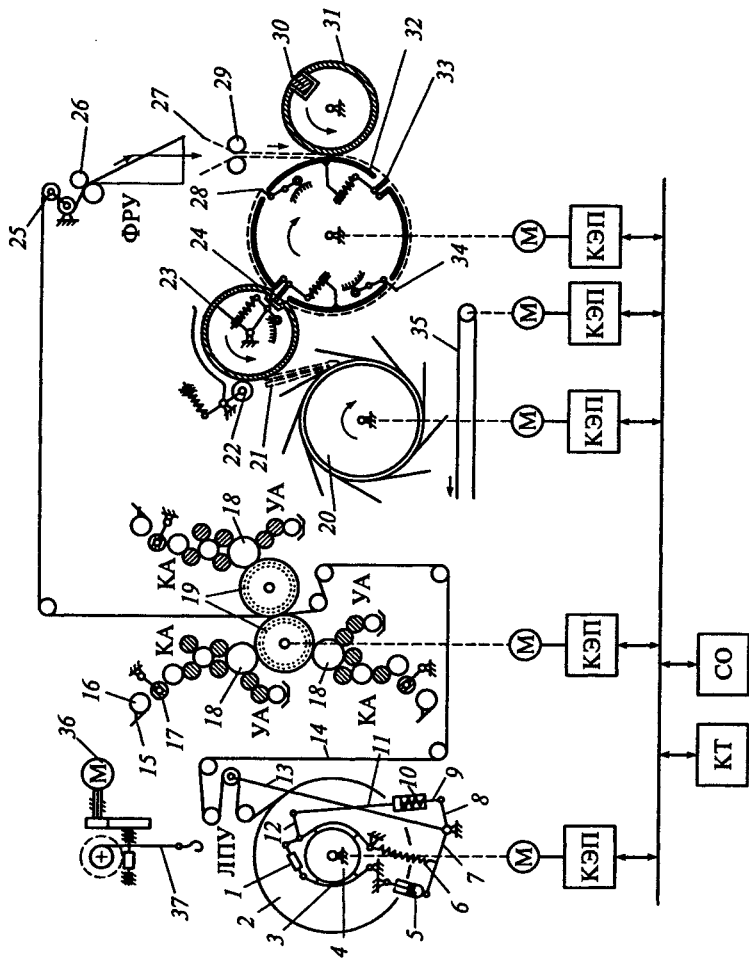


Рис. 5.54



поверхности цилиндров и валиков и последующий ее накат на форму тонким, относительно равномерным слоем. Одновременно на форму наносится увлажняющий раствор аппаратом УА, имеющим всего три валика. Прямое изображение с каждой формы передается зеркально отображенным на соответствующий офсетный цилиндр 19, а затем в зоне контакта офсетных цилиндров друг с другом наносится на ленту одновременно с двух сторон. Причем на левой стороне ленты может быть получено однокрасочное или двухкрасочное изображение. Последнее собирается на левом офсетном цилиндре при одновременной работе верхнего левого и нижнего красочных аппаратов.

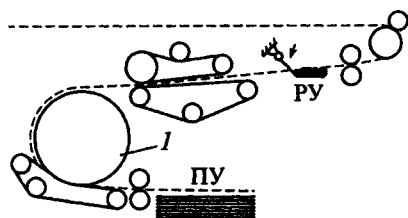


Рис. 5.55

Отпечатанная лента огибает направляющий валик, а затем, пройдя поворотный валик 25, поступает в фальцевально-резальное устройство. На воронке 27 этого устройства запечатанная лента фальцуется в продольном направлении, затем, уже сложенная вдвое, разрезается в поперечном направлении и в том же направлении еще раз фальцуется специальным механизмом ротационного типа. При необходимости лента может быть разрезана в продольном направлении дисковым ножом 26.

Фальцевально-резальное устройство для газетной продукции малого формата представляет собой совокупность механизмов на вращающихся цилиндрах. После формирования продольного сгиба ленты с помощью воронки 27 и валиков 29 она проходит между резальным 31 и фальцующим 32 цилиндрами, вращающимися с окружной скоростью, равной скорости ленты. В зоне взаимодействия этих двух цилиндров нож 30 разрезает ленту, а управляемые кулачковым механизмом иголки 28, установленные по образующей цилиндра 32 и называемые графейками, накалывают ее переднюю кромку и сдвигают влево, удерживая на поверхности цилиндра 32. Диаметр цилиндра 32 в 2 раза больше диаметра цилиндра 31, поэтому на фальцующем цилиндре диаметрально противоположно установлено два ряда графеек — 28 и 34.

Когда сложенный вдвое и отрезанный лист занимает положение, показанное на рис. 5.54, в зоне взаимодействия цилиндров 32 и 23 происходит его поперечное фальцевание с помощью подпружиненного ножа 33, проталкивающего середину листа в паз цилиндра 23, образованный его радиальной стенкой и зажимной управляемой планкой 24. При этом верхние графейки 28 опускаются, «прячась» в тело цилиндра 32 и освобождая переднюю кромку оттиска.

При дальнейшем вращении цилиндров лист, зажатый планкой 24 за середину, ведется далее цилиндром 23, постепенно складываясь еще раз, но в поперечном направлении. После прохождения прижимного ролика 22 планка 24 открывается и полученная тетрадь 21 с помощью ролика 22 и цилиндра 23 проталкивается в собиратель 20, который выкладывает ее на транспортер 35, выводящий поток тетрадей влево.

Для установки нового рулона предусмотрен подъемный механизм с тросом 37, приводимым через барабан, червячную и зубчатую пары от двигателя 36.

Традиционным вариантом построения печатных машин было объединение всех узлов машины механическим приводом, представляющим собой разветвленную сеть механических горизонтальных, вертикальных и наклонных валов, деталей различного рода зацеплений (зубчатых, плоскозубчатых, цепных, гибких), соединительных муфт и т. д., приводимых в движение главным электродвигателем. Печатная техника всех основных способов печати подвергается принципиальным изменениям, в основе которых лежит ликвидация механического главного вала машины и применение индивидуальных приводов отдельных узлов и секций. Дорогостоящие механические узлы (редукторы, валы и кулачки) заменяются системой прецизионной электронной синхронизации электродвигателей, которая обеспечивает возможность бесступенчатого изменения форматов продукции (длины печати). При этом становится возможным создание оптимальных условий печати на материалах различной толщины.

Для выполнения всего комплекса технологических операций лента при ее движении в машине должна быть натянутой, причем сила натяжения должна быть постоянной. Простейший регулятор натяжения ленты, образованный системой рычагов (1, 7, 8, 9, 11, 12, 13), колодок 3, тормозного шкива 4, пружин 6, 10 и демпфера 5 изображен на рис. 5.54. В данном случае натяжение запечатываемой ленты устанавливается на размотке, а степень растяжения запечатываемого материала зависит от его эластичности и силы натяжения. Таким образом, лента запечатывается в натянутом состоянии; в процессе упаковки материал не натягивается и имеет усадку  $\pm 1$  %. Синхронизация угловых скоростей центрального печатного и формного цилиндров благодаря плавному регулированию скоростей индивидуальных двигателей обеспечивает наиболее точную компенсацию этой разницы и наивысшее качество печати.

В состав системы управления позиционированием формных цилиндров входит станция оператора СО, с которой на программируемый контроллер КТ поступают технологические параметры печати. Контроллер выдает сигнал задания скорости всех двигателей на автономные инверторы, при этом координация работы различных приводов, обмен данными с управляющими устройствами пе-

чатной машины (печатными аппаратами, воздуходувками, рулонной зарядкой, устройством для намотки рулонов и т.д.) осуществляется по сети промышленного стандарта (Profibus-DP, DeviceNet, ModuBus и т.д.). На контроллер также поступают сигналы от устройств контроля совмещения красок для коррекции углов положения формных цилиндров. Для определения текущих углов положения цилиндров используются фотоимпульсные датчики угловых перемещений, обеспечивающие подачу примерно 1 млн сигналов за один оборот. Такое количество сигналов необходимо для обеспечения высокой точности углового позиционирования цилиндров. Обработка информации с датчиков и формирование сигналов коррекции осуществляется контроллером. В данной системе один из формных цилиндров является ведущим, а остальные — ведомыми. Задание на скорость ведомых приводов рассчитывается относительно основного задания скорости ведущего привода. Коррекция углового положения цилиндров выполняется внесением добавлений скорости приводов внешним контуром положения.

Исходя из требований, предъявляемых к системам электропривода печатного оборудования, их оснащают высокодинамичными комплектными регулируемые электроприводами (КЭП) (см. рис. 5.54) переменного тока, обеспечивающими высокую точность регулирования скорости двигателей и обладающими высокими значениями КПД и коэффициента мощности.

## **5.8. Автоматизированные технологические комплексы городского хозяйства**

### **5.8.1. Характеристика технологических комплексов**

Технологические комплексы городского хозяйства обеспечивают жизнедеятельность населения. К ним относятся комплексы: холодного и горячего водоснабжения, водоотвода, электроснабжения, вентиляции и кондиционирования помещений, бытового обслуживания (прачечные, химчистки), миникомплексы производства продуктов питания (минипекарни, минипроизводства мясомолочной продукции и др.). К комплексам городского хозяйства относятся также транспортные комплексы, включающие в себя городской маршрутный электротранспорт, систему диспетчерского управления, подстанции электроснабжения и др.

Комплексы холодного водоснабжения включают в себя городские станции водозабора и водоочистки, систему районных насосных подстанций, станций и сетей водоснабжения с запорной арматурой. Горячее водоснабжение осуществляется от теплоэлектростанции посредством насосных станций и соответствующих сетей водоснабжения.

Основным оборудованием в комплексах водоснабжения и водоотвода является насосное оборудование, которое обеспечивает требуемую подачу воды при заданном напоре (давлении) у потребителя.

Основным оборудованием в комплексах вентиляции и кондиционирования жилых зданий являются вентиляторы и компрессоры.

В комплексах бытового обслуживания используется разнообразное оборудование, обеспечивающее обработку и придание новых свойств материалу. Основное оборудование технологических комплексов городского хозяйства в большинстве случаев относится к I группе типового оборудования (см. гл. 4).

### **5.8.2. Система автоматизации насосной станции**

Рассмотрим систему автоматизации насосной станции, предназначенной для тепло- и водоснабжения жилых зданий.

Функциональная схема насосной станции показана на рис. 5.56. Насосная станция работает следующим образом. Холодная вода с фильтрующей станции предварительно нагревается в теплообменнике 1 и поступает на насосную станцию. С выхода насосной станции вода поступает в теплообменник 2, где окончательно нагревается, после чего идет дальше на нужды тепло- и водоснабжения жилых зданий.

Поддержание постоянства давления при изменяющемся расходе на станции горячей воды осуществляется байпасным способом. Информация о текущем значении давления в напорной части водопровода поступает с датчика давления P1, расположенного на выходе насосной станции.

На насосной станции находятся три центробежных насоса N1 ... N3 типа ЦН-150-16.5. Приводными двигателями насосов являются двигатели M1 ... M3 серии 4A28084У3.

Со стороны всасывающего и нагнетающего патрубков насосов, а также на байпасной трубе расположены задвижки B1 ... B7. Задвижки B1 ... B4, приводятся в движение от двигателей M4 ... M7 серии 4A180M8У3. Задвижки B5 ... B7 являются ручными. В напорной части водопровода находятся невозвратно-запорные клапаны X1 ... X3.

Система управления насосной станции работает в автоматическом и ручном режимах. Переключение режимов осуществляется с пульта управления.

В автоматическом режиме регулирование давления осуществляется контроллером PLC. Текущее значение давления в напорной части водопровода поступает от датчика давления P1. В соответствии с поступившим значением давления контроллер дает задание на преобразователь частоты UZ и подключает его к одному из трех насосов. Одновременно могут работать два насоса, один из насосов находится в резерве (он выбирается на пульте управления). Контроллер управляет всей электроавтоматикой, открывает

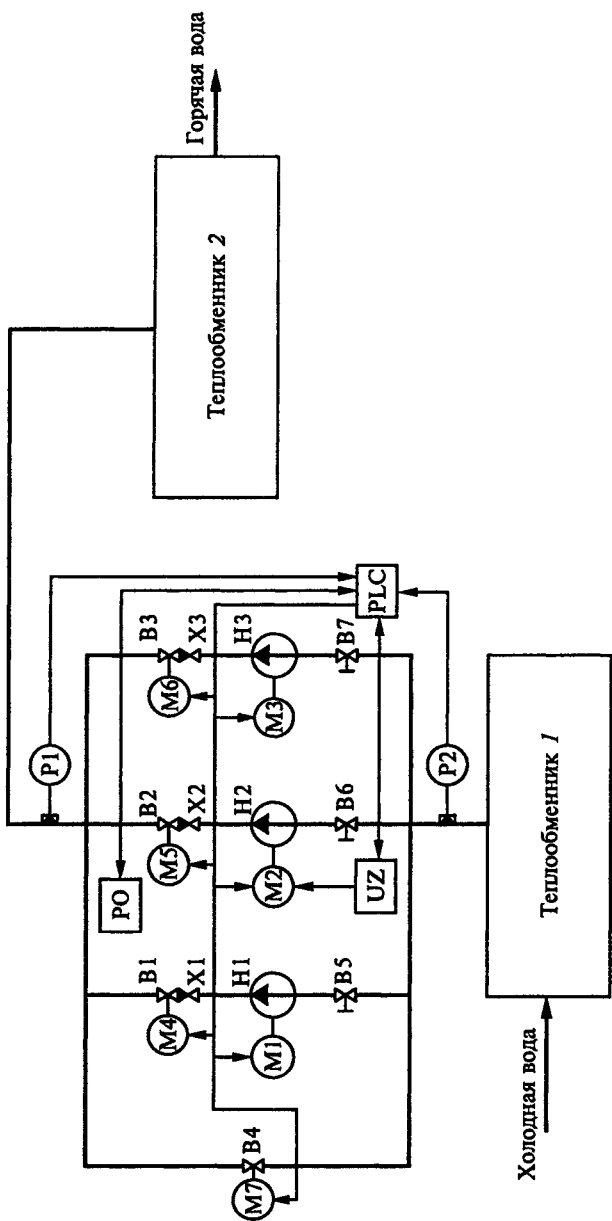


Рис. 5.56

и закрывает необходимые задвижки. В режиме пуска системы контроллер проверяет наличие давления во всасывающей части водопровода посредством датчика давления P2.

В ручном режиме станция управляется с поста оператора РО, куда поступает информация о режиме работы станции, об аварии в системе, о работающих насосах и состоянии задвижек (открытое или закрытое).

В СУ в качестве программируемого контроллера применяют контроллер Omron CQM1 со следующими модулями: источник питания CQM1-PA206; процессорный модуль CQM1-CPU41-E (в процессорный модуль встроены 16 релейных входов, на которые поступают сигналы об автоматическом режиме работы агрегатов); модуль аналогового ввода CQM1-AD041 (четыре входа; на модуль аналогового ввода поступают сигналы от датчиков давления); модуль аналогового вывода CQM1-DA021 (два вывода, используется один вывод — от модуля идет сигнал на вход задания частоты преобразователя частоты); модуль питания аналоговых устройств CQM1-IPS02; два модуля дискретного ввода CQM1-ID211; два модуля дискретного вывода CQM1-OS222.

В данной системе управления используются приводы AV-300 фирмы «General Electric» с преобразователем частоты AV-300 6KAV3110XB1 с режимом переменного момента. Мощность преобразователя 110 кВт, выходной ток 210 А, напряжение питания 380 В.

Принципиальная электрическая схема силовой части системы управления насосами изображена на рис. 5.57.

Питание шкафа с электрооборудованием осуществляется с внешней стороны подводом к клеммам А, В, С клеммника ХТ1 трех фаз напряжения 380 В частотой 50 Гц, нулевого провода к клемме РЕ и заземляющего провода к клемме G. Клеммы А, В и С подключаются к силовому автоматическому выключателю QС1. Индикация наличия напряжения внутри электрошкафа осуществляется с помощью лампы НЛ1, подключенной к одной из фаз питающего напряжения за силовым автоматическим выключателем QС1. Она сигнализирует обслуживающему персоналу о том, что внутренние цепи электрошкафа находятся под напряжением.

Преобразователь частоты (ПЧ) UZ подключен к электрической сети через автоматический выключатель Q1. Входной реактор L1 защищает преобразователь от коммутационных сверхтоков. Выходной реактор L2 ограничивает емкостные выходные токи преобразователя и пики напряжения на двигателе, обусловленные распределенной мощностью кабеля.

Преобразователь частоты может подключаться к одному из трех электродвигателей посредством выходных клемм (X1Y1Z1, X2Y2Z2, X3Y3Z3) клеммника ХТ2 и контакторов К4... К6 соответственно.

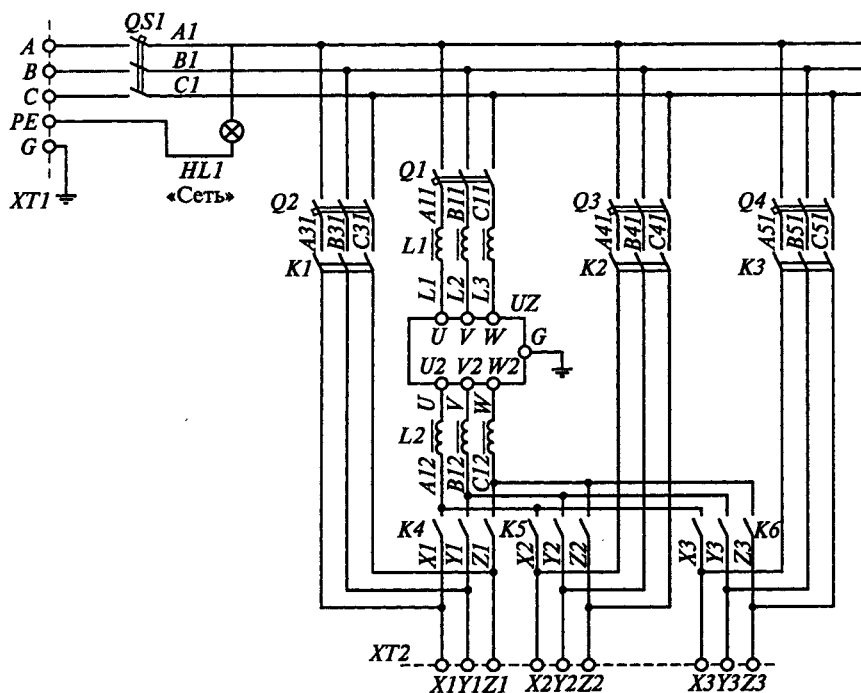


Рис. 5.57

Возможно подключение электродвигателей непосредственно к сети через автоматические выключатели  $Q2... Q4$  и посредством контакторов  $K1... K3$ .

Выбор режима работы (ручного или автоматического) осуществляется оператором насосной станции с поста оператора. Для пуска или останова системы в автоматическом режиме или вывода СУ из аварийного режима используются кнопки «Пуск» или «Стоп». Постоянно в работе могут находиться один или два насоса, третий насос является резервным (профилактический осмотр, плановый ремонт). Резервный насос выбирают положением переключателя на посту оператора. После выбора резервного насоса в автоматическом режиме закрывается задвижка, находящаяся в напорной части водопровода этого насоса, две другие задвижки открыты. В автоматическом режиме закрыта задвижка байпасной трубы, она открыта только при ручном регулировании.

Автоматический режим показан в структурной схеме алгоритма (рис. 5.58).

Давление на выходе с насосной станции находится в заданных пределах  $p - x \leq p_{\text{тек}} \leq p + x$  (где  $x$  — допустимый диапазон измене-

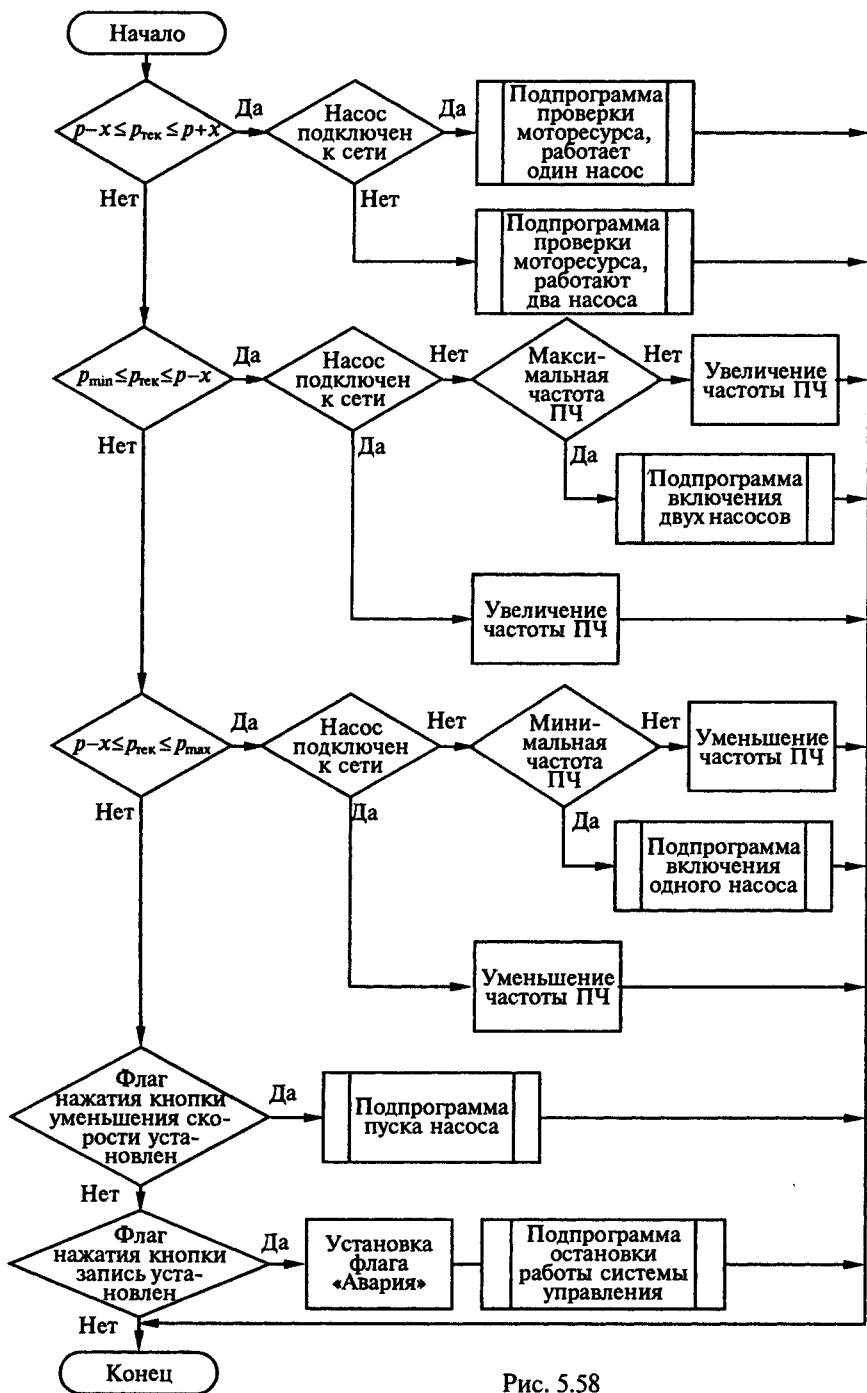


Рис. 5.58



ния давления). В этом случае СУ проверяет выработал ли насос суточный моторесурс, и если да, то производит переключения между насосами.

Если давление меньше нормы  $p_{\min} \leq p_{\text{тек}} \leq p - x$ , СУ проверяет число работающих насосов. Если работает один насос, то делается проверка работы ПЧ на максимальной частоте. Если нет, то дается команда на увеличение его частоты, в противном случае происходит переключение насоса, работающего от ПЧ, к сети, а к ПЧ подключается другой насос (до этого не работавший).

Если давление больше нормы  $p + x \leq p_{\text{тек}} \leq p_{\max}$ , СУ проверяет число работающих насосов. Если работают два насоса, то делается проверка работы ПЧ на минимальной частоте. Если нет, то дается команда на уменьшение его частоты, в противном случае происходит отключение насоса, работающего от ПЧ, а к ПЧ подключается насос, работающий от сети.

Если давление меньше минимально допустимого  $p_{\text{тек}} \leq p_{\min}$ , СУ проверяет находится ли какой-либо насос в работе. Если нет, то СУ осуществляет пуск того насоса (от преобразователя частоты), который наработал самый маленький моторесурс. Если да, то СУ дает задание на ПЧ на повышение частоты вращения насоса. Если в течение заданного времени давление на выходе насосной станции не превышает минимально допустимого, то устанавливается флаг «Авария» и СУ останавливает работу насосной станции.

Если давление на выходе насосной станции больше максимально возможного значения  $p_{\text{тек}} > p_{\max}$ , то СУ устанавливает флаг «Авария» и прекращает работу.

Ручной режим является аварийным и необходим только для работы когда невозможен автоматический режим работы СУ.

### **5.8.3. Система автоматизации вентиляции и кондиционирования воздуха**

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

Функции автоматической системы управления СВКВ следующие:

регулирование температуры и влажности воздуха, поступающего в систему воздуховодов приточной вентиляции;

поддержание параметров воздуха в пределах санитарных норм и специальных требований в помещениях благодаря управлению кондиционерами-доводчиками;

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

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

индикация технологических параметров отдельных узлов СВКВ на локальных пультах управления с возможностью настройки этих узлов и связь с уровнем диспетчерского управления;

извещение оператора при отказе отдельных устройств и агрегатов (например, на двигатель вентилятора подан сигнал включения, но двигатель не работает), а также при возникновении пред-аварийных ситуаций (например, на фильтре слишком велик перепад давлений, что свидетельствует о его засорении);

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

На рис. 5.59 показана функциональная схема СУ приточной вентиляционной установки. Атмосферный воздух закачивается в систему вентилятором (возможно несколькими) при открытой входной заслонке 1, управляемой электродвигателем 2. Фильтр 3 обеспечивает очистку воздуха от пыли и взвешенных частиц. Повышение перепада давления на фильтре, измеряемого датчиком 4, выше допустимой нормы отражается сигнализацией на локальном пульте управления и ПК оператора. В камере орошения 5 воздух контактирует с капельками воды, подаваемой под давлением, создаваемым насосом 6, к форсункам распределительных коллекторов. В зависимости от температуры разбрызгиваемой воды осуществляется фазовый переход воды в пар или из пара в воду, в результате чего воздух соответственно увлажняется или осушается. Целевая влажность воздуха измеряется датчиком 7 и регулируется путем изменения расхода теплоносителя в теплообменном аппарате 8 регулирующим клапаном 9. Разбрызгиваемая в камере орошения вода накапливается в баке 10, уровень в котором измеряется датчиком 11. При достижении водой в баке уровня нижнего или верхнего допустимого предела контроллер вы-

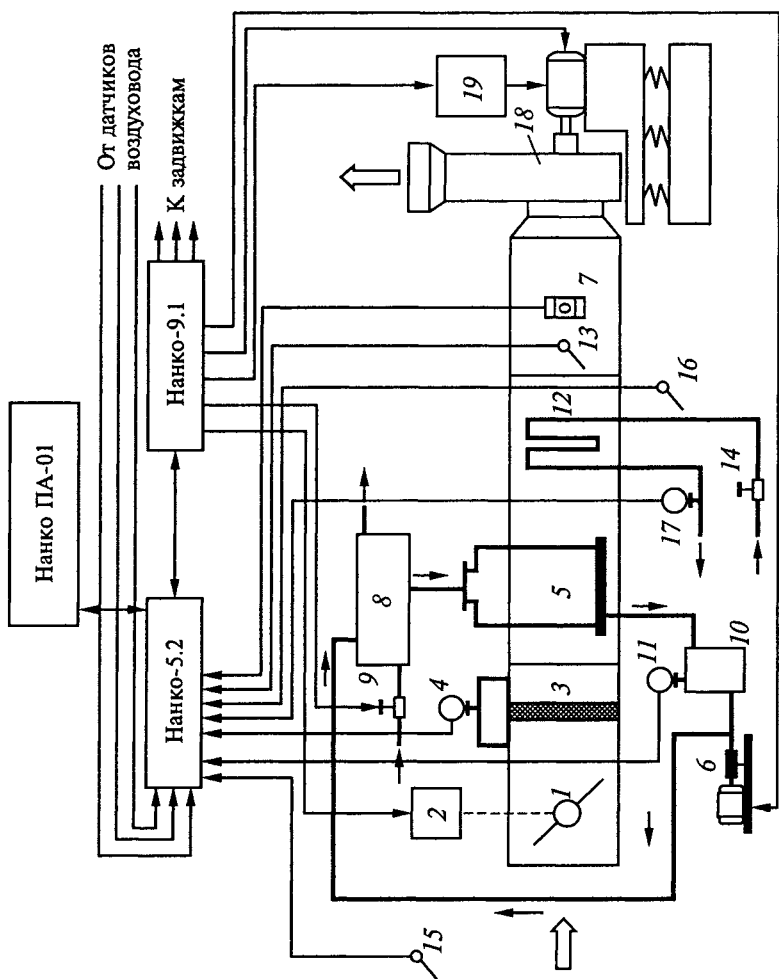


Рис. 5.59

дает управляющие сигналы насосу на подкачку недостающего или откачку избыточного объема воды. Обработанный в камере орошения воздух поступает в калорифер 12. Его целевая температура измеряется датчиком 13 и регулируется путем изменения расхода теплоносителя в змеевике калорифера клапаном 14. Автоматическая система управления обеспечивает меры по защите калорифера от замерзания воды (теплоносителя) в трубах. При отрицательной температуре наружного воздуха, измеряемой датчиком 15, в случае понижения температуры теплоносителя, измеряемой датчиком 16, ниже заданного предела или при падении давления в трубопроводе теплоносителя, измеряемого датчиком 17, ниже заданного предела система автоматически отрабатывает аварийный режим: выключается электродвигатель вентиляторной установки 18, перекрывается входная заслонка 1 и максимально открывается клапан 14 на трубопроводе теплоносителя. На ПК оператора выводятся соответствующие сообщения.

Для снижения энергопотребления предусматривается управление электродвигателем вентиляторной установки 18 с помощью преобразователя частоты 19. При переходе отдельного помещения в нерабочее состояние контроллер подает управляющий сигнал на закрытие заслонок обслуживающих данное помещение воздуховодов, а также управляющий сигнал на преобразователь частоты, снижающий частоту двигателя и, соответственно, его энергопотребление.

В системах вентиляции и кондиционирования воздуха используется КТ Нанко-5.2 с пультом управления Нанко-ПА 01. Связь с исполнительными органами осуществляется через блок релейных (дискретных) и аналоговых устройств Нанко-9.1.

#### **5.8.4. Система автоматизации жизнеобеспечения жилого здания**

Для современных административно-производственных и офисных зданий характерна высокая насыщенность сложным инженерным и коммуникационным оборудованием. Наряду с традиционными системами жизнеобеспечения зданий (тепло- и водоснабжение, вентиляция и кондиционирование воздуха, электрические и телефонные сети) все более широко применяют новые технологии — системы контроля доступа и телевизионного наблюдения, охранная и пожарная сигнализации, автоматическое пожаротушение, компьютерные сети и др.

К задачам системы автоматизации жизнеобеспечения жилого здания относятся:

качественное функционирование системы жизнеобеспечения здания;

сокращение энергопотребления системами жизнеобеспечения без снижения качества их работы (весьма актуальная задача в условиях постоянного удорожания энергоресурсов);

снижение затрат на ремонт оборудования благодаря своевременному выявлению его неисправности и более точной локализации поломок;

организация коммерческого учета потребления электроэнергии, тепла и воды для выявления прецедентов халатного и неэкономного их расходования, а также для разделения оплаты между различными потребителями, если в одном здании находится множество юридических лиц;

безопасность в эксплуатации.

На рис. 5.60 показана схема автоматизированной системы диспетчерского управления зданием.

В основе автоматизированной системы диспетчерского управления зданием лежит трехуровневая архитектура (рис. 5.61).

Уровень сопряжения с объектом представлен устройствами сбора и первичной обработки информации об объекте автоматизации (конкретном узле той или иной системы жизнеобеспечения здания):

датчиками физических величин (термопреобразователи, датчики давления, уровнемеры, расходомеры, датчики концентраций газов и др.);

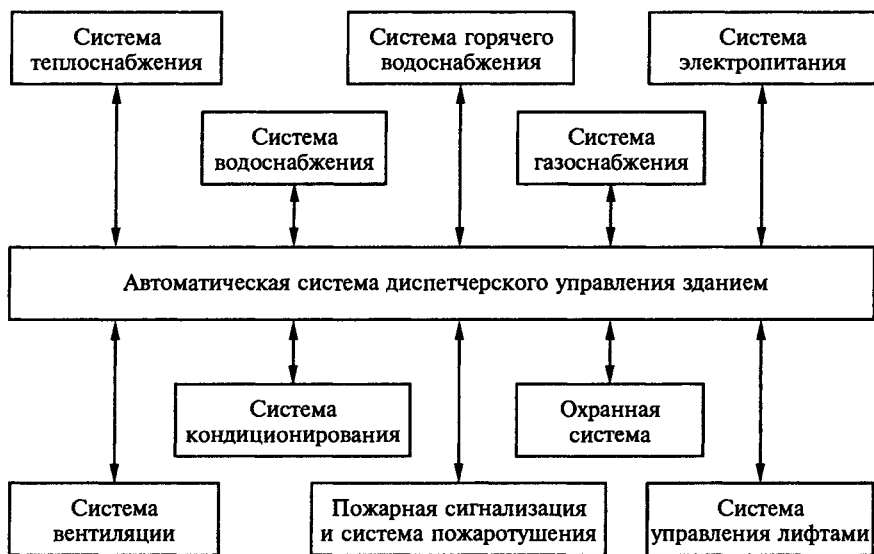


Рис. 5.60

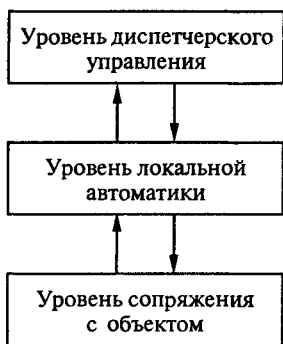


Рис. 5.61

датчиками состояния технологического оборудования (средства контроля состояния электроприводов, датчики положения запорной арматуры и др.);

датчиками технико-экономических показателей (электросчетчики, тепло- и водосчетчики) с унифицированными аналоговыми, импульсными или дискретными выходными сигналами, а также исполнительными устройствами, осуществляющими непосредственное воздействие на объект:

- регулирующей и запорной арматурой;
- частотными преобразователями;
- пусковой аппаратурой электроприводов.

Уровень локальной автоматки представлен промышленными контроллерами серии Нанко-5.х, автоматическими пультами управления серии Нанко ПА-0.х, аналоговыми и релейными блоками серии Нанко-9.х и другими устройствами, осуществляющими обработку сигналов от датчиков, реализацию необходимых законов регулирования и выдачу управляющих сигналов на исполнительные устройства. Данный уровень функционирует под управлением заложенного в него программного обеспечения, отрабатывает всю логику управления объектом автоматизации, а также обеспечивает интерфейсы для настройки аппаратуры в процессе ее эксплуатации с локальных пультов управления.

Уровень диспетчерского управления (верхний в иерархии) представлен автоматизированными рабочими местами (АРМ) операторов систем жизнеобеспечения на базе персональных компьютеров с установленным на них специализированным программным обеспечением производства фирмы «Нанко». Опрашивая в цикле микроконтроллеры, управляющие узлами определенной системы жизнеобеспечения здания, АРМ предоставляет оператору соответствующей службы оперативную информацию о ее состоянии в виде активных мнемосхем, осциллограмм и других средств визуализации. АРМ оператора позволяет описать регламент работы узлов и агрегатов соответствующей системы жизнеобеспечения и вести протокол событий, в том числе аварийных, происходящих в данной системе. Данный уровень предусматривает также связь с ПК руководителя и автоматизированной бухгалтерией здания и передачу им информации о функционировании систем жизнеобеспечения в экономических терминах.

## Список литературы

1. Автоматизация типовых технологических процессов и установок: Учебник для вузов / А. М. Корытин, Н. К. Петров, С. Н. Радимов, Н. К. Шапарев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Автоматизированный электропривод промышленных установок / Г. Б. Онищенко, М. И. Аксенов, В. П. Грехов и др. / Под ред. Г. Б. Онищенко. — М.: РАСХН, 2001.
3. Автоматическая стабилизация оптического изображения / Д. Н. Еськов, Ю. П. Ларионов, В. А. Новиков и др.; Под ред. Д. Н. Еськова, В. А. Новикова. — Л.: Машиностроение, 1998.
4. Алексеев А. А., Солодовников А. И. Диагностика в технических системах управления: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В. Б. Яковлева. — СПб., 1997.
5. Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. Управление электроприводами. — Л.: Энергоиздат, 1982.
6. Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отделение, 1992.
7. ГОСТ 50369—92. Электроприводы. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1993.
8. Дацковский Л. Х., Роговой В. И., Абрамов Б. И. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор) // Электротехника. — 1997. — № 10. — С. 45—51.
9. Довбня И. М., Кондратьев А. Н., Юревич Е. И. Роботизированные технологические комплексы в ГПС. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1990.
10. Домрачев В. Г., Матвиевский В. Г., Смирнов Ю. С. Схемотехника цифровых преобразователей перемещения: Справ. пособие. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
11. Драгилев А. И., Дроздов В. С. Технологические машины и аппараты пищевых производств. — М.: Колос, 1999.
12. Дружинин Н. Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. — М.: Металлургия, 1975.
13. Закс М. Н., Панов М. С., Смирнов В. Н. Новое поколение вагонов метрополитена // Тяжелое машиностроение. — 1998. — № 1. — С. 34—36.
14. Ильинский Н. Ф., Бычков М. Г. Вентильно-индукторный привод для легких электрических транспортных средств // Электротехника. — 2000. — № 2. — С. 28—31.

15. *Ильинский Н. Ф., Рожанковский Ю. В., Горнов А. О.* Энергосбережение в электроприводе. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
16. Интерфейсы систем обработки данных: Справочник / А.А. Мячев, В.Н. Степанов, В.К. Щербо; Под ред. А.А. Мячева. — М.: Радио и связь, 1989.
17. *Капунцов Ю.Д., Елисеев В.А., Ильяшенко Л.А.* Электрооборудование и электропривод промышленных установок: Учебник для вузов / Под ред. проф. М.М. Соколова. — М.: Высш. шк., 1979.
18. *Кисаримов Р.А.* Справочник электрика. — М.: ИП РадиоСофт, 1998.
19. *Кириллов В.И., Квасов А.В.* Создание трамвайных вагонов нового поколения // Тяжелое машиностроение. — 1998. — № 1. — С. 37—41.
20. *Ключев В.И.* Теория электропривода: Учеб. пособие для вузов. — 2-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1998.
21. *Ключев В.И., Терехов В.М.* Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов. — М.: Энергия, 1980.
22. *Ковчин С.А., Сабинин Ю.А.* Теория электропривода: Учеб. для вузов. — СПб.: Энергоатомиздат, 1994.
23. *Козлов М., Чистяков А.* Эффективность внедрения систем с частотно-регулируемыми приводами // Современные средства автоматизации. — 2001. — № 1. — С. 76—82.
24. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. — М.: Энергоатомиздат, 1994.
25. *Конюхова Е.А.* Электроснабжение объектов: Учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования. — М.: Мастерство, 2001.
26. *Лаугис Ю., Лехтла Т., Йоллер Ю.* Состояние и тенденция развития электротранспорта Эстонии. Материалы III Международной конференции по автоматизированному электроприводе. — Нижний Новгород, 2001.
27. *Лезнов Б.С.* Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках. — М.: Энергоатомиздат, 1998.
28. Лифты: Учебник для вузов / Под ред. Д.П. Волкова. — М.: Изд-во АСВ, 1999.
29. *Москаленко В.В.* Электрический привод: Учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования. — М.: Мастерство, Высш. шк., 2000.
30. *Нагорный В.С., Денисов А.А.* Устройства автоматики гидро- и пневмосистем: Учеб. пособие техн. вузов. — М.: Высш шк., 1991.
31. *Новиков В.А.* Анализ и синтез типовых взаимосвязанных электро-механических систем: Учеб. пособие. — Л.: ЛЭТИ, 1983.
32. *Новиков В.А.* Типовые автоматические системы управления электроприводами производственных механизмов: Учеб. пособие. — Л.: ЛЭТИ, 1992.
33. *Новиков В.А., Белов М.П., Хань Ш.* Система управления объектом с транспортным запаздыванием. Описание изобретения к патенту РФ RU 2079868 С1. Бюл. № 14. — 1997.
34. Основы автоматизации машиностроительного производства: Учеб. для машиностроит. спец. вузов / Е.Р. Ковальчук, М.Г. Косов, В.Г. Митрофанов и др.; Под ред. Ю.М. Соломенцева. — 2-е изд., испр. — М.: Высш. шк., 1999.
35. *Поляков В.В., Скворцов Л.С.* Насосы и вентиляторы: Учеб. для вузов. — М.: Сройиздат, 1990.



36. *Починчук Н. К., Волк В. А., Пахоменко А. Р.* АСУ ТП комбикормового цеха «Композит-2М» // Современные средства автоматизации. — 1998. — № 2. — С. 34—40.
37. Правила устройства электроустановок / Минэнерго РФ. — М.: Энергоатомиздат, 2001.
38. Привода Триол. Каталог продукции и применений-99 / Триол. — М.: Корпорация Триол, 1999.
39. *Прокопов А. А., Татаринцев Н. И., Цирлин Л. А.* Компьютерные технологии автоматизации: Учеб. пособие. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2001.
40. *Растрюгин А. А.* Системы экстремального управления. — М.: Наука, 1974.
41. Робототехника и гибкие автоматизированные производства: В 9 кн. — Кн. 2. Приводы робототехнических систем: Учеб. пособие для вузов / Ж. П. Ахромеев, Н. Д. Дмитриева, В. М. Лохин и др.; Под ред. И. М. Макарова. — М.: Высш. шк., 1986.
42. Робототехника и гибкие автоматизированные производства: В 9 кн. — Кн. 5. Моделирование робототехнических систем и гибких автоматизированных производств / С. В. Пантюшин, В. М. Назаретов, О. А. Тягунов и др.; Под ред. И. М. Макарова. — М.: Высш. шк., 1986.
43. *Свечарник Д. В.* Электрические машины непосредственного привода. Безредукторный электропривод. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
44. *Серго Е. Е.* Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. — М.: Недра, 1985.
45. *Слежановский О. В.* Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
46. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем / Под ред. А. А. Колесникова. — Ч. 3. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.
47. *Соколов М. М.* Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов: Учебник для студентов, обучающихся по специальности «Электропривод и автоматизация пром. установок». — 3-е изд., переработ. и доп. — М., Энергия, 1976.
48. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В. А. Елисеева и А. В. Шинянского. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
49. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / Под ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыкина, М. Л. Салювера. — 3-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1982.
50. Техника чтения схем автоматического управления и технологического контроля / А. С. Клюев, Б. В. Глазов, М. Б. Миндик, С. А. Клюев; Под ред. А. С. Клюева. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
51. *Точилкин В. В., Филатов А. М.* Гидропривод кузнечно-прессовых и технологических машин: Учеб. пособие. — Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 1999.
52. Транзисторный преобразователь FR-A500, НТЦ «Приводная техника». — М.: Приводная техника, 2001.
53. *Хартли Дж.* ГПС в действии: Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1987.

54. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. — М.: Мир, 1975.
55. Яуре А. Г., Певзнер Е. М. Крановый электропривод: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
56. ACS 600 Frequency Converters for Speed and Torque Control of 2.2 to 630 kW Squirrel Cage Motors: Technical Catalogue. ABB Industry Oy, Sweden, Vasteras, 2000.
57. AccuRay 1190 Basic Control Tuning Guide. ABB Industrial Systems Inc. — Sweden, Vasteras, 1994.
58. SIMATIC Комплексная автоматизация производства. Каталог ST 70. — Ч. 1, ч. 2. — Germany, Erlangen, 2001 г..
59. SIMOVERT MASTER DRIVES. Vector Control. Katalog Siemens DA 65.10. — Germany, Erlangen, 1998/1999.

## Оглавление

Предисловие .....	3
Введение .....	6
<b>Глава 1. Принципы построения и структура автоматизированных технологических комплексов с системами многодвигательных электроприводов .....</b>	<b>11</b>
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
<b>Глава 2. Типовые автоматизированные электроприводы .....</b>	<b>107</b>
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
<b>Глава 3. Управление движением механизмов с использованием типовых технических средств .....</b>	<b>143</b>
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. Механотронные модули в системах управления движением .....	193
3.8. Расчет и выбор автоматизированных электроприводов механизмов .....	198
<b>Глава 4. Электроприводы и системы управления типовым, технологическим и транспортным оборудованием .....</b>	<b>204</b>
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 с 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
<b>Глава 5. Автоматизированные технологические комплексы .....</b>	<b>454</b>
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

*Учебное издание*

**Белов Михаил Петрович,  
Новиков Владислав Александрович,  
Рассудов Лев Николаевич**

**Автоматизированный электропривод типовых производственных  
механизмов и технологических комплексов**

**Учебник**

**3-е издание, исправленное**

Редакторы *М. В. Пономаренко, Е. М. Зубкович*  
Технический редактор *Н. И. Горбачева*  
Компьютерная верстка: *М. В. Трушина*  
Корректоры *М. В. Дьяконова, Т. Д. Мирлис, К. М. Корепанова*

Изд. № 103105259. Подписано в печать 06.08.2007. Формат 60×90/16.  
Бумага тип. № 2. Печать офсетная. Гарнитура «Таймс». Усл. псч. л. 36,0.  
Тираж 1 000 экз. Заказ № 19745.

Издательский центр «Академия». [www.academia-moscow.ru](http://www.academia-moscow.ru)  
Санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.99.02.953.Д.004796.07.04 от 20.07.2004.  
117342, Москва, ул. Бултерова, 17-Б, к. 360. Тел./факс: (495)330-1092, 334-8337.

Отпечатано в ОАО «Саратовский полиграфкомбинат». [www.sarpk.ru](http://www.sarpk.ru)  
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59.