

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
**«Национальный исследовательский Томский Политехнический
университет»**

**Н.В. Гусев, С.В. Ляпушкин,
М.В. Коваленко**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСОВ И
СИСТЕМ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2011

УДК 658.512.4.001.56(075.8)

ББК 30.606-05я73

Н.В. Гусев, С.В. Ляпушкин, М.В. Коваленко

Автоматизация технологических комплексов и систем в промышленности: учебное пособие / Н.В. Гусев, С.В. Ляпушкин, М.В. Коваленко; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 198 с.

В пособии изложены основы построения систем автоматизации технологических процессов, в том числе на примерах практической реализации. Рассмотрены цифровые и аналоговые элементы систем автоматизации. Изложены вопросы управления автоматизированного электропривода в системах с преобразователями частоты.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 140604 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» и специальности 140610 «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений»

УДК 658.512.4.001.56(075.8)

ББК 30.606-05я73

Рецензенты

к.т.н., ведущий инженер ООО «Элетим», г.Томск

В.Н. Черемисин

к.т.н., доцент кафедры ЭПА Северского технологического института

С.Н. Кладиев

© Н.В. Гусев, С.В. Ляпушкин, М.В. Коваленко

© ГОУ ВПО «Томский политехнический университет»

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
Раздел 1. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	9
Глава 1. Общие принципы построения систем КАТП	9
1.1. Основные понятия и определения в АСУ ТП	9
1.2. Обобщенная структура АСУ ТП	11
1.3. Функции автоматизированных систем управления.....	12
1.4. Виды обеспечения АСУ ТП	15
1.5. Централизованная и распределенная архитектура АСУ ТП ...	16
1.6. Классификация промышленных объектов управления.....	19
1.7. Параметры технологических процессов, классификация	22
1.8. Классификация технических средств регулирования	25
1.9. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации.....	26
Глава 2. Теоретические основы построения САУ	28
2.1. Оценка качества регулирования САУ.....	28
2.2. Надежность систем автоматизации	31
2.2.1. Модели для расчета надежности.....	32
2.2.2. Надежность систем управления процессами	34
2.2.3. Надежность программного обеспечения.....	36
2.3. Особенности цифрового управления	40
2.3.1. Управление в реальном времени.....	40
2.3.2. Понятие системы и примеры типичных приложений цифрового управления.....	42
2.3.3. Программные средства систем управления многокоординатными ЭП	44
Глава 3. Архитектура современных систем с ЧПУ	47
3.1. Системы типа CNC и PCNC-1.....	47
3.2. Системы типа PCNC-2.....	51
3.3. Системы типа PCNC-3.....	53
3.4. Системы типа PCNC-4.....	55

Раздел 2. АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА КАТП.....	58
Глава 4. Компьютеры и контроллеры	58
4.1. Одноплатные компьютеры для встраиваемых систем	58
4.2. Основные требования к одноплатным компьютерам.....	61
4.3. Стандарты встраиваемых компьютеров	63
4.4. Варианты крепления и монтажа плат.....	77
4.5. Программируемые логические контроллеры, критерии выбора.....	79
4.6. Сервоконтроллеры	85
4.6.1. Сервоконтроллеры, имеющие отдельное законченное исполнение.....	86
4.6.2. Состояние рынка сервоконтроллеров, перспективы развития	94
Глава 5. Исполнительные устройства	97
5.1. Сервоприводы.....	97
5.1.1. Тенденции в развитии сервоприводов.....	97
5.1.2. Техническое развитие сервоприводов	98
5.1.3. Области применения сервоприводов.....	101
5.1.4. Обзор наиболее распространенных систем сервоприводов.....	102
5.1.5. Обзор серводвигателей	107
5.1.6. Обзор рынка современных сервоприводов	108
5.1.7. Синхронные сервоприводы Panasonic	108
5.1.8. Синхронные сервоприводы Metronix	112
5.1.9. Синхронные сервоприводы Mitsubishi Electric.....	117
5.1.10. Синхронные сервоприводы OMRON	122
5.2. Преобразователи частоты и софтстартеры для асинхронных двигателей.....	125
5.2.1. Практическое применение преобразователей частоты в системах автоматизации.....	129
5.2.2. Рекомендации применения преобразователей частоты и их настройки	133
5.2.3. Перечень наиболее распространенных преобразователей частоты.....	139

5.2.4. Пример подключения модуля MCO-305 к преобразователю частоты VLT® AutomationDrive фирмы Danfoss	143
Глава 6. Датчики	149
6.1. Общие сведения о датчиках	149
6.2. Омические датчики	152
6.3. Потенциометрические датчики.....	154
6.4. Фоторезисторные датчики	155
6.5. Индуктивные датчики.....	156
6.6. Магнитоупругие датчики	157
6.7. Трансформаторные датчики.....	157
6.8. Емкостные датчики	159
6.9. Индукционные датчики.	160
6.10. Термоэлектрические датчики.....	163
6.11. Пьезоэлектрические датчики	164
6.12. Фотоэлектрические датчики, фотоэлектрические реле.....	165
6.13. Датчики линейных ускорений (акселерометры).....	167
6.14. Вращающиеся трансформаторы	168
6.15. Датчики обратной связи в системах управления слеящими электроприводами	170
6.15.1. Резольвер.....	171
6.15.2. Инкрементный датчик угловых перемещений.....	176
6.15.3. Датчик линейных перемещений	179
Глава 7. Вспомогательное оборудование.....	181
7.1. Автоматические выключатели.....	181
7.2. Контактторы	182
7.3. Кнопки, светосигнальная арматура	183
7.4. Устройства защитного отключения	183
7.5. Кабель-канал.....	185
7.6. Источники бесперебойного питания.....	186
7.7. Устройства искрозащиты на стабилитронах	190
7.8. Электротехнические корпуса и шкафы.....	191
7.9. Заземление в системах промышленной автоматизации.....	195
ЛИТЕРАТУРА	197

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время управление любым технологическим процессом базируется на применении цифровой вычислительной техники (ВТ). Промышленность, транспорт, системы связи и защита окружающей среды полностью зависят от компьютерных систем управления. Практически ни одна техническая система от железной дороги до ядерного реактора – не работает без той или иной формы управления. В совокупности текущее состояние науки и техники характеризуется отсутствием реальной альтернативы компьютерному управлению процессами.

Комплексная автоматизация неразрывно связана с термином «**Процесс**». В общем случае термин «процесс» означает последовательную смену состояний какого-либо объекта. Соответственно, исполнение компьютерной программы – это тот же процесс.

Физический процесс – это последовательная смена состояний объектов физического мира. Процессами в этом смысле являются движение, химические реакции или теплообмен. Примеры процессов – промышленное или химическое производство, кондиционирование воздуха в помещении (изменение влажности и температуры), движение транспортного средства (изменение его скорости и положения).

Немецкий технический стандарт DIN66201 дает точное определение **физического процесса** как «комбинации связанных событий в системе, в результате которых изменяются, перемещаются или запасаются материя, энергия и информация».

Технический процесс определен как «процесс, физические переменные которого можно измерить и изменить техническими средствами». Разница между физически техническим и техническим процессом заключена в том, что физический процесс не обязательно должен управляться извне, а технический процесс включает обработку информации для достижения заданной целевой функции.

Любой физический процесс характеризуется входом и выходом в виде:

- материальных компонентов;
- энергии;
- информации.

Примеры входных и выходных потоков приведены в табл. В.1

Таблица В.1

Вход/выход	Химический реактор	Кондиционирование воздуха	Управление самолетом
Ввод материальных компонентов (сырья)	Потоки исходных реагентов	—	—
Выход материальных компонентов (продукции)	Один или несколько новых продуктов	—	—
Ввод энергии	Нагревание или охлаждение	Нагревание или охлаждение	Топливо к двигателям
Выход энергии	Получение тепла от реакции	Излучение тепла	Движение самолета
Ввод информации	Управление входными потоками реагентов и дополнительным нагревом	Управление температурой и интенсивностью поступления нагревающей/ охлаждающей жидкости	Управление двигателем и аэродинамическими поверхностями
Вывод информации	Измерение температуры, давления, интенсивности потоков, концентрации	Измерение температуры	Измерение скорости, высоты, углов атаки, крена, курса

В общем случае материальные компоненты (энергию и информацию) можно рассматривать как входные и выходные потоки, которые изменяются в ходе физических либо технических процессов.

Помимо описанных компонентов, существуют посторонние по отношению к цели процесса факторы, которыми нельзя управлять, но которые оказывают влияние на процесс. Эти факторы рассматриваются как возмущения, отклоняющие процесс от штатного рабочего режима (рис. В.1). Возмущения сами по себе не являются физическими величинами, а проявляются в виде случайных флуктуаций в потоках материалов, энергии и информации.

Процесс производства заключается в выпуске продукции из сырья с соответствующими затратами (вводом) энергии. Входной информацией являются технологические инструкции, выраженные в виде набора параметров, которые можно явно контролировать. Выходная информация есть набор измеряемых переменных и параметров, которые описывают текущее состояние процесса и его изменение. Большое количество информации заключено в самом конечном продукте. Информация, следовательно, есть не только данные для наблюдения и управления, но

технологические и организационные процедуры, вплоть до циркулирующих по кабинетам служебных документов и заявок на поставку.

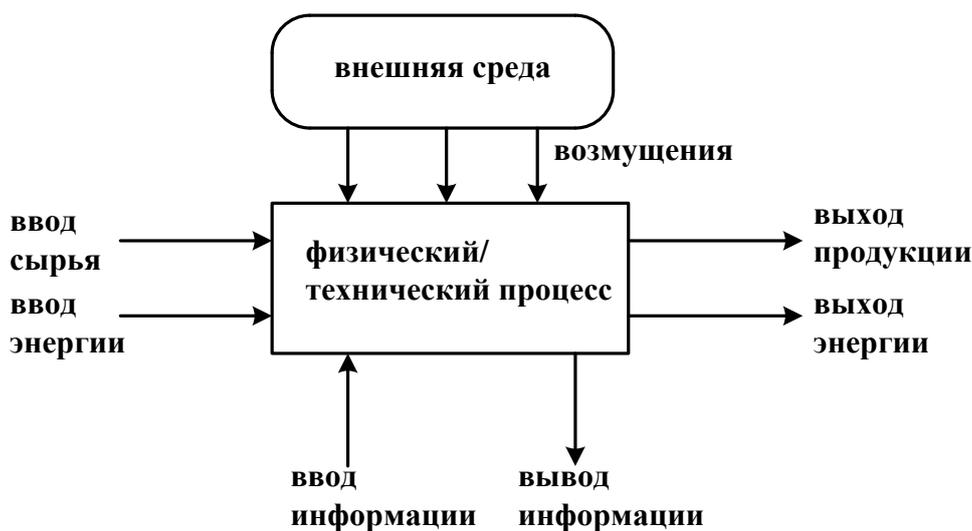


Рис. В.1. Обобщенная модель физического/технического процесса

Для обработки информации применяются компьютерные и микропроцессорные системы (рис. В.2), которые выполняют две основные функции:

- 1) контролируют, находятся ли параметры технического процесса в заданных пределах;
- 2) индицируют соответствующие управляющие воздействия, чтобы параметры оставались в этих пределах даже при наличии внешних возмущений.

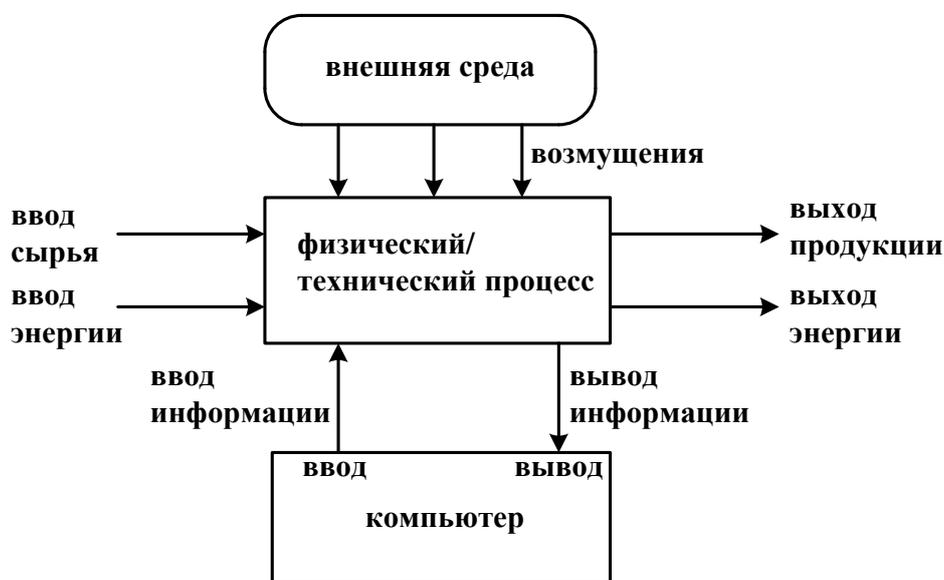


Рис. В.2. Применение компьютера в управлении процессом

Раздел 1

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Глава 1

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ КОМПЛЕКС- НОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

1.1. Основные понятия и определения в автоматических систе- мах управления технологическими процессами

Механизация производственного процесса – замена физического труда человека работой механизмов, получающих энергию от какого-либо источника.

Автоматизация производственного процесса – замена физического труда человека, затрачиваемого на управление механизмами и машинами, работой специальных устройств, обеспечивающих это управление (регулирование различных параметров, получение заданной производительности и качества продукта без вмешательства человека и т.п.).

Автоматизация управления – замена физического и умственного труда человека, затрачиваемого на управление, работой технических средств, обеспечивающих выполнение определенных управленческих работ с заданной производительностью и качеством без вмешательства человека, за которым остаются только функции наблюдения и подготовки технических средств к работе.

При автоматизации управления производственным процессом работа технических средств управления обеспечивает автоматический сбор и обработку данных о состоянии процесса, воздействие на процесс через исполнительные механизмы, вывод данных оператору или выполнение части этих функций.

Автоматизированная система – понятие, имеющее двойной смысл. С одной стороны, под автоматизированной системой понимается организационная система, использующая технические средства. С другой стороны, понятие используется для пояснения совершенства технической системы управления.

В автоматизированной системе, в отличие от автоматической, технические средства не обеспечивают полной автоматизации, и для ус-

пешного функционирования системы необходим труд людей – операторов, диспетчеров и др.

Главное отличие автоматизированной системы от автоматической – отсутствие замкнутой цепочки управления в автоматических исполнительных механизмах.

Техническая система управления – совокупность технических средств, имеющих между собой электрические, пневматические, гидравлические или иные информационные связи, а также независимые средства оргтехники, используемые для управления производственными или другими процессами по правилам и методике, предусмотренной в соответствующей организационной системе управления. Техническая система управления может предназначаться для управления производственными процессами, участками, цехами, производствами, предприятиями и т.д.

Автоматизированная система управления (АСУ) производством или технологическим процессом – разновидность систем управления, включающая технические средства, которые обеспечивают замену физического и умственного труда человека работой машин для сбора, переработки и вывода информации, требующих, однако, затрат труда операторов для своего обслуживания и выполнения отдельных функций управления. Для автоматизированных систем управления характерны значительные затраты труда на сбор, обработку и вывод информации, несмотря на использование технических средств.

Такие системы необходимы, например, в том случае, если часть первичной информации не может быть получена и введена в технические средства или системы автоматически, без участия человека, или если автоматическое управление с помощью технических средств невозможно, или если это можно сделать, но ценой неоправданно больших затрат или неоправданного усложнения технических средств.

Автоматизированные системы управления могут быть информационными и информационно-советующими. Последние отличаются тем, что предлагают оператору проекты готовых решений, рекомендации. Например, «Советчик мастера» – система, автоматически собирающая информацию о состоянии производственного процесса, обрабатывающая эту информацию и выдающая решения в виде рекомендаций. Система «замыкается» человеком, который принимает окончательное решение и реализует его. Такие системы считаются разомкнутыми, хотя цепь воздействий «замыкается» человеком.

Автоматическая система управления – разновидность систем управления, включающая технические средства, которые обеспечивают автоматический сбор, обработку информации, в том числе принятие

решения и реализацию принятого решения. Затраты труда человека необходимы только для контроля функционирования и обслуживания системы. Автоматическая система управления состоит из управляемого объекта и автоматического управляющего устройства, взаимодействующих между собой. Объектов и управляющих устройств в системе может быть несколько.

Применение самых совершенных технических средств не определяет полностью степени совершенства системы. Она в значительной мере зависит от идей, заложенных в организационной части системы (например, будет ли система адаптивной, обучающейся).

При внедрении автоматическая система управления технологическим процессом обычно используется вначале как автоматизированная система, работающая в информационном режиме, а после накопления опыта, проверки надежности системы и т.п. переводится в автоматический режим.

Непрерывные системы (аналоговые) – системы, в которых входные сигналы действуют непрерывно в течение всего времени работы системы.

Дискретные (импульсные) системы – с прерывистым воздействием сигнала на входе.

1.2. Обобщенная структура автоматической системы управления технологическими процессами

В общем случае обобщенная структура АСУ ТП приведена на рис. 1.1.

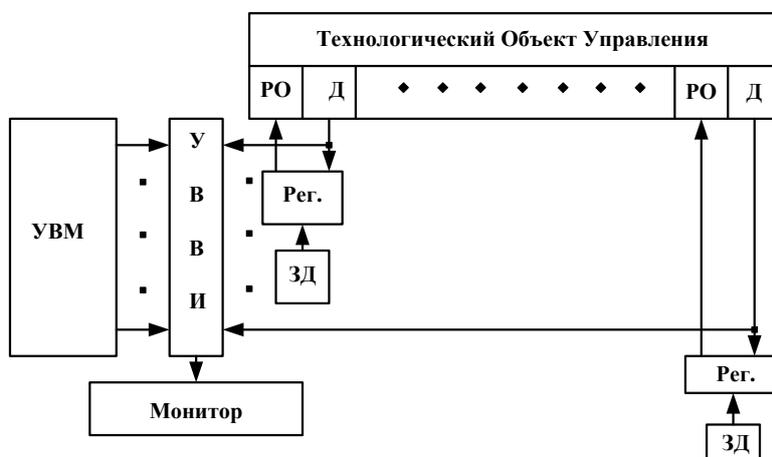


Рис. 1.1. Обобщенная структура АСУ ТП

Элементы обобщенной структуры АСУ ТП:

Д – датчик.

РО – регулирующий орган (клапан, вентиль, заслонка).

Рег. – автоматический регулятор (поддерживает на заданном уровне значение технологической величины).

ЗД – задатчик (вводит в автоматический регулятор значение регулируемой величины).

УВВИ – Устройство Ввода и Вывода Информации.

УВМ – Управляющая Вычислительная Машина. УВМ может работать в следующих режимах:

1. Режим слежения – обработка поступившей информации, вывод информации на монитор.
2. Режим советника – анализ ситуации, рекомендации по исправлению возникших ошибок.

1.3. Функции автоматизированных систем управления

Система управления процессом обычно выполняет много различных функций. Полный перечень представлен на рис. 1.2.

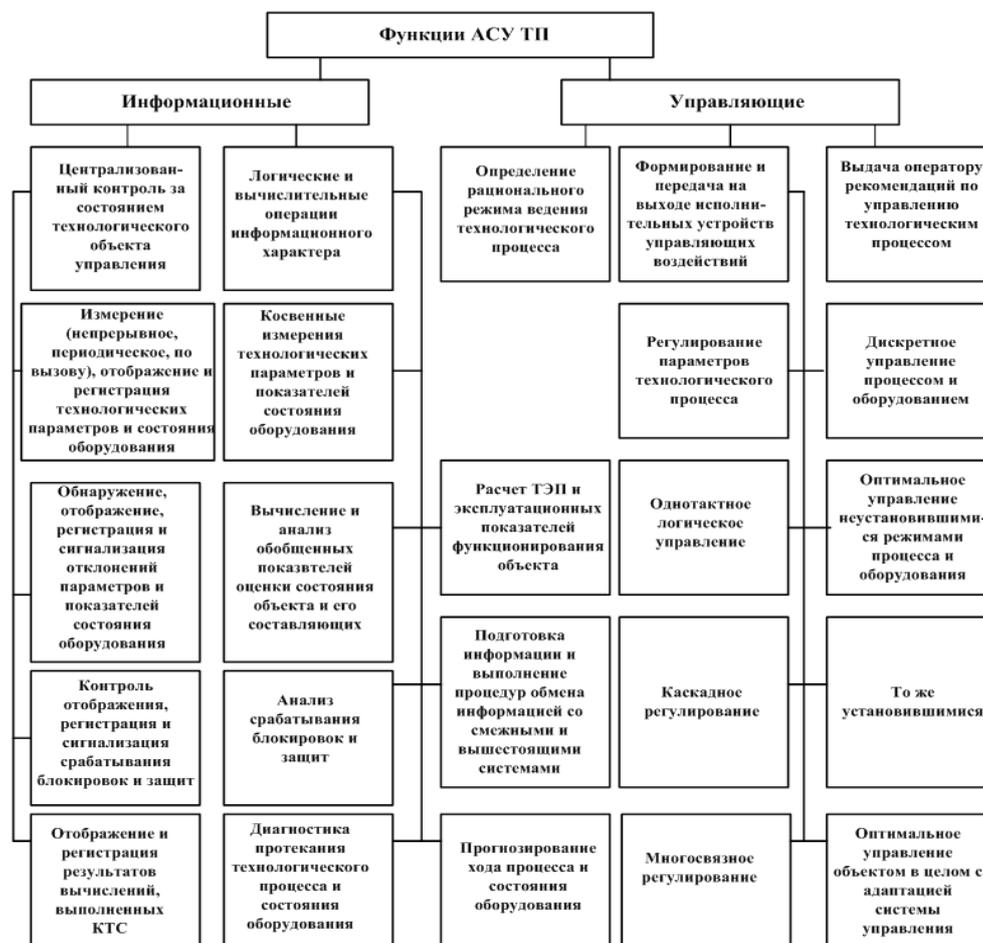


Рис. 1.2. Функции АСУ ТП по ГОСТ 16084–75



Рис. 1.3. Основные функции управления

Описанный выше перечень функций можно разделить на три большие группы (рис.1.3):

- 1) сбор и оценка данных технического процесса – мониторинг;
- 2) управление некоторыми параметрами технического процесса;
- 3) связь входных и выходных данных – обратная связь, автоматическое управление.

Мониторинг

Мониторинг процесса, или сбор информации о процессе, – это основная функция, присущая всем системам управления, осуществляющая сбор значений переменных процесса, их хранение и отображение в подходящей для человека-оператора форме.

Мониторинг может быть ограничен лишь выводом первичных или обработанных данных на экран монитора или на бумагу, а может включать более сложные функции анализа и отображения. Например, переменные, которые нельзя непосредственно измерить, должны рассчитываться или оцениваться на основе имеющихся измерений. Другой классической чертой мониторинга является проверка, что измеренные или рассчитанные значения находятся в допустимых пределах.

Когда функции системы управления процессом ограничены сбором и отображением данных, все решения об управляющих действиях принимаются оператором. Этот вид управления, называемый супервизорным, или дистанционным управлением (supervisory control), был очень распространен в первых системах компьютерного управления процессами. Он до сих пор применяется, особенно для очень сложных и относительно медленных процессов, где важно вмешательство человека. Примером являются биологические процессы, где определенную часть наблюдений нельзя выполнить без помощи автоматики.

При поступлении новых данных их значение оценивается относительно допустимых границ. В более развитой системе контроля несколько результатов могут комбинироваться на основе более или менее сложных правил для проверки: находится ли процесс в нормальном состоянии или вышел за какие-либо допустимые пределы. В еще более современных решениях, в особенности построенных на экспертных системах или базах знаний, комбинированная оперативная информация от датчиков объединяется с оценками, сделанными операторами.

Управление

Управление – это функция, обратная мониторингу. В прямом смысле управление означает, что команды ЭВМ поступают к исполнительным механизмам для воздействия на физический процесс. Во многих случаях на параметры процесса можно воздействовать только опосредованно, через другие параметры управления.

Автоматическое управление

Система, которая действует автономно и без прямого вмешательства оператора, называется автоматической. Система автоматического управления может состоять из простых контуров управления (одного для каждой пары входных и выходных переменных процесса) или из более сложных регуляторов со многими входами и выходами.

Существуют два основных подхода к реализации обратной связи в вычислительных системах. При традиционном прямом цифровом управлении (ПЦУ, Direct Digital Control – DDC) центральная ЭВМ рассчитывает управляющие сигналы для исполнительных устройств. Все данные наблюдения передаются в полном объеме от датчиков к центру управления, а управляющие сигналы – обратно к исполнительным устройствам.

В системах распределенного прямого цифрового управления (Distributed Direct Control) вычислительная система имеет распределенную архитектуру, а цифровые регуляторы реализованы на основе локальных процессоров, т.е. расположены вблизи технического процесса. ЭВМ верхних уровней управления рассчитывают опорные значения, а локальные процессоры ответственны главным образом за непосредственное управление техническим процессом, т.е. выработку управляющих воздействий для исполнительных механизмов на основе данных локального мониторинга. Эти локальные ЭВМ включают в себя цифровые контуры управления.

С точки зрения структурирования уровней управления и обработки различие между прямым цифровым управлением и распределенным прямым цифровым управлением заключается в том, что в первом случае, даже при наличии нескольких ЭВМ, они занимаются только передачей информации и не принимают решений (кроме центрального) об управляющих действиях. В распределенной структуре ЭВМ на уровнях процесса, участка и общего управления могут действовать более или менее автономно и не зависеть от центральной ЭВМ. Такое различие влияет на надежность сложной системы. Так, при отказе центральной ЭВМ управляющая система, при прямом цифровом управлении, останавливается, а распределенная система, даже при отказе одного или нескольких элементов утратит часть функций, но будет продолжать работу.

В более простых системах, осуществляющих управление опорными значениями (setpoint control), ЭВМ рассчитывает опорные значения, которые затем поступают на обычные регуляторы. ЭВМ в этом случае выполняет роль только вычислителя (без измерения и генерации управляющих воздействий).

1.4. Виды обеспечения автоматических систем управления технологическими процессами

Автоматическая система управления технологическими процессами (АСУ ТП) включает оперативный персонал, организационное и информационное, программное и техническое обеспечение (ГОСТ 16084–75).

Оперативный персонал АСУ ТП включает технологов-операторов автоматизированного технологического комплекса (АТК), осуществляющих управление технологическим объектом, и эксплуатационный персонал АСУ ТП, обеспечивающий функционирование системы. Ремонтный персонал в состав оперативного персонала не включается.

Оперативный персонал может работать как в самом контуре управления, так и вне его. В первом случае оперативный персонал реализует функции управления, используя рекомендации, выдаваемые комплексом технических средств. Вне контура управления оперативный персонал задает системе режим работы, контролирует работу системы и, при необходимости (при отказе оборудования, аварийной ситуации), принимает на себя управление технологическим процессом.

Организационное обеспечение АСУ ТП включает описание функциональной, технической и организационной структур системы, инструкции и регламенты для оперативного персонала по работе АСУ ТП. Оно должно содержать совокупность правил и предписаний, обес-

печивающих требуемое взаимодействие оперативного персонала между собой и комплексом средств.

Информационное обеспечение АСУ ТП включает систему кодирования технологической и технико-экономической информации, справочную и оперативную информацию. Информационное обеспечение содержит описания всех сигналов и кодов, используемых для связи технических средств. Формы выходных документов и другие формы представления информации не должны вызывать трудностей у персонала при их использовании.

В информационном обеспечении в соответствии с требованиями технического задания предусматривается некоторая избыточность, позволяющая обеспечить расширение массивов при развитии системы, а также совместимость со смежными и вышестоящими системами по содержанию, системе кодирования и форме представления информации, используемой для обмена.

Программное обеспечение АСУ ТП включает общее программное обеспечение, поставляемое со средствами вычислительной техники, в том числе программы-диспетчеры, транслирующие программы, операционные системы, библиотеки стандартных программ и др. Специальное программное обеспечение – совокупность программ, реализующих функции конкретной системы и обеспечивающих функционирование комплекса технических средств, в том числе встроенное программное обеспечение (ПО).

1.5. Централизованная и распределенная архитектура АСУ ТП

Системы управления технологическими процессами применяются в различных отраслях промышленности. При этом каждому объекту автоматизации присущи индивидуальные особенности технологического процесса, которые приходится учитывать разработчику. Однако в целом всю совокупность технологических процессов разработчики делят на следующие типы:

- 1) непрерывный (Process Control);
- 2) дискретно-непрерывный (Batch Control);
- 3) дискретный (Factory automation)

Управление описанными технологическими процессами подчиняется общей (классической) модели управления, приведенной на рис. 1.4.

Архитектура современных систем АСУ ТП в настоящее время имеет два варианта реализации:

1. Централизованные – это системы которые объединяют управляющую подсистему, систему ввода-вывода и отображения. Примеры

подобных систем: станки с ЧПУ, пульты управления плавильными печами, автоматизированные линии.

2. Распределенные – это системы которые позволяют:
- приблизить управляющий контроллер к объекту;
 - разделение подсистем управления и визуализации;
 - управление в масштабе предприятия.



Рис. 1.4. Модель управления технологическими процессами

Централизованные АСУ ТП (рис. 1.5) обычно имеют 2 уровня: верхний и нижний. На верхнем уровне располагается вычислительное устройство. На нижнем – исполнительные приводы, датчики обратных связей.

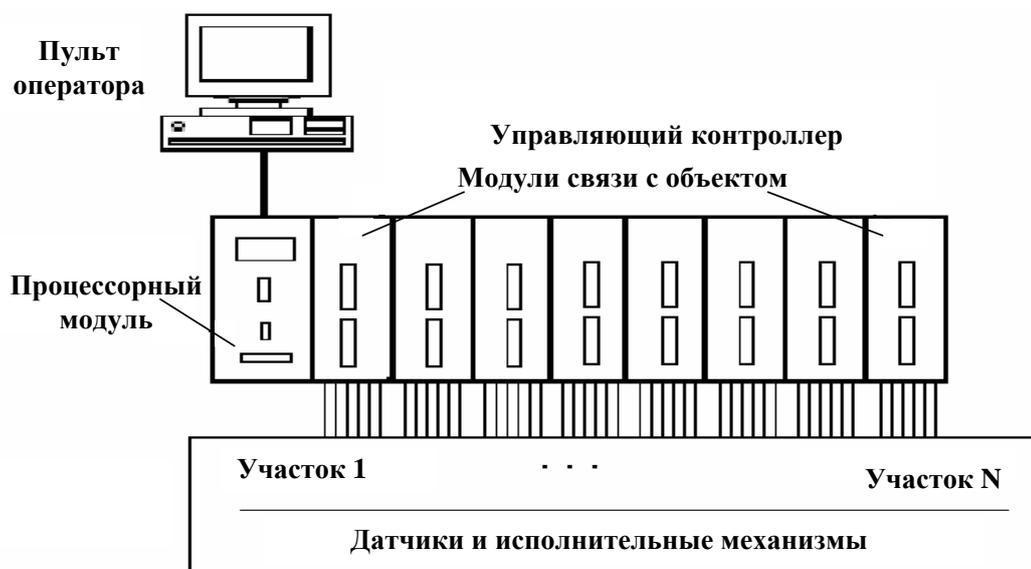


Рис. 1.5. Централизованная АСУ ТП

Централизованная АСУ ТП имеет ряд недостатков:

- Необходимость применения в управляющих контролерах мощных высокопроизводительных процессоров. Поскольку все задачи решаются только одним процессором, то при большом количестве периферийных устройств и модулей ввода-вывода он должен иметь достаточно большую производительность.
- Большие трудности, связанные с расширением системы. При расширении или модернизации требуется замена конструктива контроллера и модификация или полная замена программного обеспечения.
- Невысокая надежность системы и повышенная подверженность действию помех. Поскольку электронные блоки системы при таком подходе сосредоточены в одном месте, то к ним приходится прокладывать большое количество силовых и сигнальных цепей (от датчиков и исполнительных устройств), что при больших габаритах системы снижает надежность и увеличивает стоимость (большой расход дорогостоящей кабельной продукции) системы.

Распределенные АСУ ТП (рис. 1.6), как правило, разделяются на 3 уровня: верхний, нижний и средний. На верхнем уровне располагается автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора.

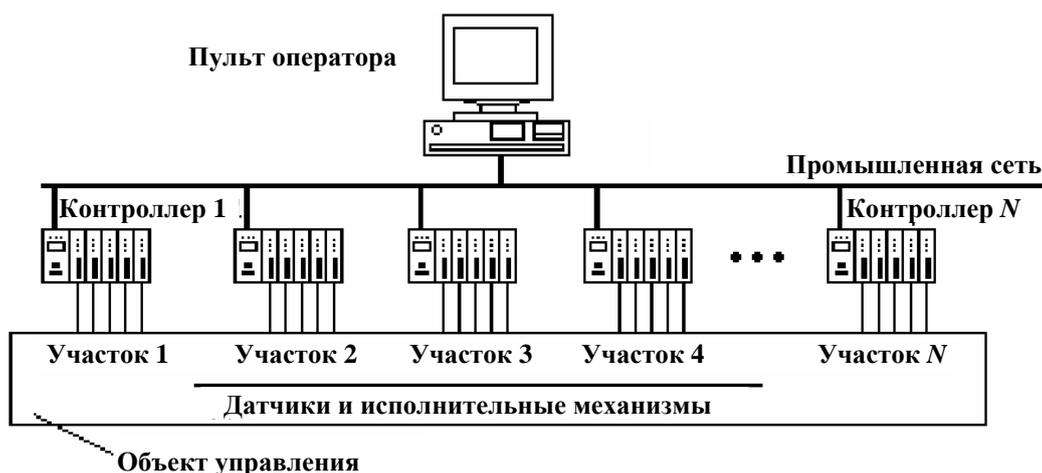


Рис. 1.6. Распределенная АСУ ТП

Достоинства распределенной АСУ ТП:

- Высокая надежность работы системы. Четкое распределение обязанностей в распределенной системе делает ее работоспособной даже при выходе из строя или зависании любого узла. При этом работоспособные узлы продолжают осуществлять сбор данных и управление процессом или осуществляют последовательный останов технологического оборудования.

- Малое количество проводных соединений. Контроллеры имеют возможность работать в тяжелых промышленных условиях, поэтому они, как правило, устанавливаются в непосредственной близости от объекта управления. В связи с этим существенно снижается расход кабельной продукции, а для организации сети, как правило, достаточно всего двух или четырех проводов.

- Легкая расширяемость системы. При появлении дополнительных точек контроля и управления достаточно добавить в системы новый узел (контроллер, интеллектуальный модуль ввода-вывода).

- Малые сроки проведения модернизации. Наибольший выигрыш достигается при модернизации крупных систем, поскольку большая часть аппаратных средств и программного обеспечения не требует модификации.

- Использование компьютеров и контроллеров меньшей мощности.

- Легкость тестирования и отладки. Поскольку все элементы системы активны, легко обеспечить самодиагностику и поиск неисправности.

В последнее время в области автоматизации технологических процессов наметился переход от централизованных систем, в которых один мощный процессорный модуль управляет большим количеством пассивных периферийных устройств, к распределенным, где каждый элемент системы является активным устройством сбора данных и управления.

В связи с резким удешевлением микропроцессорной техники с одновременным повышением их отказоустойчивости, уменьшением их размеров и увеличением их функциональных возможностей появилось большое количество малогабаритных контроллеров и компьютеров, обладающих невысокой стоимостью. Наличие развитых сетевых средств позволяет связывать эти контроллеры в единую сеть, причем различные узлы (контроллеры, интеллектуальные модули ввода-вывода, компьютеры) этой сети могут быть разнесены друг от друга на достаточно большие расстояния, что делает наиболее предпочтительным вариант распределенной АСУ ТП.

1.6. Классификация промышленных объектов управления

- По характеру установившегося значения выходной величины объекта управления при действии на его вход ступенчатого сигнала выделяют объекты с самовыравниванием и без самовыравнивания.

- По количеству входных и выходных величин и их взаимосвязи объекты делятся на одномерные (один вход и один выход) и многомерные.

- Многомерные могут быть многосвязными, когда наблюдается взаимное влияние каналов регулирования друг на друга, либо несвязными, взаимосвязь между каналами которых мала.

- По виду статических характеристик объекты делятся на линейные и нелинейные. В последних статическая характеристика может быть гладкой, линеаризуемой в окрестности заданной точки, либо носить существенно нелинейный характер. (Статические характеристики объекта управления устанавливают связь между установившимися значениями входа и выхода объекта.) При наличии в объекте нескольких нелинейностей графическим методом определяется его суммарная нелинейная характеристика. Большинство систем регулирования относятся к классу систем автоматической стабилизации режима работы объекта относительно его рабочей точки (относительно номинального режима работы). В этом случае в процессе работы отклонения переменных относительно рабочей точки будут малы, что позволяет использовать линейные модели объекта управления. Однако при смене рабочей точки происходит изменение коэффициента усиления объекта, что будет негативно влиять на динамику замкнутой системы.

- Объекты могут быть как стационарными, так и нестационарными. В нестационарных объектах параметры изменяются с течением времени (дрейфуют). Примерами таких объектов могут быть химический реактор с катализатором, активность которого падает с течением времени, или аэрокосмический аппарат, масса которого по мере выгорания топлива уменьшается. Такие явления должны учитываться при проектировании соответствующих систем управления.

- В зависимости от интенсивности случайных возмущений, действующих на объект, они делятся на стохастические и детерминированные. В реальных условиях часто точно неизвестны ни точка приложения возмущения F , ни его характер (рис. 1.7).

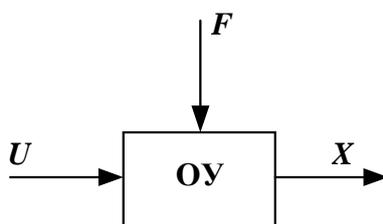


Рис. 1.7. Внешние возмущения в объектах управления

Известно, что лишь при наличии достаточно точной математической модели объекта можно спроектировать высококачественную систему управления этим объектом. Причем, согласно принципу Эшби, сложность управляющего устройства должна быть не ниже сложности объекта управления. Поэтому основной целью построения математической модели объекта управления является определение структуры объекта, его статических и динамических характеристик.

Особенно важно определение структуры для многомерных и многосвязных объектов управления. В тоже время, для локальных объектов управления определение структуры может быть сведено к определению порядка дифференциального уравнения, описывающего объект. Кроме того, оцениваются входные сигналы и возмущения, действующие на объект (их статистические характеристики, точки приложения, максимальные амплитуды). Значение этих характеристик позволяет выбрать структуру регулятора и рассчитать параметры его настройки, ориентируясь также на критерий качества работы этой системы.

Наряду с динамической частью $W(p)$ в структуре объекта могут содержаться различные запаздывания в сигналах управления, измерения и состояния (рецикла), рис. 1.8.

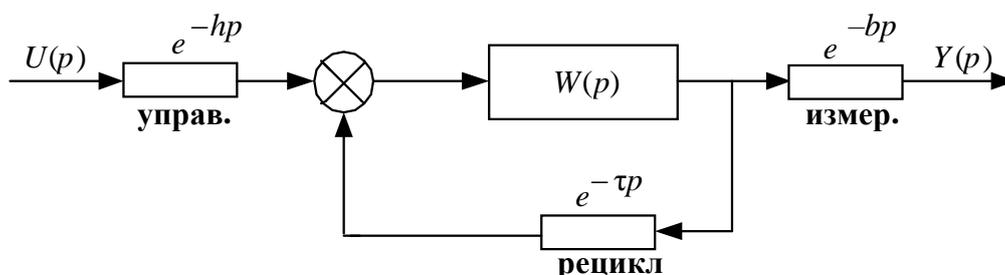


Рис. 1.8. Объект управления с запаздыванием

В промышленных объектах под рециклом понимается возврат части продукта с выхода объекта на его вход с целью повторной переработки.

Большинство промышленных объектов управления имеют запаздывания. Наличие запаздывания объясняется конечной скоростью распространения потоков информации в технологических объектах (транспортное запаздывание). Наряду с этим при понижении порядка модели объекта, вводят дополнительное динамическое запаздывание. Для этого выделяют одну наибольшую постоянную времени, а все остальные малые постоянные времени заменяют звеном динамического запаздывания.

1.7. Параметры технологических процессов, классификация

Управление осуществляется на основании получаемой информации. Состояние технологических объектов находит отражение в особом виде информации – параметрах.

Параметр в технике – величина, характеризующая какое-либо свойство процесса, явления, системы, технического устройства. Параметры можно классифицировать по многим признакам (рис. 1.9).



Рис. 1.9. Классификационные признаки параметров технологических процессов

По характеру физических величин параметры можно, в свою очередь, классифицировать по ряду признаков, как показано на рис. 1.10.



Рис. 1.10. Классификация параметров по характеру физических величин

По характеру измерений параметры можно также подразделить в соответствии с классификацией измерительных сигналов, приведенной на рис. 1.12 в соответствии с характером измерений показанной на рис. 1.1. Под сигналом в общем случае понимают материальный носитель информации. Измерительный сигнал несет информацию в виде отражения физического процесса либо представляет собой кодовый или дискретный сигнал.

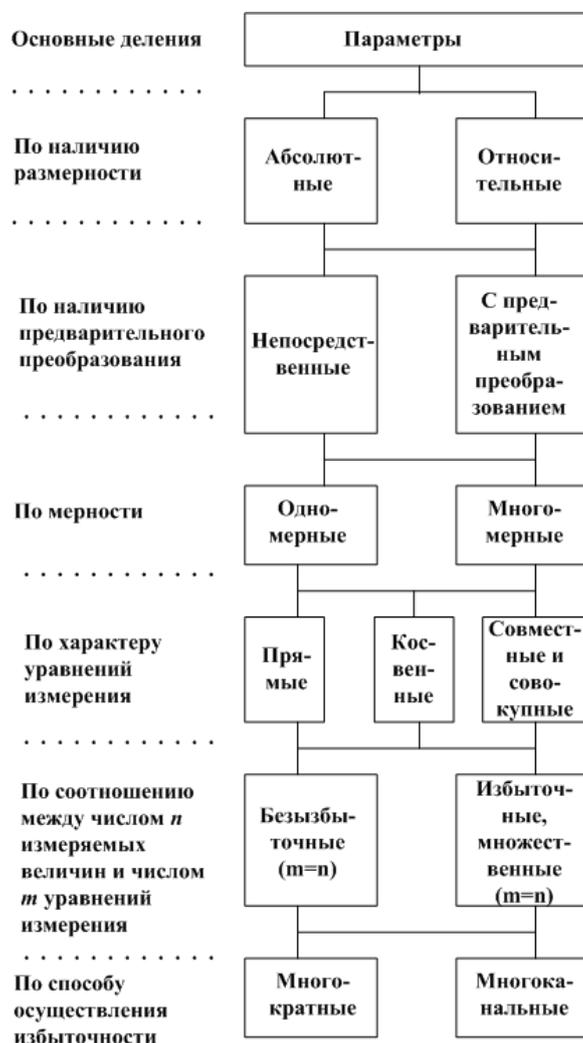


Рис. 1.11. Классификация параметров по характеру измерений



Рис. 1.12. Классификация параметров по видам измерительных сигналов

По характеру дискретизации параметры подразделяются на непрерывные и прерывистые, или дискретизированные во времени или в пространстве. Непрерывные параметры (аналоговые) характеризуют физический процесс, непрерывный во времени или пространстве. Дискретизированные параметры определяют физический процесс только в определенные моменты времени или в определенных точках пространства (например, импульсы электрического тока, совокупность электрических зарядов, расположенных в отдельных точках поверхности диэлектрика).

По отношению к технологическому процессу параметры подразделяются на входные, промежуточные и выходные. Входные параметры характеризуют качество и количество исходных продуктов, данные лабораторных испытаний, показания аналитических приборов и т.п. Промежуточные параметры отражают ход технологического процесса в промежуточных звеньях технологической цепочки. Выходные параметры характеризуют обобщенные технико-экономические показатели, которыми оценивают качество и экономическую эффективность работы объектов и процессов.

По информативному признаку параметры подразделяются на информативные и неинформативные. Информативные параметры – параметры процесса, являющиеся измеряемыми физическими величинами. Неинформативные параметры – параметры, не связанные функцио-

нально с измеряемой величиной. Неинформативные параметры могут оказывать воздействие на средство измерений, вызывающее изменение его показаний.

По возможности контроля параметры можно классифицировать на контролируемые и неконтролируемые, причем первые определяются показаниями аналитических приборов, операциями учета и др. Неконтролируемые параметры характеризуются влияниями случайных процессов флуктуаций характеристик материала, изменениями окружающей среды, влияниями износа и старения оборудования, явлениями наводок и т.д.

По направлению управления параметры подразделяются на управляемые и управляющие. Управляемые параметры характеризуют состояние технологического процесса, который подвергается управлению. Управляющие параметры определяют воздействия, с помощью которых поддерживаются заданный технологический режим процесса, изменения состояний агрегатов и технических средств и т.п.

По степени локализации параметры классифицируются на сосредоточенные и распределенные. Сосредоточенные параметры характеризуют состояние локальных участков процесса, например нагрузку на балку на малом участке по сравнению с длиной балки. Распределенные параметры определяют физические величины, распределенные в пространстве, например распределенную емкость линии электропередач.

1.8. Классификация технических средств регулирования

По роду используемой энергии:

- а) гидравлические;
- б) пневматические;
- в) электрические;
- г) смешанные.

По закону регулирования:

- а) П-закон;
- б) И-закон;
- в) ПИ-закон;
- г) ПД-закон;
- д) ПИД-закон.

По характеру поддержания заданного значения:

- а) стабилизирующие;
- б) программные регуляторы;
- в) экстремальные – поддерживают значение регулируемой величины на наибольшем или наименьшем уровне;
- г) следящие системы – слежение за некоторым входным сигналом, изменяющимся во времени по заранее неизвестной зависимости;

1.9. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации

Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП) – совокупность устройств получения, передачи, хранения, обработки и представления информации о состоянии и ходе различных процессов и выработки управляющих воздействий на них. ГСП состоит из унифицированных элементов, модулей и блоков, допускающих информационное, энергетическое и конструктивное сопряжение в агрегатных комплексах и автоматизированных системах управления. В ГСП входят электрические, пневматические и гидравлические приборы.

ГСП составляет техническую основу для реализации информационно-управляющих систем в промышленной и непромышленной сферах народного хозяйства страны. ГСП охватывает измерительную, управляющую и регулирующую технику.

На сегодняшнем этапе основой ГСП являются агрегатные системы. Каждая система регулирования строится за счет комбинирования, изменения порядка подключения различных блоков и модулей, обменивающихся унифицированными сигналами.

Блок – конструктивное сборное устройство, выполняющее одну или несколько функций, смонтированное в одном корпусе.

Модуль – более простая структурная единица, унифицированный узел, выполняющий одну элементарную операцию и входящий в состав блока или прибора.

Исполнительные механизмы – устройства для преобразования управляющей информации в механическое перемещение регулирующего органа и развивающее мощность, достаточную для потребителя.

Реализация типовых функций АСУ ТП осуществляется в ГСП аппаратными средствами, иерархическая структура которых изображена на рис. 1.13. Средства первого уровня включают в себя датчики и исполнительные устройства. Средства второго и третьего уровней выполняют функции программного управления, стабилизации режимов работы объекта управления и вывода на режим, включая ручное управление и программно-логическое. Задачи исследования объекта управления и оптимизации процесса управления решаются средствами четвертого уровня. С помощью этих же средств выполняются и функции представления информации, и сервисные функции.

Одна из задач ГСП – создание ограниченной номенклатуры унифицированных устройств, способных максимально удовлетворить потребности экономики, а одним из важнейших принципов, лежащих

в основе построения ГСП, является требование конструктивного сопряжения устройств в системах контроля, регулирования и управления технологическими процессами.

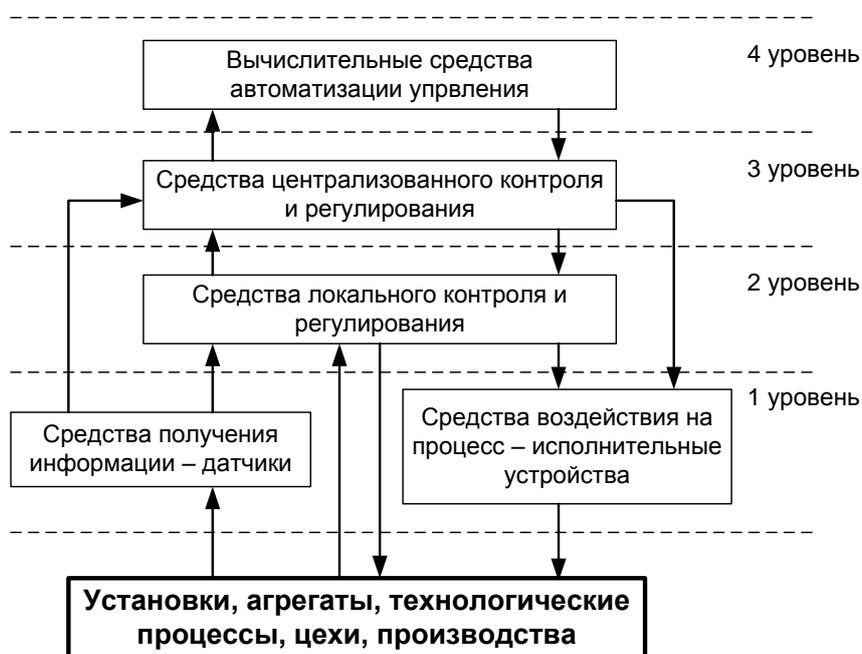


Рис. 1.13. Иерархическая структура технических средств ГСП

Унифицированный сигнал ГСП – это сигнал дистанционной передачи информации с унифицированными параметрами, обеспечивающий информационное сопряжение (интерфейс) между блоками, приборами и установками ГСП. В зависимости от вида унифицированных параметров в ГСП применяют унифицированные сигналы четырех групп:

- 1) тока и напряжения электрические непрерывные;
- 2) частотные электрические непрерывные;
- 3) электрические кодированные;
- 4) пневматические.

Электрические непрерывные сигналы по ГОСТ 9895–78 следующие:

- токовые сигналы постоянного тока: 0...5 мА (наиболее распространены); –5 ... +5 мА; 0...20 мА; 4...20 мА;
- сигналы по постоянному напряжению 0...10 мВ; –10 ... +10 В; 0...24 В; 0...48 В; 0...110 В; 0...220 В;
- сигналы по переменному напряжению 0...1 В; 0...2 В; 0...36 В; 0...127 В; 0...220 В.

Частотные электрические непрерывные сигналы по ГОСТ 10938–75: 0...8 Гц; 2...4 Гц; 4...8 Гц; 0...100 Гц.

Пневматические сигналы: 0,1...1,0 атм; 0,01...0,1 МПа.

Глава 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ АСУ

2.1. Оценка качества регулирования АСУ

Качество регулирования АСУ оценивают по некоторым ее свойствам, которые определяют с помощью критериев качества. Совокупность критериев качества регулирования разделяют на 4 группы:

1. Критерии точности – используют величину ошибки в различных типовых режимах.

2. Критерии величины запаса устойчивости – оценивают удаленность АСУ от границы устойчивости.

3. Критерии быстродействия – оценивают быстроту реагирования АСУ на появление задающего и возмущающего воздействий.

4. Интегральные критерии – оценивают обобщенные свойства АСУ: точность, запас устойчивости, быстродействие.

Существует два основных подхода к оценке качества:

- Первый использует информацию о временных параметрах системы: $h(t) = \omega(t)$; расположение полюсов и нулей передаточной функции замкнутой системы $\Phi(t)$.

- Второй использует информацию о некоторых частотных свойствах системы: полоса пропускания, относительная высота резонансного пика и т.д.

Для оценки точности используется величина ошибки в различных типовых режимах. Типовые режимы движения состоят в подаче на вход сигналов с нормированными метрологическими характеристиками. Различают следующие типовые режимы изменения задающих сигналов (рис. 2.1):

1. Ненулевое, неподвижное состояние.
2. Движение с постоянной скоростью.
3. Движение с постоянным ускорением.
4. Движение по гармоническому закону.

На рис. 2.1 показаны режимы: ненулевого, неподвижного положения координаты; движение с постоянной скоростью; движение с постоянным ускорением. Перемещение координаты с постоянной скоростью легко получить интегрированием постоянного сигнала, а для получения координаты, движущейся с постоянным ускорением, необходимо интегрировать координату, перемещающуюся с постоянной скоростью.

На практике, при работающем образце, наиболее целесообразно использовать прямые методы оценки качества регулирования по переходным характеристикам.

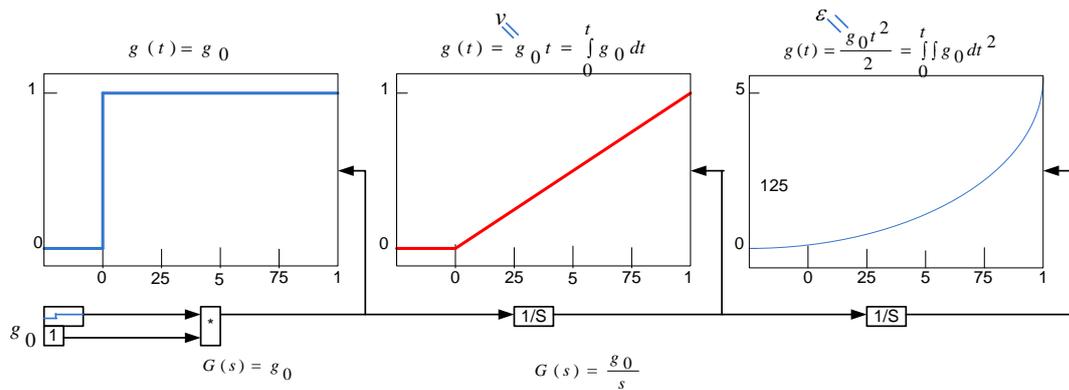


Рис. 2.1. Типовые задающие движения

Для оценки качественных показателей работы АСУ в динамических режимах анализируется ее реакция на ступенчатое единичное воздействие (рис. 2.2). При этом переходная характеристика должна находиться в пределах заданной области, параметры которой определяются требованиями технологического агрегата. Исходя из параметров переходной характеристики, можно определить реальные запасы устойчивости АСУ по модулю и фазе. Переходная характеристика оценивается совокупностью параметров, которые называются показателями качества. К ним относятся:

1) перерегулирование σ – отношения максимального отклонения управляемой переменной относительно ее установившегося значения в направлении, противоположном начальному отклонению;

2) колебательность μ – число максимумов или минимумов переходной характеристики за время регулирования;

3) длительность переходного процесса $t_{\text{п}}$ – это время, по истечении которого отклонение управляемой переменной относительно установившегося значения становится и остается по абсолютной величине меньше заданного значения Δ , определяемого требованиями, предъявляемыми к АСУ;

4) время достижения первого максимума t_{max} – момент времени, в который управляемая переменная достигает своего максимального значения;

5) время установления $t_{\text{п max}}$ – промежуток времени, по окончании которого управляемая переменная в первый раз достигает своего установившегося значения;

6) частота собственных колебаний САУ.

Запас устойчивости САУ оценивают по величине перерегулирования

$$\sigma = 100 \cdot \frac{y_{\text{max}} - y_{\infty}}{y_{\infty}}, \%$$

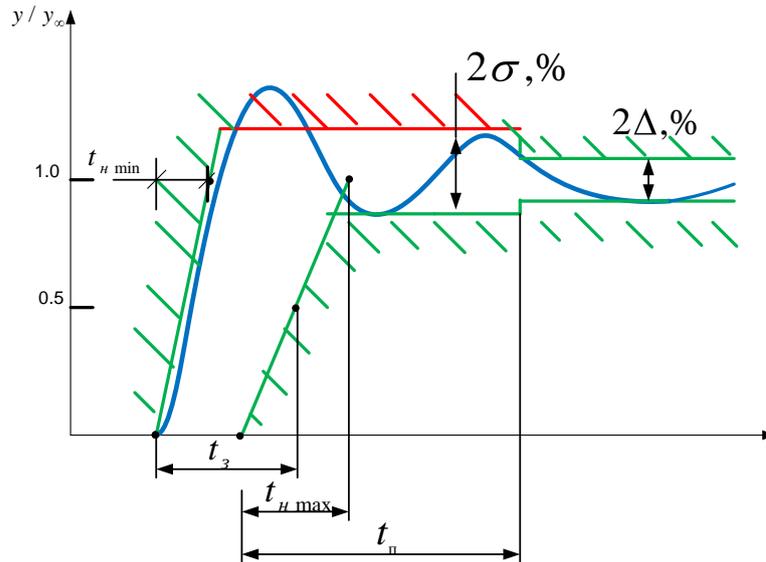


Рис. 2.2. Переходная характеристика САУ

Зависимости значения запаса устойчивости САУ по фазе и колебательности системы, в зависимости от величины перерегулирования, приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Варианты σ	0 %	10...30 %	50...70 %
Применяемость	редко	часто	избегают
Запас по фазе	90°	$60...30^\circ$	$30...10^\circ$
Число колебаний	0	1, 2	3, 4, ...

Быстродействие САУ оценивают по времени окончания переходного процесса t_n при заданной допустимой ошибке (трубке):

$$\Delta \in 5; 2,5; 1,5; 1; 0,5; \dots \left[\frac{\%}{\%} \right];$$

от y_∞ – установлено ГОСТ.

Частоту единичного усиления разомкнутой системы $\omega_{ср}$ можно оценить по частоте колебаний переходной функции.

Примечание: При синтезе САУ используют область допустимых отклонений регулируемой величины. Время нарастания выходной координаты САУ ограничено:

$t_{n \min}$ – допустимым ускорением координат и предельными колебательными режимами;

$t_{n \max}$ – требуемым быстродействием.

2.2. Надежность систем автоматизации

Наиболее остро проблема надежности проявляется в системах автоматизации, поскольку выход одного (на первый взгляд не существенного) компонента может привести к сбою работы всей системы в целом.

Одним из важнейших параметров системы является **коэффициент готовности** (*availability*), который определяется как вероятность того, что элемент, устройство или система в данный момент времени работает правильно. Эта вероятность представляет собой отношение времени, в течение которого элемент исправен, ко всему сроку службы. Коэффициент готовности элемента или устройства – это функция вероятности отказа в течение заданного периода времени, за которое элемент или устройство приводится в рабочее состояние после отказа.

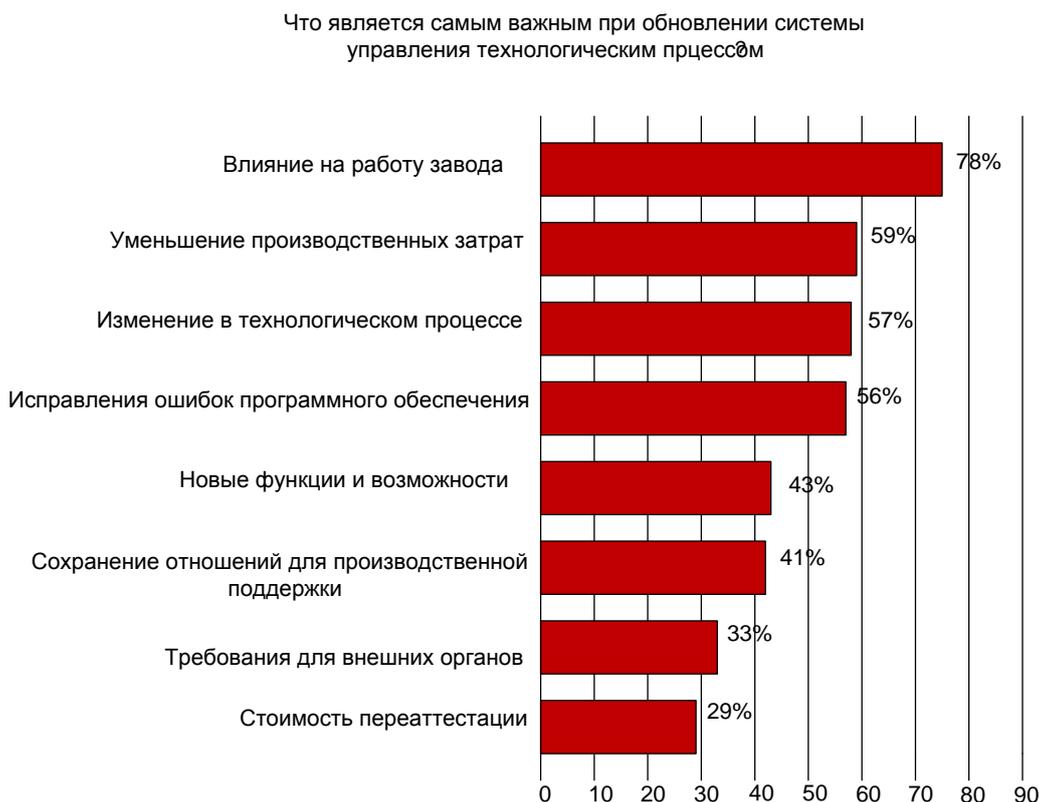


Рис. 2.3. Важнейшие показатели при обновлении системы управления технологическим процессом

Из-за взаимодействия между частями и компонентами полная надежность системы может оказаться достаточно малой, если не все составляющие имеют высокую надежность. В качестве примера, можно рассмотреть производственную линию, включающую десять последовательно соединенных станков. Если каждый станок все время повторяет одни и те же операции и делает одну ошибку в среднем на каждую сотню операций, то

вероятность того, что станок не сделает ошибку за цикл, равна 99 %. Для получения приемлемого конечного продукта все станки должны работать правильно, так что общая вероятность $0,99^{10} = 0,904$, т.е. вероятность безошибочной работы всей линии всего лишь около 90 %. Ввиду этого на производстве широко используемый метод улучшенной суммарной надежности на конвейерах – создание промежуточных складов между станками. В этом случае удастся избежать остановки всего конвейера при отказе одного станка.

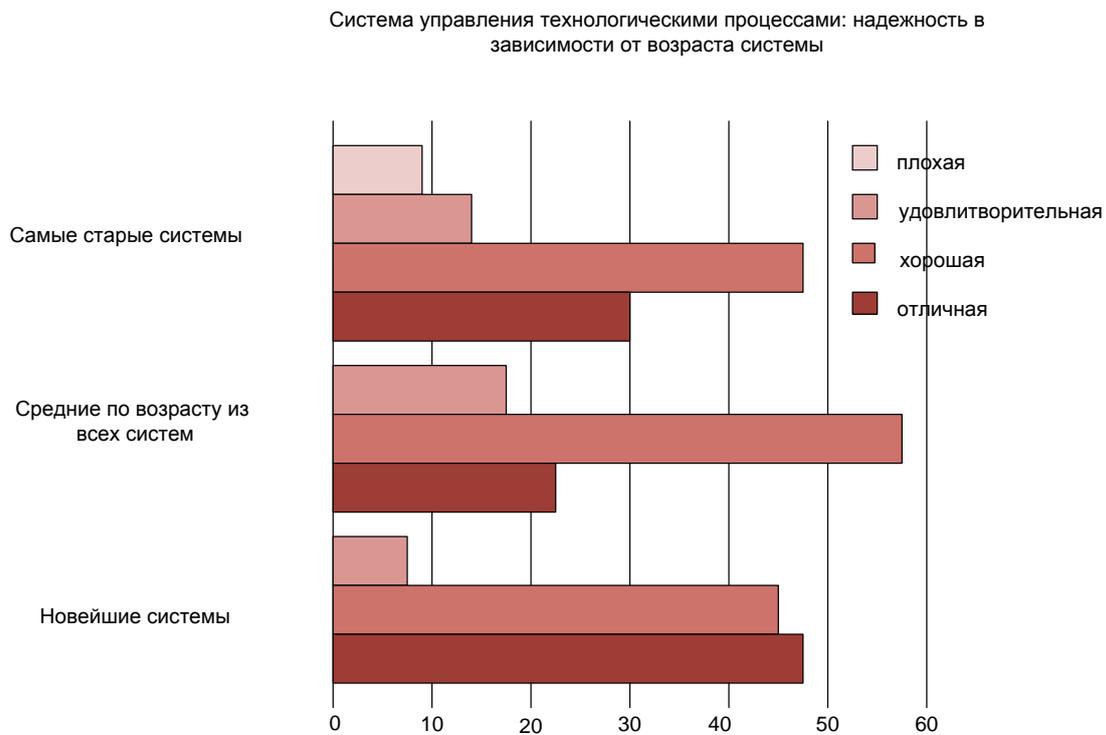


Рис. 2.4. Надежность в зависимости от возраста системы

2.2.1. Модели для расчета надежности

При расчетах надежности сложной системы обычно полагают, что возможные ошибки не коррелируют, т.е. являются независимыми событиями. Это предположение верно при условии, что неисправный элемент не влияет на другие.

Для n элементов

$$n = n_h \cup n_f,$$

где n_h – число правильно функционирующих элементов, а n_f – число неисправных элементов. Оба слагаемых – суть функции времени,

а их сумма n при этом постоянна. **Функция надежности** определяется следующим образом:

$$R(\xi) = \frac{n_h(\xi)}{n} = 1 - \frac{n_f(\xi)}{n}.$$

Интенсивность отказов определяется следующим образом:

$$z(\xi) = \frac{f(\xi)}{R(\xi)} = -\frac{1}{R(\xi)} \cdot \frac{d}{dt} R(\xi).$$

Если элемент остается в работе до времени t , интенсивность отказа показывает вероятность того, что этот элемент откажет сразу после момента t . Функцию интенсивности отказов $z(\xi)$ можно оценить, наблюдая большое число элементов в течение длительного периода времени. Несколько упрощенный вид функции $z(\xi)$ представлен на рис. 2.5. Из-за своей формы эта кривая называется «корытообразной» функцией.

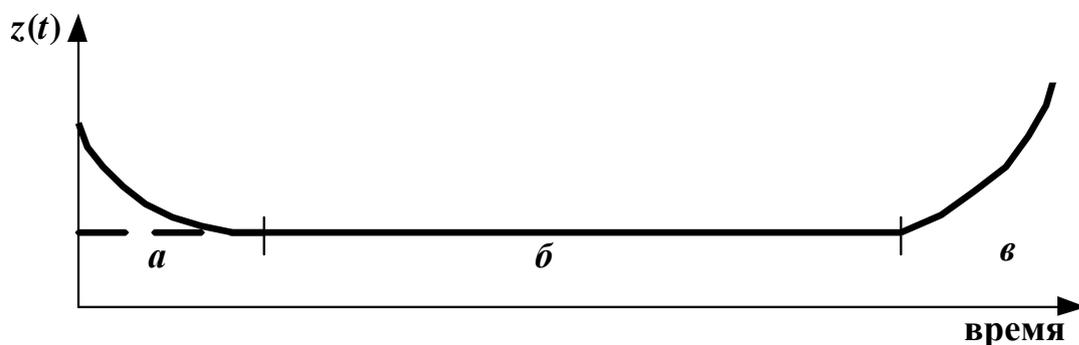


Рис. 2.5. Интенсивность отказов элементов $z(\xi)$ как функция времени:
 a – отказы на первоначальных этапах работы; b – случайные отказы;
 v – отказы, связанные со старением

При рассмотрении системы обычно анализируется центральная часть кривой интенсивности отказов. При этом полагают, что система функционировала достаточно долгое время для того, чтобы избежать «детские болезни». С другой стороны, система не должна находиться в эксплуатации так долго, что ее компоненты уже износились и уровень отказов снова увеличился. С этими ограничениями $z(\xi)$ можно принять за константу $z(\xi) = \lambda$. Тогда решением уравнения для интенсивности отказов будет

$$R(\xi) = e^{-\lambda t}.$$

Основной интерес для пользователя или производителя системных компонентов представляет собой время, в течение которого компонент

может функционировать в нормальных условиях до появления неисправности. Мерой этого является **среднее время наработки на отказ** (Mean Time to Failures – МТТФ), т.е. математическое ожидание экспоненциального распределения

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda}.$$

Мера готовности системы получается на основе среднего значения промежутка времени, в течение которого система функционирует правильно. Это значение называется **средним временем между отказами** (Mean Time Between Failures – МТВФ). Аналогично мера времени, в течение которого система не функционирует, называется **средним временем восстановления** (Mean Time to Repair – МТТР) и представляет собой время от появления неисправности до восстановления работоспособности системы.

Коэффициент готовности A элемента или подсистемы можно определить выражением

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}.$$

Для систем, состоящих из одного устройства или элемента, коэффициент готовности легко подсчитать. Для систем с параллельным соединением одинаковых элементов увеличивается надежность, так как только если все компоненты, соединенные параллельно, неисправны, функция системы больше не обеспечивается.

2.2.2. Надежность систем управления процессами

Частота отказов существенно влияет на надежность системы. При этом существенную роль играют ремонты. С этой точки зрения электронным системам управления технологическими процессами отдается предпочтение. Например, в случае отказа релейного оборудования поиск неисправности с помощью вольтметра занимает длительное время. В случае же применения ПЛК тестирование и отладка с помощью ручного программатора и соответствующего ПО гораздо проще и быстрее. Однако при этом уровень обслуживающего персонала должен иметь более высокую подготовку.

Помимо этого, суммарная надежность зависит от структуры системы управления технологическим процессом. Например, при централизованном управлении единственная ЭВМ выполняет функции сбора, обработки и выдачи управляющих воздействий на исполнительный механизм и его

поломка вызывает полный останов всей системы управления и технологического процесса. При распределенном управлении функции управления и регулирования выполняются локальными устройствами, расположенными в непосредственной близости от технологических процессов. Поломка локальной или даже центральной ЭВМ влияет только на часть функций, поскольку системные компоненты независимы.

Опыт разработки таких систем показал, что отказы вызываются либо неправильным функционированием отдельных элементов, либо нарушением взаимосвязи между элементами.

В связи с этим появилось понятие «отказоустойчивое решение». **Отказоустойчивое решение** – это решение, гарантирующее, что система как целое будет функционировать даже при наличии неисправностей. В первую очередь это означает, что система строится не только с применением высоконадежных компонентов, но и проектируется таким образом, что отдельные неисправности не повлияют на ее работу. Здесь учитывается не только аппаратная составляющая, но и программная, которая также может содержать ошибки либо непредсказуемо реагировать на поступающую непредусмотренную информацию.

В отказоустойчивую систему закладываются элементы избыточности. Выделяют следующие типы избыточности:

- физическая избыточность;
- информационная избыточность;
- избыточность по времени.

Физическая избыточность обычно достигается дублированием некоторых элементов системы. Когда элемент перестает работать, его заменяют другим элементом. В случае ограничения на стоимость системы обычно дублируют лишь необходимую составляющую системы. Например, покупка базового комплекта ZIP.

Информационная избыточность используется, например, в коммуникационных протоколах в виде служебной информации, добавляемой к пакету для того, чтобы обеспечить восстановление искажений в полезной информации, резервирование данных на внешних носителях информации или теневое хранение переменных.

Избыточность по времени заключается в том, что сначала выполняется действие, а затем оценивается его результат. Если результат неправильный, то действие выполняется заново. Применение тайм-аутов и ограничений максимального количества повторений помогают избежать бесконечных циклов.

Например, отказоустойчивость в коммуникационных протоколах обмена достигается комбинацией информационной и временной избыточностью. Применение контрольной суммы в пакетах данных обеспе-

чивает информационную избыточность, а процедуры подтверждения приема сообщения, запросы на новую передачу являются примерами избыточности.

2.2.3. Надежность программного обеспечения

Ошибки в программах часто могут вводить в заблуждение, их труднее найти, чем неисправности аппаратной части.

Проблемы с программными ошибками зависят от сложности системы, могут многократно воспроизводиться и остаться незамеченными в конечном продукте. Программные ошибки являются обычным делом в сложных проектах, в частности в автоматизированных системах, а сообщается о них только в некоторых очень громких случаях.

В отличие от аппаратной части программное обеспечение не изнашивается. Дефекты программы возникают на стадии разработки, так что теоретически они могут быть устранены с самого начала. Самая главная проблема заключается в том, как их обнаружить. Математические и логические методы помогают разрабатывать не содержащие ошибок программы. Однако на практике, несмотря на многочисленные тесты, большая часть программ все-таки содержит ошибки на начальном этапе их эксплуатации. В случае появления непредусмотренных входных данных программа может повести себя так, как не запланировано.

На практике достаточно часто требования к программе меняются в процессе разработки, что может привести к появлению дополнительных ошибок.

Надежность программы, в соответствии с функциональными требованиями, должна быть определена, например, с помощью тестов. Так, например, корпорация Microsoft привлекает тысячи тестировщиков по всему миру для отладки своего ПО. Такой метод применим, если требования не являются слишком жесткими, например, как в авиастроении, где специфика надежности выражается цифрами 10^{-9} .

Метод, применяемый для повышения показателей надежности в технике управления авиационным и железнодорожным движением, – это использование избыточных систем. Несколько одинаковых систем создаются параллельно разными рабочими группами. Основное допущение – ошибки не должны повторяться. Результат – это комбинация нескольких решений. Например, на бортовой ЭВМ полностью управляемого электроникой аэробуса А-320 установлено пять разных систем, которые были разработаны на основе одинаковых требований пятью независимыми рабочими группами. Выбор окончательного управляющего воздействия выбирается с помощью электромеханического селектора.

Надежность ПО – это свойство программного обеспечения своевременно выполнять в заранее указанных условиях эксплуатации вперед установленные функции.

В самом общем случае основную функцию ПО АСУТП можно рассматривать как своевременное получение некоторого результата или решения y при переработке входной информации x из множества X .

Под x понимается контрольная информация от технологического объекта управления (ТОУ), сигналы о состоянии технологического оборудования и ТСА, команды управленческого персонала и вышестоящих АСУ и т.п. Результат y зависит как от случайного $x \in X$, так и от свойств ПО, носящих во многом стохастический характер. Поэтому установление каких-либо диапазонов изменения y и тем более границ допустимых или разумных результатов Y оказывается в этом случае невозможным. Вследствие этого становится затруднительной строгая качественная оценка принадлежности данного y множеству «разумных» результатов Y .

Решение о выполнении или невыполнении функций ПО вынужден принимать пользователь и, в меньшей степени – разработчик программы или программист. Таким образом, надежность – это свойство программ обеспечивать «разумные», по мнению пользователя и программиста, решения при переработке входной информации x из условного множества X и нормальном функционировании управляющей вычислительной машины (УВМ).

Отказы ПО делятся на случайные и неслучайные:

Неслучайные отказы ПО обусловлены действием так называемых компьютерных вирусов.

Случайные отказы ПО наблюдаются в случайные моменты времени работы УВМ или процессора. По своим последствиям эти отказы классифицируются на случайные сбои программ и устойчивые отказы ПО.

Под **сбоем ПО** понимают случайное событие, заключающееся в появлении «неразумного» результата $y \in Y$ и исчезающее при последующих прогонах (запусках) программ.

Сбой ПО – это самоустраняющийся (перемежающийся) отказ программы, возникающий при некоторых, возможно случайных, состояниях УВМ и информации $x \in X$, наблюдаемый пользователем в случайные моменты времени и исчезающий без вмешательства программиста.

Устойчивый отказ ПО наблюдается в случайный момент процессорного времени в форме «неразумного» результата $y \in Y$ при $x \in X$ в нормальном функционировании УВМ.

Причиной отказа ПО служит некоторая систематическая ошибка программы, после устранения которой программистом данный отказ исчезает, т.е. имеет место восстановление ПО.

Различают ошибки первичного и вторичного типа.

Ошибки первичного типа связаны с неточностями в текстах программ и возникают при подготовке носителей и документации ПО, при записях кодов на алгоритмических языках и трансляции программ на машинный язык, а также из-за неточностей алгоритмов и при неверных или некорректных постановках решаемых на УВМ вычислительных задач.

Ошибки вторичного типа во многом являются следствием первичных ошибок программ. К ним относят ошибки:

- вычислительные (неверная индексация и подсчет временных параметров, расхождение результата ручного и машинного счета, появление неустойчивых операций и т.п.);
- логические (пропуск логических условий, неверные краевые условия и др.);
- сопряжения интерфейсов (межмодульных, программно-технических, информационных).

Ошибки первичного и вторичного типов порождаются на этапах разработки спецификаций на ПО; проектирования ПО; реализации программ.

Устранение ошибок или восстановление программ осуществляется программистом на этапе отладки ПО, который заканчивается сдачей готовых программ в эксплуатацию. Однако, как показывает опыт исследования надежности сложных ПО, около половины ошибок программ не выявляется на стадии отладки и сдачи ПО в эксплуатацию. Эти ошибки (преимущественно вторичные) проявляют себя в процессе эксплуатации ПО в случайные моменты времени и приводят к отказам программ.

Отказы ПО, при его эксплуатации, имеют ряд отличий от отказов технических элементов:

- Отказ ПО не приводит к разрушению или поломке программного элемента. Отказы ПО не связаны с физическим износом элемента (в частности, носителя программ).
- Отказ ПО не коррелирован с процессорным и тем более астрономическим временем или числом прогонов ПО программ пользователем.
- При длительной эксплуатации ПО все его ошибки могут быть устранены и программы становятся абсолютно надежными. Если обозначить через $N(t)$ число невыявленных ошибок ПО в произвольный момент процессорного времени t , то формально имеет место соотно-

шение $\lim N \rightarrow 0$, справедливое при условии, что в процессе восстановления программ в них не вносятся новые ошибки.

Опыт создания и эксплуатации ПО реального времени показывает, что при устранении одних ошибок вносятся другие. Поэтому, при длительной эксплуатации ПО, общее число ошибок может оставаться постоянным или даже возрастать.

Основные показатели надежности ПО:

- **функция ненадежности (или отказа) ПО** $Q(t) \rightarrow$ Вероятность того, что отказ ПО появится до момента времени t ;
- **функция надежности ПО** $P(t) \rightarrow$ Вероятность того, что отказ ПО появится после момента времени t ;
- **интенсивность отказов ПО** $\lambda(t) = \frac{dQ}{dt}$;
- **средняя наработка на отказ ПО** $t = \int P(t) dt$.

В сложном ПО надежность определяется надежностью отказов самой «ненадежной» программы, имеющей наибольшее значение интенсивности отказов λ .

Для повышения надежности ПО следует в первую очередь улучшить характеристики самых «ненадежных» программ (более жесткое динамическое тестирование «ненадежных» программ, расширяя при этом набор тестовых задач). Если тестирование не уменьшает интенсивность проявления ошибок, то переписывают «ненадежную» программу, стремясь усилить ее структурированность путем увеличения числа готовых и хорошо изученных программных модулей и стандартных подпрограмм и применения апробированных межмодульных интерфейсов. Понижению интенсивности λ способствует и переход на другой, более высокий, язык программирования.

Другой путь повышения надежности ПО связан с резервированием и введением в программную систему некоторой избыточности.

Применительно к ПО АСУТП различают три вида резервирования:

- временное;
- информационное;
- программное.

Временное резервирование ПО заключается в многократном прогоне одних и тех же «ненадежных» программ и сравнении результатов расчета. Такое нагруженное резервирование позволяет устранять влияние случайных сбоев и выявлять случайные ошибки, требующие восстановления программ.

Информационное резервирование ПО основано на дублированных исходных и промежуточных данных. Эти данные могут проходить

дополнительную обработку, например усреднение, до ввода в ПО, где они обрабатываются один раз; или обрабатываться одной и той же программой дважды, т.е. информационное резервирование подкрепляется временным.

Программное резервирование предусматривает наличие в ПО двух или больше разных программ для получения одного и того же результата или реализации одной функции. Здесь возможно нагруженное и ненагруженное резервирование.

2.3. Особенности цифрового управления

2.3.1. Управление в реальном времени

Особенность применения микропроцессорных систем управления в АСУ ТП заключается в том, что обработка данных в первую очередь зависит не от компьютера и его производительности, а от событий во внешнем мире, т.е. процессов. Система управления должна достаточно быстро реагировать на внешние события и постоянно обрабатывать поток входных данных, чаще всего не имея возможности изменить их количество или скорость поступления. Одновременно может потребоваться и выполнение других операций, например: обмен информацией с оператором, вывод данных на экран и реакция на определенные сигналы. Этот режим обработки данных получил специальное название – **режим реального времени (Real Time Mode)**.

В настоящее время наиболее часто режим реального времени рассматривается в отношении систем реального времени обслуживающих пользовательские приложения на различных компьютерах и контроллерах.

Определения реального времени:

1. По определению Дональда Гиллиеса [4], системой реального времени является такая система, корректность функционирования которой определяется не только корректностью выполнения вычислений, но и временем, в которое получен требуемый результат.

2. Другое определение системы реального времени – аппаратно-программный комплекс, который должен своевременно и предсказуемо реагировать на поступающие извне раздражители [5].

К таким операционным системам (ОС) относятся VxWorks, OS-9, PSOS, QNX, LynxOS. Эти системы обладают быстрым временем реакции на события и прерывания, компактностью кода, хорошей встраиваемостью и другими преимуществами, характерными для операционных систем с микроядерной архитектурой. Общими требованиями для всех операционных систем реального времени являются следующие:

- 1) максимальное время отклика на событие;
- 2) предсказуемость;
- 3) возможность безотказной работы в течение длительного времени;
- 4) наличие системы приоритетов;
- 5) возможность параллельного выполнения нескольких задач.

Из вышеперечисленных требований следует, что системы реального времени должны предсказуемо, в пределах максимально допустимого времени реагировать на различные типы внутренних и внешних событий. Исходные требования ко времени реакции системы и другим временным параметрам формируются техническим заданием на систему либо логикой ее функционирования.

Исследования различных операционных систем показывают следующее:

1) для достижения реакции системы в пределах 100 мкс используются вышеописанные операционные системы реального времени [6];

2) в интервале от 100 мкс до 1 мс могут быть использованы многозадачные операционные системы с расширениями реального времени UNIX, Linux, Windows NT, CE.

3) в диапазоне до 1 мс могут быть использованы классические многозадачные операционные системы, такие как Windows NT/XP, Linux без расширения реального времени.

Достижение максимальной производительности зависит от сложности вычислений, производимых в функционирующем программном обеспечении. Однако для операционных систем Windows NT, Linux получить гарантированное время реакции невозможно. Поэтому использование таких операционных систем без какой-либо дополнительной доработки ограничивается областями, где опоздание реакции системы не приведет к тяжелым последствиям или эта система используется для моделирования и отработки тех или иных алгоритмов управления технологическим оборудованием.

Опыт применения Windows NT в различных областях автоматизации показывает, что в большинстве случаев операционная система без каких либо изменений используется в системах «мягкого реального времени» [7, 8]. В большинстве случаев это интеллектуальные терминалы, верхний уровень SCADA-систем. В общей массе производимых устройств с числовым программным управлением операционные системы с интегрированным ядром реального времени (RTX, Falcon, Hyperkernel, IA-SPOX и др.) на сегодняшний день используются редко. Это обусловлено отсутствием аппаратной поддержки большинства современных контроллеров, а также невозможностью построения компактной системы (требования к flash-памяти не менее 10 Мбайт). Под

функционированием в режиме **мягкого реального времени** понимается работа операционной системы, иногда допускающей получение данных с некоторым опозданием [9, 10].

Историческая справка:

- Одним из первых примеров использования управляющей ЭВМ является применение в 1959 г. лампового компьютера RW300 компании Thomson Ramo Woolridge с целью автоматического слежения за давлением, расходом и температурой.

- Другим наиболее значимым применением управляющей ЭВМ была реализация системы управления «Apollo-11» для первой лунной экспедиции, 1969 г. Управляющая программа занимала 64 Кбайта ОЗУ. Реализация программы потребовала разработки новой теории цифрового управления.

2.3.2. Понятие системы и примеры типичных приложений цифрового управления

Производственные процессы и управляющие ими системы состоят из многочисленных и разнообразных элементов, сложным образом взаимодействующих друг с другом. Эти элементы связаны между собой так, чтобы обеспечить обмен материей, энергией и информацией для получения определенного конечного результата.

С точки зрения автоматизации под термином «система» понимается любой объект, который рассматривается, с одной стороны, как единое целое, а с другой – как совокупность связанных между собой определенным образом составляющих. Цель системы – получить результат, качественно или количественно превосходящий сумму результатов работы отдельных ее компонентов. Знание динамики позволяет предсказать поведение системы и выбрать правильное управляющее воздействие в соответствии с поставленной целью. Рассчитать необходимый регулятор. В крупных технических задачах одной из важнейших проблем является структурирование системы. В процессе эксплуатации взаимодействуют множество людей, происходит постепенная замена оборудования и добавление новых функций. Сложную систему необходимо рассматривать как с общих позиций, так и с позиций всех ее компонентов.

Понятие системы в данном ключе характеризуется следующим образом:

1) при описании сложной системы ее можно разбить на более простые составляющие. При этом необходимо выбрать правильный уровень детализации;

2) нет необходимости знать внутренние механизмы элемента для того, чтобы предвидеть его в целом. Для управления достаточно знать соотношение вход/выход.

3) для описания систем и их элементов можно применять разнообразные математические методы. Однако эти методы можно использовать, только когда все элементы системы и окружающая ее среда описываются количественными соотношениями;

В качестве примера цифрового управления процессом рассмотрим структуру, приведенную на рис. 2.6.

Показанная структура состоит из следующих частей:

- 1) управляющей ЭВМ;
- 2) каналов обмена информацией;
- 3) аналого-цифровых (АЦП) и цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП);
- 4) датчиков и исполнительных механизмов;
- 5) физического/технического процесса.

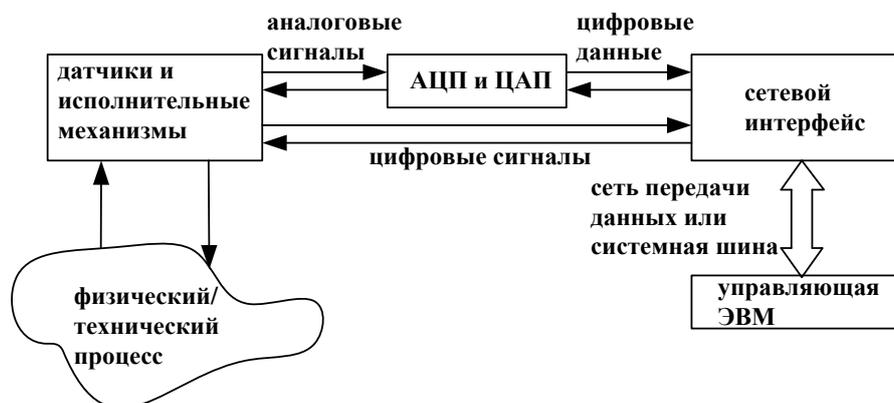


Рис. 2.6. Структура системы цифрового управления процессом

Физический процесс контролируется с помощью датчиков, т.е. устройств, преобразующих физические параметры процесса (температуру, давление или координаты) в электрические величины, которые можно непосредственно измерить (сопротивление, ток или разность потенциалов). Непосредственное управление процессом осуществляется с помощью исполнительных механизмов, которые преобразуют электрические сигналы в физические воздействия, главным образом движение – перемещение и вращение, которые можно использовать для других целей,

например для открытия клапана. Примеры: сервомоторы, гидроклапаны, пневматически позиционирующие устройства.

Поскольку цифровые системы управления работают только с информацией, представленной в цифровой форме, то поэтому полученные в результате измерений электрические аналоговые величины необходимо обработать с помощью АЦП. Обратная операция – управление исполнительными механизмами (электромоторами и клапанами) – проще, поскольку компьютер может непосредственно вырабатывать электрические сигналы.

2.3.3. Программные средства систем управления многокоординатными ЭП

Обзор архитектурных решений систем числового программного управления показал, что в настоящее время наиболее актуальными архитектурными решениями являются варианты систем, в основе которых лежит концепция PCNC. Тенденции последних лет [11, 12] отражают тот факт, что в борьбе за рынок разработчики все больше отдают предпочтение однокомпьютерному варианту (PCNC-4). Это, прежде всего, обусловлено следующими факторами: гибкостью в адаптации системы управления к конкретному объекту, возможностью конечному пользователю программно реализовывать свои алгоритмы управления, отсутствием значительных капиталовложений. Помимо этого, стоимость оборудования, необходимого для реализации однокомпьютерного варианта, значительно ниже стоимости архитектурных решений, реализованных на базе двух вычислительных устройств.

Отличительной особенностью данного архитектурного решения является программная реализация приложений пользователя, ядра ЧПУ, интерпретатора и интерполятора. Как правило, программно реализованные алгоритмы управления многокоординатными электроприводами функционируют под управлением операционных систем реального времени.

Под операционной системой понимается комплекс программ, обеспечивающих управление ресурсами программно-аппаратного комплекса (вычислительной системы) и процессами, использующими эти ресурсы при вычислениях.

Обзор операционных систем (ОС), применяемых в системах с архитектурой типа PCNC, приведен в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Производитель	Система PCNC	Интерполяция	Операционная система
СТАНКИН (г. Москва)	WinPCNC	Линейная, круговая	Windows NT+RTX4.1
Siemens (Германия)	802D	Линейная, круговая	RealTime DOS
	840D	Линейная, круговая, кубический сплайн, B-сплайн	Windows NT+NCK / RTUNIX
	840Di	Линейная, круговая, полиномиальная	Windows XP+NCK
НПП «Модель» (г. Нижний Новгород)	NC-2000	Линейная, круговая	Windows NT
	NC-3.5	Линейная, круговая	RTOS
Балт-Систем (г. Санкт-Петербург)	NC 110	Линейная, круговая	MS DOS
	NC 200	Линейная, круговая	MS DOS
	NC 210	Линейная, круговая	MS DOS
Fanuc (Япония)	Series 300is	Информация неизвестна	Windows CE 4.2
	Series 300i	Информация неизвестна	Windows XP
	Series 160i	Информация неизвестна	Windows 2000
МОДМАШ (г. Нижний Новгород)	FMS-3000	Линейная, круговая	MS DOS
	FMS-3100	Линейная, круговая	MS DOS
SandCNC (США)	MP-1000-THC	Линейная, круговая	Windows 2000
МШАК (Армения)	MSH-TURBO-M/U	Линейная, круговая, сплайнами	Windows NT+RTX
	MSH-PC104	Линейная, круговая, сплайнами	Windows NT+RTX

Анализ систем с открытой архитектурой типа PCNC показал, что наиболее часто в качестве операционной системы используется система Microsoft Windows NT с интегрированным ядром реального времени типа RTX (фирма VentureCom). Интегрированные ядра являются сторонними разработками. Многие фирмы, разрабатывающие системы типа PCNC, используют их без дополнительной доработки. Наряду с готовыми решениями также существуют и собственные разработки, например ядро NCT (Numerical Control Kernel) фирмы Siemens. Помимо операционной системы Windows NT используются специализированные системы, применяемые во встраиваемых системах – Windows CE, RTDOS (Fanuc, Siemens). Их основными достоинствами являются малые требования к памяти и дисковому пространству промышленных ПК, меньшее время реакции системы на внешние события. В отечественных разработках наибольшее применение находят системы PCNC на базе ОС Windows с RTX, а также ставшей уже классической MS DOS.

С точки зрения использования алгоритмов интерполяции в отечественных разработках наблюдается значительное отставание от зарубежных аналогов. Большинство отечественных разработок до сих пор комплектуется только линейной и круговой интерполяцией, в то время как разработки фирм Heidenhain, Siemens и др. опционально оснащены многокоординатной кубической сплайн-интерполяцией и средствами цифровой коррекции, позволяющими минимизировать динамическую ошибку следящей системы. В тех случаях, когда отечественные разработчики применяют сплайн-интерполяцию, используются уже готовые решения зарубежных производителей в виде модулей управления сервоприводами, устанавливаемых в PCI/ISA-слоты промышленного или персонального компьютера.

С учетом описанных выше особенностей операционных систем, а также архитектурных решений систем управления, построенных на базе PCNC, можно сформулировать основные требования к программному обеспечению:

- надежность и предсказуемость (отсутствие нештатных ситуаций, связанных с повисанием);
- функционирование в режиме реального времени «*Real Time*»;
- компактность;
- возможность гибкого изменения алгоритмов функционирования в соответствии с требованиями заказчика;
- поддержка различных интерфейсов связи с технологическим оборудованием.

Одним из наиболее существенных достоинств систем класса PCNC на сегодняшний день является открытость не только архитектуры, но и программного обеспечения. Практическое большинство программных пакетов, поставляемых вместе с такими системами, обычно позволяют производить перенастройку алгоритмов функционирования электроавтоматики и интерфейса оператора. Однако программное обеспечение и алгоритмы функционирования, отвечающие за управления движением, как правило, не раскрываются. Такое обстоятельство в первую очередь определено большой конкуренцией между разработчиками систем с числовым программным управлением, следящими за электромеханическими объектами.

Глава 3

АРХИТЕКТУРА СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ С ЧПУ

Разработчики современных систем числового программного управления выделяют 5 основных архитектурных вариантов, которые представлены на рынке. Первый вариант – это классические системы CNC (Computer Numerical Control). Такие системы выпускаются фирмами с богатой традицией производства высококачественной собственной микроэлектронной аппаратуры. Однако эти фирмы под влиянием пользователей технологического оборудования, желающих иметь гибкий интерфейс оператора, предлагают модификацию PCNC-1 с персональным компьютером в качестве терминала (второй вариант). Следующим шагом в развитии систем с ЧПУ стала реализация двухкомпьютерного варианта PCNC-2 (третий вариант). Несколько позднее появились системы PCNC-3, ядро которых реализовано на отдельной плате, устанавливаемой в корпусе промышленного персонального компьютера (четвертый вариант). С бурным развитием микропроцессорной техники и повышением производительности микропроцессоров все большее распространение получает однокompьютерный (пятый) вариант системы PCNC-4. Наиболее наглядно классификация архитектурных решений систем ЧПУ приведена в табл. 3.1.

3.1. Системы типа CNC и PCNC-1

К этим типам относится семейство NUM (концерн Schneider, Германия) рис. 3.1, построенное по принципу многопроцессорных CNC-систем: с ЧПУ-процессором, процессором программируемого контроллера автоматики и графическим процессором. Система NUM оснащается пассивным терминалом или промышленным компьютером с операционной системой Windows-98.

Семейство представлено компактными и модульными версиями, которые различаются числом координат и возможностью формировать независимые каналы ЧПУ из координатных групп, а также использованием традиционных аналоговых или автономных цифровых следящих приводов, подключенных к оптоволоконной сети.

В зависимости от требований устанавливается различное число входов-выходов электроавтоматики. Вычислительная мощность систем NUM достаточно высока, и этим объясняется широкий набор их функциональных возможностей. Так, предусмотрены сплайновый и полино-

миальный (до пятого порядка) алгоритмы интерполяции, пяти-, девяти-координатная интерполяция, пятикоординатная коррекция инструмента, одновременная работа по двум различным управляющим программам, 3D-графика. В системах с терминальным компьютером возможна адаптация интерфейса оператора к запросам конечных пользователей, диалоговое программирование.

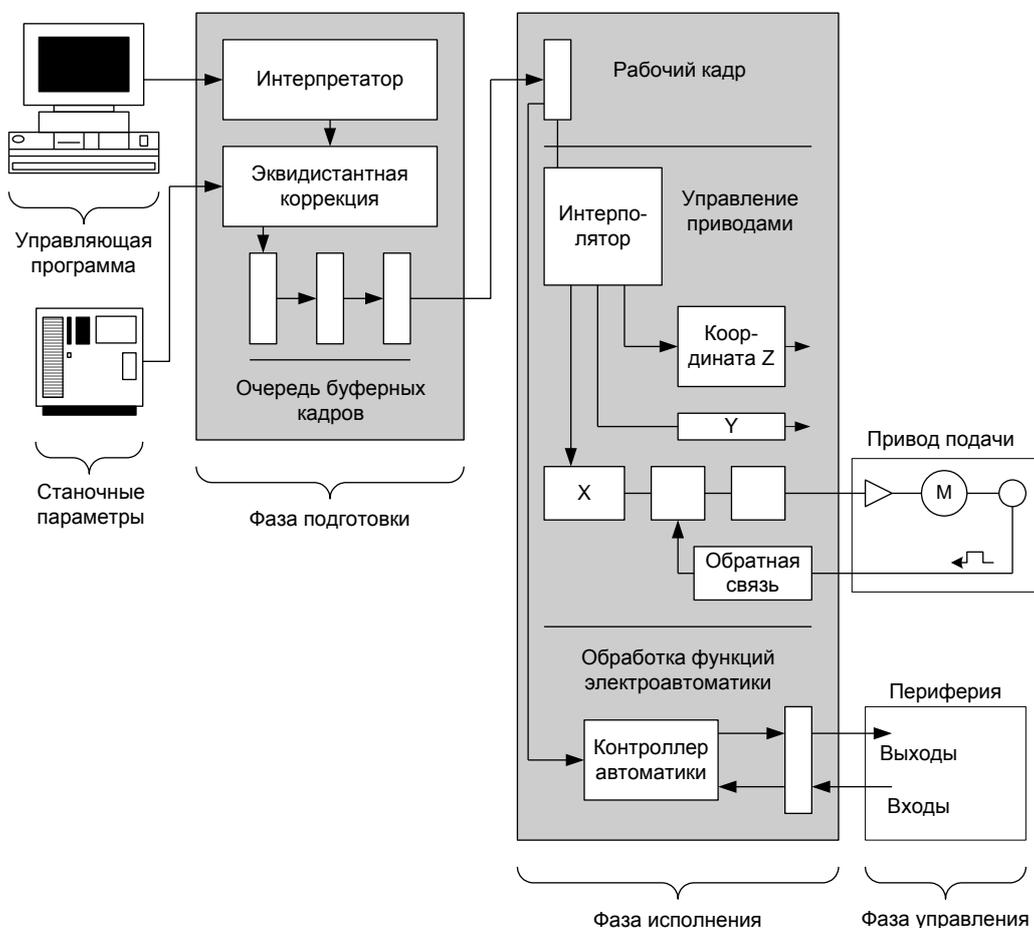


Рис. 3.1. Архитектура системы ЧПУ типа CNC фирмы NUM

Фирма Allen Bradley выпускает широкое семейство систем с ЧПУ: от традиционной CNC до системы CNC с персональным компьютером в качестве терминала и системы класса PCNC. Последняя модель (рис. 3.2) выполнена по классической схеме: специализированный промышленный компьютер с операционной системой Windows NT и возможностью разрабатывать пользовательские приложения на Visual Basic, PCI-одноплатный ЧПУ-компьютер, выполняющий все функции ядра, включая программно-реализованный контроллер электроавтоматики. С помощью общего для всей системы терминала осуществляется программирование и редактирование контроллера.

Таблица 3.1

Вычислительное устройство	Наименование архитектурных решений				
	CNC	PCNC-1	PCNC-2	PCNC-3	PCNC-4
Персональный компьютер	—	Интерфейс оператора	Интерфейс оператора	Интерфейс оператора	Интерфейс оператора. Ядро ЧПУ. Программно-реализованный контроллер электроавтоматики
Встроенный одноплатный компьютер	—	—	—	Ядро ЧПУ. Программно-реализованный контроллер электроавтоматики	—
Интерфейс	—	Коммуникационный интерфейс	Коммуникационный интерфейс	—	—
Второй компьютер	—	—	Ядро ЧПУ. Программно-реализованный контроллер электроавтоматики	—	—
Специальный процессорный модуль	Интерфейс оператора. Ядро ЧПУ. Внешний контроллер электроавтоматики	Ядро ЧПУ. Одноплатный контроллер электроавтоматики	—	—	—
Интерфейс	Управление приводами и электроавтоматикой	Управление приводами и электроавтоматикой	Периферийные шины следящих приводов и электроавтоматики	Периферийные шины следящих приводов и электроавтоматики	Периферийные шины следящих приводов и электроавтоматики
	Объекты управления	Объекты управления	Автономные объекты управления	Автономные объекты управления	Автономные объекты управления

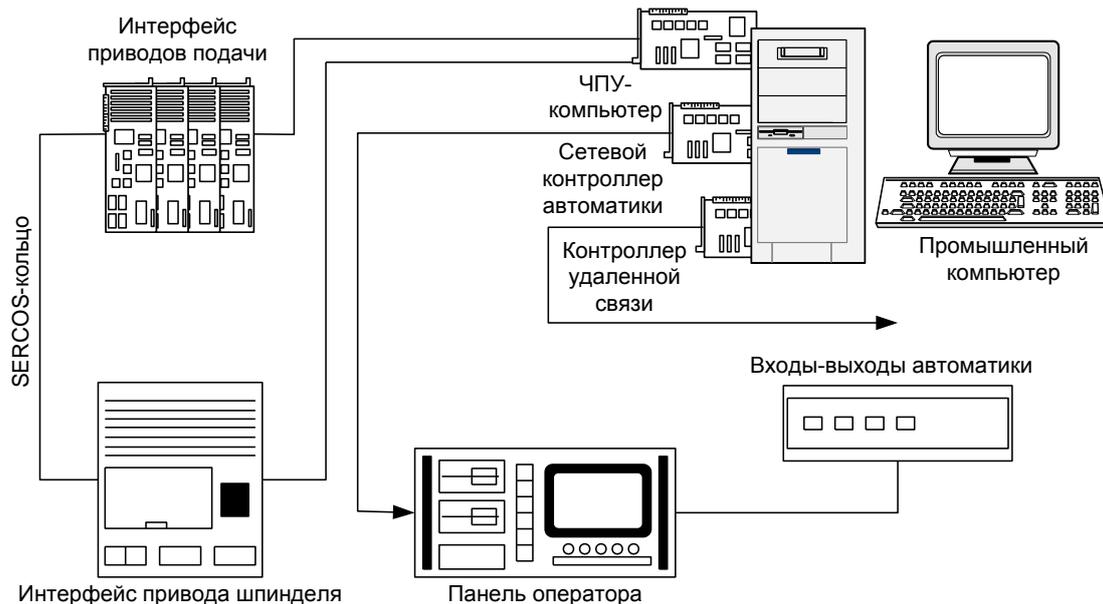


Рис. 3.2. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-1 фирмы Allen-Bradley

3.2. Системы типа PCNC-2

Представителями этого класса являются системы фирм ANDRON, BoschRexroth. Система ЧПУ фирмы ANDRON (Германия) представляет собой полный двухкомпьютерный вариант. Ее структура представляет набор модулей (рис. 3.3): терминального компьютера, ЧПУ-компьютера, панели оператора и монитора, удаленных входов-выходов программируемого контроллера, одной или нескольких групп цифровых (SERCOS) приводов подачи и главного привода. Аппаратная часть системы практически полностью состоит из компонент других фирм-производителей.

В состав терминального компьютера входят: материнская плата с процессором Intel Celeron и интегрированными контроллерами SCSI, VGA, TFT, IDE; многофункциональная интерфейсная плата MFA с памятью CMOS-ROM; контроллер коммуникационного канала, связывающего терминальный и ЧПУ-компьютеры. Все платы установлены на пассивной ISA-шине. При этом предусмотрена возможность установки дополнительных резервных плат: внутреннего модема, сетевой платы, SCSI-платы. Для специальных задач возможна установка PCI-плат.

В составе ЧПУ-компьютера имеются: материнская плата с процессором Intel Celeron; плата MIO (Main Input-Output) поддержки как коммуникационного интерфейса с терминальным компьютером (со скоростью 10 Мбит/с), так и интерфейса ручного перемещения; плата программируемого контроллера с интерфейсом InterBus-S (с циклом 4 мс для 1024 входов-выходов); одна или несколько плат SERCOS-

интерфейса (с микросхемой SERCON410-B). Все платы установлены на пассивной ISA-шине. Каждый SERCOS-интерфейс обслуживает (с периодичностью 0,5 мс) одну группу из трех автономных приводов подачи и одного привода шпинделя.

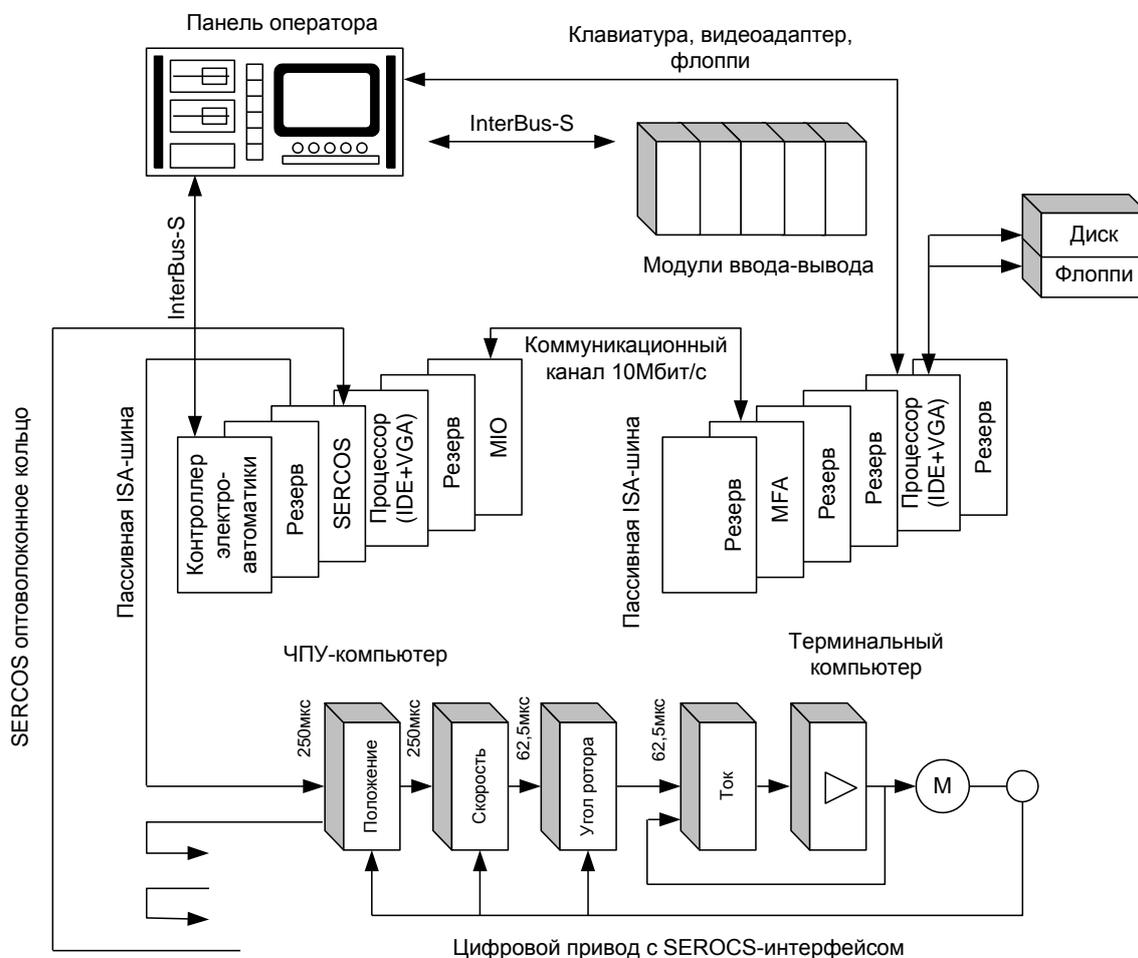


Рис. 3.3. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-2 фирмы ANDRON

В подобных платформах систем ЧПУ терминальный компьютер обычно работает под управлением операционной системы Windows NT, а ЧПУ-компьютер оснащается операционной системой жесткого реального времени. На прикладном уровне терминальный компьютер открыт для разнообразных приложений и специальных диалогов конечного пользователя.

Система ЧПУ фирмы BoschRexroth (Германия) построена на основе двух высокопроизводительных компьютеров и обладает исключительно мощным набором функций. Терминальный компьютер оснащен операционной системой Windows NT, а ЧПУ-компьютер—операционной сис-

темой UNIX. Связь операционных сред осуществляется с помощью протоколов TCP/IP, что позволяет осуществить удаленное администрирование и работу нескольких терминалов с одним ЧПУ-компьютером. В свою очередь, ЧПУ-компьютер обеспечивает многоканальную работу более чем с одной управляющей программой. Прикладное программное обеспечение терминального компьютера и ядра ЧПУ в ЧПУ-компьютере окружены оболочкой из нескольких сот интерфейсных API-функций (Application Interface), которые предоставляют пользователям возможность разрабатывать собственные приложения и расширения. В оболочку терминального компьютера включена мощная DLL-библиотека NCS (Numerical Control System) классов объектов, делающая разработку дополнительных приложений более простой и комфортной. Помимо этого, программно реализован контроллер электроавтоматики и цифровой осциллограф для анализа динамики следящего привода.

3.3. Системы типа PCNC-3

Типичным представителем PCNC-3 является система фирмы DeltaTau (Великобритания). Архитектура такой системы предполагает наличие двух компьютеров. В отличие от предыдущего типа систем ЧПУ-компьютер выполнен в виде отдельной платы PMAC (Programmable Multi-Axes Controller), устанавливаемой на ISA- или PCI-шине терминального персонального компьютера (рис. 3.4). Терминальный компьютер с операционной системой Windows NT выполняет классические функции терминальной задачи и функции интерпретатора управляющих программ.

Одноплатный ЧПУ-компьютер PMAC, построенный на процессоре Motorola 56300, решает геометрическую и логическую задачи, выполняя функции интерполятора, контроллера управления приводами, программно-реализованного контроллера электроавтоматики. Интерполятор обеспечивает все виды интерполяции (включая сплайн-интерполяцию), алгоритмы разгона и торможения, опережающий просмотр кадров Look Ahead, циклическое формирование управляющих воздействий с периодом 440 мкс (в этом же периоде в фоновом режиме работает и контроллер электроавтоматики). Контроллер приводов поддерживает управление 32 координатными осями, сгруппированными в 16 координатных систем. Помимо этого, он принимает и обрабатывает сигналы обратной связи от датчиков положения, замыкает позиционные контуры, выполняет функции ПИД-регулятора, имитирует в цифровом виде сигналы обратной связи по скорости, вырабатывает (в цифровом виде) широтно-импульсный сигнал для приводов подачи и сигнал зада-

ния (в пределах ± 10 В) для привода главного движения. Программно-реализованный контроллер электроавтоматики поддерживает параллельное управление 64 циклами электроавтоматики.

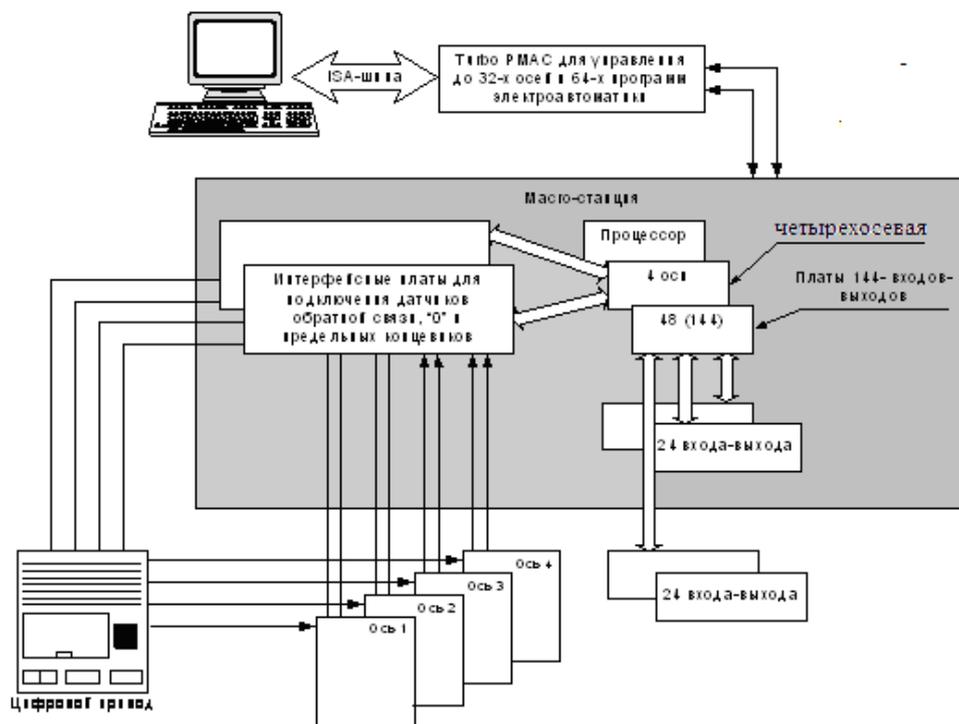


Рис. 3.4. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-3 фирмы DeltaTau

Сигналы управления приводами и электроавтоматикой поступают в кольцевой оптоволоконный канал (со скоростью передачи данных 125 Мбит/с) для дистанционного управления своими объектами. Принимающим устройством служит интеллектуальный периферийный терминал Macro-станция (Motion and Control Ring Optical). Допустимо включение в кольцо нескольких таких терминалов. Терминал замыкает скоростные контуры восьми приводов и принимает сигналы от конечных выключателей и датчиков нулевых точек координатных систем, формирует сигналы управления двигателями любого типа (асинхронными, постоянного тока и др.) с помощью блока Quad Amplifier (для управления четырьмя двигателями общей мощностью до 25 кВт). Периферийный терминал также поддерживает управление электроавтоматикой через модули оптоизолированных входов-выходов.

Концепция такого типа систем ориентирована на построение собственных систем ЧПУ. Конечному пользователю остается только разработка терминальной задачи и интерпретатора в среде промышленного

персонального компьютера. Однако при этом следует отметить, что архитектура самих модулей закрыта и недоступна для внесения каких-либо изменений.

3.4. Системы типа PCNC-4

Концепция системы ЧПУ фирмы Beckhoff (Германия) является ярким примером однокомпьютерной архитектуры PCNC. Ее отличительная особенность заключается в том, что все задачи управления (геометрическая, логическая, терминальная) решены программным путем, без какой-либо дополнительной аппаратной поддержки (рис. 3.5). Внешний интерфейс такой системы строится на базе любой стандартной периферийной шины, в частности на базе шины LightBus фирмы Beckhoff. Эта шина представляет собой кольцевой канал для передачи сигналов управления автономными следящими приводами, а также и для передачи сигналов электроавтоматики. Доступ к объектам осуществляется с помощью периферийных «терминалов» ввода-вывода.

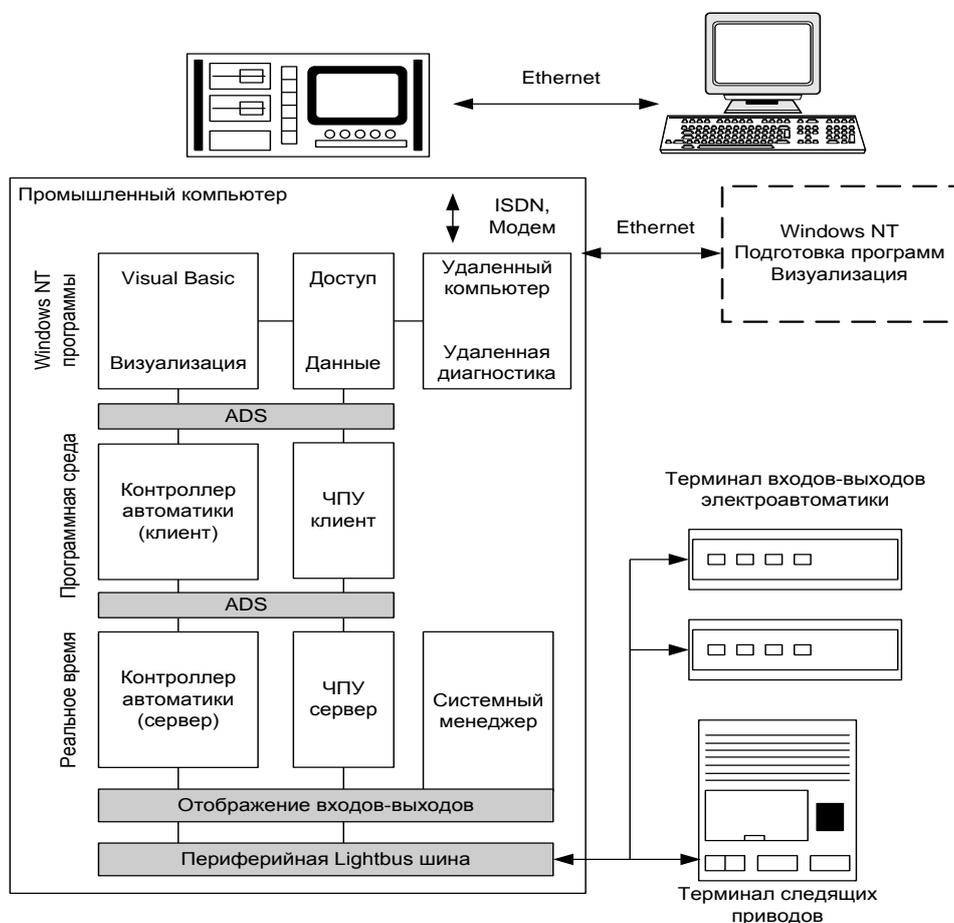


Рис. 3.5. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-4 фирмы Beckhoff

Операционная среда представляет собой комбинацию Windows NT для поддержания процессов машинного времени и системы TwinCat (Total Windows Control and Automation Technology). Операционная система Twin-Cat фирмы Beckhoff, интегрированная в Windows NT, добавляет ей функции реального времени, не изменяя самой Windows NT. Обмен данными и доступ к прикладным функциям API программных модулей осуществляется через программную шину ADS (Automation Device Specification). Система TwinCat служит центром системной конфигурации, поддерживающим синхронное или асинхронное взаимодействие всех процессов, а также и ввод-вывод сигналов управления. На прикладном уровне в потоках управления работают программные модули ЧПУ и программируемые контроллеры, имеющие клиентскую часть (для подготовки данных) и серверную часть (для работы в реальном времени). ЧПУ-клиент интерпретирует кадры управляющей программы в стандарте DIN 66025, а ЧПУ-сервер выполняет интерполяцию в «группах приводов» (по три координаты в группе). Группы, в свою очередь, формируются с помощью системы TwinCat. Одновременно работают до четырех контроллеров (являющихся виртуальными процессорами, работающими в стандарте IEC 1131-3), каждый из которых решает четыре задачи, имеющие свой приоритет и время цикла.

Рассмотрим еще один пример построения системы ЧПУ типа PCNC-4. Система Power Automation (Германия) построена на основе промышленного персонального компьютера с PCI-шиной (рис. 3.6), с операционной системой Windows NT и ядром реального времени. Операционная система Windows NT обеспечивает работу интерфейса оператора, системы программирования ЧПУ и контроллера электроавтоматики, встроенную САМ-систему, приложения пользователя. Ядро реального времени синхронизирует работу задач ЧПУ и электроавтоматики, выполняет диспетчерские функции в отношении интерпретатора, интерполятора и модуля управления следящими приводами. Одновременно могут работать до восьми каналов ЧПУ и два программно реализованных контроллера электроавтоматики с разными приоритетами.

Система Power Automation имеет открытую архитектуру, которая допускает расширение функций ядра ЧПУ. Система имеет мощное сетевое окружение как внешнее (Ethernet-TCP/IP, Novell), так и периферийное (восемь оптоволоконных SERCOS-колец для 64 следящих приводов, InterBus-S, Profibus DP, CAN-Bus, ASI-Bus).

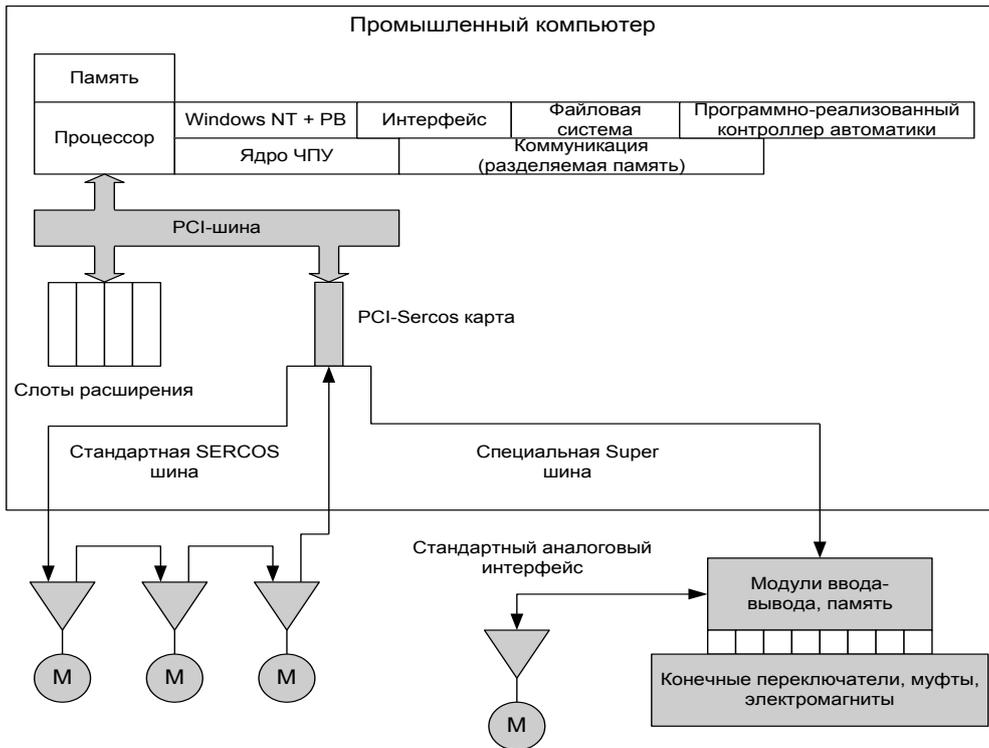


Рис. 3.6. Архитектура системы ЧПУ класса PCNC-4
фирмы Power Automation

Раздел 2

АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА КАТП

Глава 4

КОМПЬЮТЕРЫ И КОНТРОЛЛЕРЫ

4.1. Одноплатные компьютеры для встраиваемых систем

Встраиваемая система, встроенная система (embedded system) – это специализированная компьютерная система, в которой сам компьютер обычно встроен в устройство, которым он управляет.

Основой построения встроенных систем могут служить одноплатные или однокристальные микроконтроллеры, ПЛИС. Особенностью некоторых видов встроенных систем является использование не только современные производительных процессоров, но довольно устаревших семейства x86 (например: i386, i486, Pentium) и их клонов из-за малого энергопотребления и низкой стоимости (порядка 1–5 долларов США). Также многие виды встроенных систем используют микроконтроллеры архитектуры ARM, AMD Geode™, Intel XScale™.

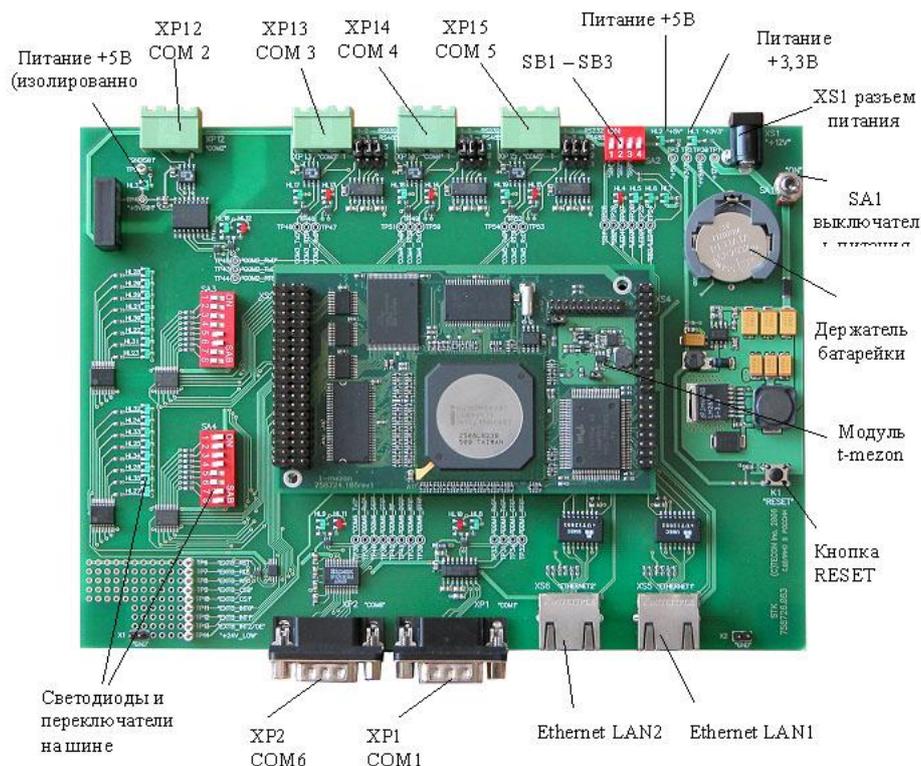


Рис. 4.1. Отладочная плата ПО для процессора Intel XScale™

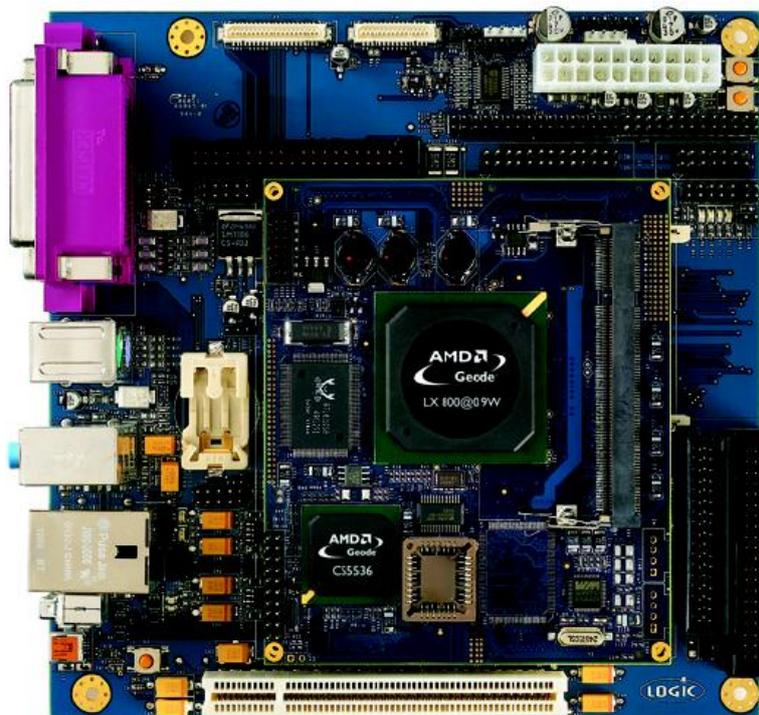


Рис. 4.2. Отладочная плата ПО для процессора AMD Geode™

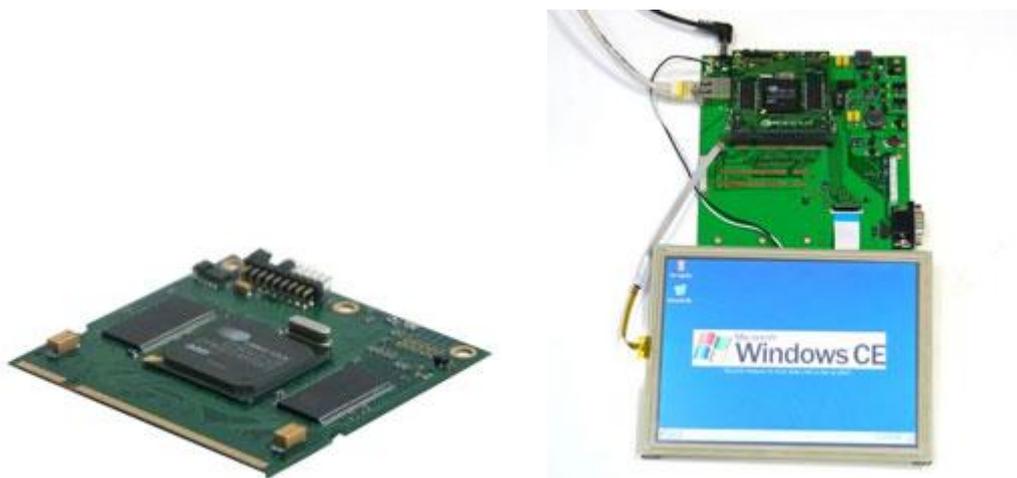


Рис. 4.3. Комплект отладки ПО для ARM9

- Характерные особенности таких систем:
- низкое энергопотребление, порядка 0,5 ... 20 Вт;
 - маленькие размеры;
 - отсутствие больших систем отвода тепла (охлаждения). В некоторых системах центральный процессор вообще не охлаждается;
 - иногда производители совмещают в одном кристалле (SOC) ЦП и системную логику.

Примерами встроенных систем могут служить банкоматы, бортовые системы самолетов, КПК, телекоммуникационное оборудование и т.д.

Характеристики систем на базе ядра ARM9: частота ЦП – 200 МГц, частота внутренней шины – 100 МГц. Встроенный сопроцессор MaverickCrunch™ – для работы с числами с плавающей точкой. Большой набор периферии поддерживается программно в средах Windows CE, Linux.

Основные характеристики платформы ARM9:

- 200 МГц ARM920T процессор;
- 16 кБайт кеш-инструкций;
- 16 кБайт кеш-данных;
- частота системной шины – 100 МГц;
- сопроцессор MaverickCrunch™.

Память:

- ОЗУ – 64 Мбайт;
- ПЗУ – 8 Мбайт;
- последовательное ПЗУ – 2 МБит.

Интерфейсы:

- системная 24-битная шина адреса, 32-битная шина данных;
- USB 2.0 Full speed – два порта;
- UART – три порта;
- MAC Ethernet 1/10/100 МБит;
- 2-канальный последовательный аудиоинтерфейс AC97;
- SPI-порт (поддержка работы с SD картами памяти);
- 18 портов ввода-вывода общего применения;
- EIDE-интерфейс (до двух устройств);
- 18-битный интерфейс к TFT панели с поддержкой разрешений до 1280×1024;
- Touch screen интерфейс;
- отладочный интерфейс JTAG (на плате отладчика).

Приведенные выше системы демонстрируют появление следующих тенденций: переход к однокристальным ЭВМ (вычислитель и периферия на борту одного кристалла), а также переход к твердотельным хранителям информации (отказ от накопителей, содержащих движущиеся части). Такой подход позволяет многократно повысить надежность систем управления. В связи с этим появился большой сегмент рынка одноплатных компьютеров (Single Board Computer), имеющих на одной плате процессор, оперативную и постоянную память, устройства ввода/вывода.

Ввиду того, что разные задачи требуют разной вычислительной мощности и различного набора интерфейсов, фирмы – производители стараются выпускать большое количество модификаций одноплатных компьютеров, а также снабжать их стандартными шинами расширения для наращивания функциональных возможностей. Крупным заказчикам фирмы производители предлагают услуги по созданию пользовательских конфигураций для выполнения специальных задач или с целью удешевления конечной продукции.

Возникновение сегмента SBC позволило радикально ускорить появление новых изделий для вертикальных рынков, поскольку предоставляло системным интеграторам готовые и достаточно дешёвые платформы для создания готовой продукции различных видов, ориентированной на конкретные приложения. Важным моментом является то, что поставляемые на рынок SBC являются «коробочными» изделиями, используемыми во многих сферах. Это обстоятельство, а также стандартизация основных системных решений дает покупателю известные гарантии надёжности и работоспособности, снимает необходимость проведения работ по тестированию большей части функций. Системным интеграторам остается только написать специальное программное обеспечение и при необходимости дополнить SBC набором требуемых интерфейсов.

Особую нишу на рынке встраиваемых систем занимают SBC для жёстких условий эксплуатации, под которыми обычно понимают «индустриальный» диапазон температур ($-40\dots+85\text{ }^{\circ}\text{C}$) и сильные механические воздействия (удары и вибрации). Как правило, эти факторы мало учитываются или совсем не принимаются во внимание при разработке обычных (офисных) ПК, что объясняется превалированием ценового критерия, а также совершенно иными условиями эксплуатации и стоящими перед процессорным модулем задачами.

4.2. Основные требования к одноплатным компьютерам

К одноплатным компьютерам предъявляются следующие требования:

1. **Размер** играет важную роль практически во всех случаях, но критичен в основном для мобильных применений, особенно в авионике. Определяется формфактором и количеством плат расширения.

2. **Энергопотребление** тесно связано с допустимым верхним пределом диапазона рабочих температур. Для жёстких условий эксплуатации важным фактором является возможность автоматического понижения тактовой частоты процессора при возникновении опасности пере-

грева. Для мобильных применений энергопотребление должно адекватно соотноситься с ёмкостью используемых аккумуляторов.

3. Устойчивость к механическим воздействиям – важнейшее требование при эксплуатации изделия в промышленности и на транспорте. Преимущество по этой позиции получают системы, имеющие максимальное количество компонентов, напаянных на плату, и минимальное количество соединительных разъёмов, чувствительных к ударам или вибрации. Даже при наличии небольших вибраций желательно применять только твердотельную память вместо стандартных механических жёстких дисков.

4. Возможность эксплуатации в широком температурном диапазоне. Допустимый нижний предел наиболее актуален для устройств, работающих на улице или в помещениях с неустойчивым энергоснабжением. Впрочем, всегда можно рассмотреть вариант с резервным источником питания и нагревателем, управляемым от простейшего термостата.

5. Устойчивость к электромагнитным помехам очень актуальна при эксплуатации устройств вблизи генераторов, моторов и иных источников сильных электромагнитных полей и электростатических разрядов. Также важно подбирать адекватный источник питания, не дающий сильных переходных выбросов при включении и отключении; в противном случае он может стать причиной нестабильного запуска системы.

6. Надёжность, ремонтпригодность и среднее время безотказной работы. Оценка параметров надёжности с целью определения возможности применения изделия в ответственных приложениях требует проведения расчетов MTBF (Mean Time Between Failures).

7. Гибкость – возможность наращивания и варьирования функций конечной системы путем комплексирования SBC с платами расширения чрезвычайно важна в системах с широким спектром задач. Специфика встраиваемых приложений проявляется в том, что, кроме привычных пассивных объединительных плат, здесь также применяются мезонинные решения, позволяющие значительно экономить место и, в то же время сохранять ударо- и вибростойкость конструкции.

8. Возможность upgrade – улучшения в будущем основных характеристик вычислительного ядра (производительность, ёмкость ОЗУ или накопителя и т.д.). Актуально для приложений, где нагрузка на SBC может со временем повышаться, например за счет подключения дополнительных каналов поступления информации или применения иного, более требовательного к ресурсам, программного обеспечения.

9. **IBM PC-совместимость.** Требование обусловлено следующими факторами:

а) широкой доступностью и низкой ценой всех аппаратных компонентов;

б) большим количеством стандартных интерфейсов и совместимой с ними периферии;

в) наличием большого перечня программного обеспечения, совместимого с аппаратной частью операционных систем (от DOS до Windows XP, от Linux до VxWorks);

г) возможность безболезненного переноса наработанного ранее пользователем программного обеспечения;

д) мощная инструментальная поддержка средств разработки под IBM PC, наличие большого количества бесплатных библиотек и утилит.

1.3. Стандарты встраиваемых компьютеров

На сегодняшний день промышленностью выпускаются встраиваемые системы следующих стандартов:

- PC/104;
- PC/104-PLUS;
- PCI/104;
- EBX;
- EPIC;
- ETX;
- XTX;
- COM Express;
- Mini-ITX;
- MicroPC;
- 3,5";
- 5,25".



Рис. 4.4. Одноплатные компьютеры различных формфакторов

PC/104

Спецификации стандарта PC/104 содержат механические и электрические рекомендации на реализацию шины IEEE P996 для уникальных требований встроенных систем. Минимальные размеры модулей (90×96 мм), мезонинный проходной конструктив, требования к минимизации энергопотребления каждого модуля (не более 2 Вт) позволяют разработчикам воплощать в жизнь проекты вычислительных систем с миниатюрными размерами и минимальным энергопотреблением.

Стандарт определяет реализацию двух версий модулей PC/104 – 8-бит (64-контактный разъем) и 16-бит (сдвоенный 64- и 40-контактные разъемы) шины ISA.



Рис. 4.5. Одноплатный компьютер стандарта Athena II фирмы DIAMOND SYSTEMS

Основные характеристики модуля Athena II:

- процессор: VIA Mark CoreFusion CPU 500/800 МГц (установлен);
- чипсет: VT8606(Mark internal) + 82C686B;
- память 256 Мбайт (напаяно);
- видеоинтерфейс: поддержка ЭЛТ/TFT LVDS 18 бит; разрешение до 1600×1200 точек;
- контроллер Fast Ethernet 10/100Base-T;
- порты и контроллеры: IDE UDMA33, 2×RS-232, 2×RS-232/485, 4×USB 1.1;
- соединители PS/2 клавиатуры и мыши;
- подсистема ввода-вывода (опция):
 - аналоговый ввод: 16 каналов, 16 бит 100 кГц;
 - аналоговый вывод: 4 канала, 12 бит;
 - дискретный ввод-вывод: 24 канала;
 - счетчики/таймеры: 2 канала;
- совместима с корпусом Pandora;
- размеры 106×114 мм;
- требования по питанию: +5 В;
- потребление:
 - 500 МГц с УСО: 10 Вт;
 - 800 МГц с УСО: 12 Вт;
- диапазон рабочих температур: –40...+85 °С.

PC/104-PLUS

PC/104-PLUS – дополнение к стандарту PC/104, реализующее высокую скорость PCI – шины во внедренных прикладных программах. Главная цель дополнения PCI-шины к PC/104 состояла в сохранении атрибутов, сделавших PC/104 успешным стандартом во внедренных прикладных программах.

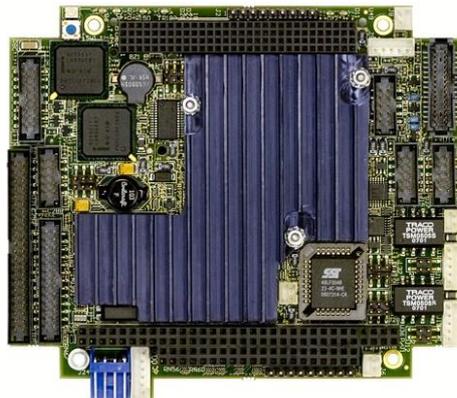


Рис. 4.6. Одноплатный компьютер стандарта PC/104-Plus на базе AMD Geode LX800 Fastwel CPC304

Основные характеристики модуля Fastwel CPC304:

- процессор AMD Geode LX800 500 МГц из долгосрочной производственной программы;
- поддержка модулей расширения PC/104 и PC/104-Plus: 16-разрядная шина ISA и 32-разрядная шина PCI;
- запаянная память 256 Мб DDR SDRAM;
- видеоконтроллер с поддержкой разрешения до 1920×1440 и интерфейсами VGA, LVDS и ЖК-дисплеев;
- запаянный NAND FlashDisk 128 Мб;
- разъем Compact Flash Type I/II;
- два порта 10/100-Base-T Fast Ethernet;
- два USB 2.0, четыре COM порта;
- промышленный рабочий температурный диапазон: $-40...+85$ °C;
- влагозащитное покрытие (опционально).

Встраиваемый одноплатный компьютер стандарта PC/104-Plus Fastwel CPC304 предназначен для использования в ответственных бортовых системах. Архитектура CPC304 базируется на центральном процессоре AMD Geode LX800, поддерживает карты расширения, подключаемые через полнофункциональную 16-разрядную шину ISA и 32-разрядную шину PCI. Все основные компоненты, включая центральный процессор, чипсет, память, контроллеры периферии, запаяны на плате.

PCI/104

PCI-104 является дальнейшим развитием стандарта PC/104-Plus, нацеленным на внедрение высокопроизводительных процессоров на рынок компактных промышленных вычислителей. Путем удаления с печатных

плат разъемов шины ISA достигается возможность размещения современных «крупногабаритных» микросхем ЦП и системной логики.



Рис. 4.7. Одноплатный компьютер стандарта PCI/104 PCM-3380 фирмы ADVANTECH

Обратная совместимость с накопленным за многие годы парком специализированных модулей PC/104 достигается применением платы-переходника PCI-104-PC/104-Plus, основанной на микросхеме-мосте PCI-ISA с полной поддержкой адресного пространства шины ISA.

Основные характеристики модуля PCM-3380 фирмы ADVANTECH:

- формат PCI-104;
- процессор Pentium M / Celeron M до 1,1 ГГц;
- комплектация процессором на плате;
- кэш 2-го уровня на процессоре;
- чипсет Intel 855GME;
- ОЗУ до 1 Гбайт DDR (1×SODIMM);
- сторожевой таймер 255 уровней;
- поддержка твердотельной памяти: разъем CompactFlash;
- видеосистема: VGA; LCD LVDS 36 бит;
- Ethernet: 10/100 Мбит/с Intel 82562EM;
- аудиоконтроллер AC'97;
- USB 2.0, 6 шт.;
- порты ввода-вывода: 1×EIDE, 1×LPT, 2×RS-232;
- расширения PCI-104.

ЕВХ и ЕРІС

ЕВХ – формат создан на основе существующих стандартов: ISA (IEEE P996), PC/104, PC/104-Plus, PCI, PCMCIA. ЕВХ аккумулирует все эти решения в одном высокоинтегрированном одноплатном компьютере. Компактные размеры форм-фактора ЕВХ позволяют разработчикам вписываться в ограниченное пространство современных промышленных конструктивов.

ЕРІС – открытый стандарт, определяющий новую платформу для встраиваемых среднеразмерных одноплатных компьютеров с развитой системой ввода/вывода. В качестве шины расширения применяются промышленные PC/104 или PC/104-Plus.

ЕРІС получил свое развитие в виде нового стандарта ЕРІС-Express с внедрением новой шины PCI-Express. Особенности архитектуры нового стандарта являются:

- замена устаревшей шины PCI на PCI-Express;
- сохранение разъема PC/104 в качестве опции для поддержки имеющихся систем ввода-вывода;
- оригинальные габаритные размеры: 115×165 мм;
- также в ЕРІС-Express сохранилась возможность работы с более ранним интерфейсом ISA, что делает новый стандарт универсальным в применении;
- поддерживается 6 устройств PCI-Express;
- нет необходимости в разработке объединительной платы;
- сохранены размеры и расположение монтажных отверстий ЕРІС;
- сохранены зоны разъемов ЕРІС.



Рис. 4.8. Одноплатный высокопроизводительный компьютер Poseidon формата ЕРІС с интегрированным модулем УСО фирмы DIAMOND SYSTEMS

Основные характеристики модуля Poseidon:

- процессор VIA Eden ULV 1 ГГц или VIA C7 2 ГГц (установлен);
- ОЗУ 256/512/1024 Мбайт (напаяно);
- флэш-диск: поддержка IDE-модулей до 512 Мбайт;
- видеоинтерфейс: поддержка ЭЛТ/TFT; разрешение до 2048×1536 точек; поддержка двух независимых дисплеев; аппаратное ускорение MPEG-2;
- аудиоинтерфейс: AC'97 совместимый, усилитель 2 Вт;
- Ethernet: 10/100/1000 Base-T;
- порты: 1×ATA/100, 1×SATA, 2×RS-232, 2×RS-232/422/485, 4×USB 2.0, PS/2 (клавиатура и мышь);
- сторожевой таймер;
- питание +5 В;
- диапазон рабочих температур:
 - 20...+85 °C (Eden ULV);
 - 20...+65 °C (Eden C7);
- Модуль УСО:
 - аналоговый ввод – до 32 каналов, 16 бит, 250 кГц, автокалибровка;
 - аналоговый вывод – 4 канала, 12 бит;
 - дискретный ввод-вывод, 24 канала;
- счётчики/таймеры: 1×32 бит; 1×16 бит.

ETX

Открытый стандарт, спецификации которого описывают встраиваемые промышленные компьютеры класса «Computer-on-Module» (COM). Модули ETX оснащены шинами ISA/PCI и полным набором периферийных устройств.



Рис. 4.9. Одноплатный компьютерный модуль CPB904 фирмы Fastwel стандарта ETX с низким энергопотреблением и компактными габаритными размерами 114×95 мм

Основные характеристики модуля CPB904:

- процессор AMD Geode™ LX800 с частотой 500 МГц;
- поддержка LCD и CRT дисплеев с 2D ускорителем передачи видеосигналов;
- запаянная DDR SDRAM память 256/512 Мбайт, до 512 Мбайт SODIMM;
- жесткий диск 64 Мб с ISA интерфейсом (поддержка в BIOS);
- слот флеш-памяти: MiniSD;
- порт IrDA;
- контроллеры НМЖД: ATA-5/ATAPI UltraDMA100, 1 канал, 2 устройства;
- интерфейсы: 4×USB 2.0, 3×COM RS-232;
- сетевой интерфейс: 10/100Base-T;
- сторожевой таймер;
- температурный диапазон работы: $-40...+85$ °C;
- влагозащитное покрытие (опционально).

XTX

XTX—это новый промышленный стандарт, поддерживаемый всемирным консорциумом производителей встраиваемых модулей. XTX использует те же четыре коннектора на базовой плате, что и ETX; кроме того, расположение отверстий в модуле и его размеры остаются такими же, что обеспечивает плавную миграцию с точки зрения механики. Стандарт задает один размер платы, благодаря чему производители

оборудования не испытывают необходимости в изменении дизайна своих продуктов.

Для разработчиков, не использующих ISA-шину, модули XTX могут быть подключены непосредственно в существующие базовые платы ETX, что позволяет получить наиболее простой доступ к новейшим технологиям чипсетов, графики и процессоров и избежать финансовых затрат на создание специальных базовых плат. В отличие от других архитектур COM в XTX сохраняется поддержка традиционных периферийных устройств, таких, как последовательные порты, параллельный порт, дисковод флоппи-дисков, параллельный ATA (IDE), клавиатура и мышь PS/2.

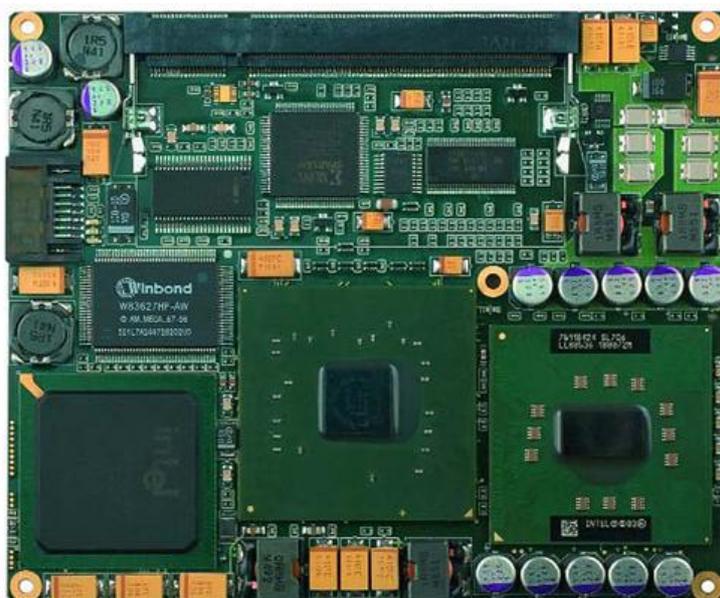


Рис. 4.10. Одноплатный компьютерный модуль Fastwel CPC2000 стандарта ETX/XTX на базе процессоров семейства Intel Core Solo/Intel Core Duo/Intel Core 2 Duo

Основные характеристики модуля Fastwel CPC2000:

- процессор Intel Core Duo с частотой до 2 ГГц и системной шиной 667 МГц/Celeron M 423 (Yonah Single Core) ULV;
- ОЗУ: до 1 Гбайт DDR2;
- интерфейсы расширения: 4x1 PCI Express; 32 бит PCI; 16 бит ISA;
- напаянная флеш-память: до 4 Гбайт IDE;
- поддержка дисплеев: CRT и LVDS;
- интегрированный аудиоконтроллер;
- интерфейсы: 6×USB 2.0, 2×COM;
- контроллеры НЖМД: 2×Serial ATA II, 2×IDE Ultra ATA/133;
- сетевой интерфейс: 10/100Base-T;

- опция для работы при температуре от -40 до $+85$ °С.

COM Express

COM Express – это новое поколение стандарта «компьютера на модуле», пришедшего на смену ETX. Особенностью нового стандарт является появление шины PCI-Express, а также факт отсутствия «старых» интерфейсов, таких как последовательные порты, FDD, параллельный порт, клавиатура PS/2, мышь PS/2, а также несовместимость с ETX, идентичность COM - Express и ETX - Express.

Основные характеристики модуля COM-Express фирмы LiPPERT:

- процессор: Intel[®] Celeron[®] M 423 Processor; Intel[®] Core[™] Duo Processor L2400; Intel[®] Core[™] Duo Processor T2500;
- чипсет: Intel[®] i82945GM;
- память: до 4 Гбайт DDR2-SODIMM;
- видеоинтерфейс: видеоОЗУ до 224 Мб; поддержка ЭЛТ и LVDS; разрешение – 2048×1536 точек;
- сетевой интерфейс: 10/100/1000 Base-T, контроллер Intel i82573E;
- звуковой контроллер: AC'97;
- последовательные порты: 2×RS232/RS422/RS485;
- интерфейсы: 1×PCIe x16 (для графики/SVDO); 4×PCIe x1; 8×USB 2.0, 2×SATA2, 1×ATA100;
- сторожевой таймер, светодиодные индикаторы состояния;
- питающее напряжение: +12 В;
- потребляемая мощность:
 - 1,06 ГГц: ~18 Вт;
 - 1,67 ГГц: ~28 Вт;
 - 2,07 ГГц: ~40 Вт;
- диапазон рабочих температур: $-20...+60$ °С или $-40...85$ °С (для процессора Celeron M).



Рис. 4.11. Модуль COM-Express Toucan
фирмы LiPPERT на базе процессора Intel Core Duo

Mini-ITX

Mini-ITX – это форм-фактор малоразмерных материнских плат, разработанных компанией VIA. Размеры составляют 170×170 мм. Платы предназначены для применения как в коммерческих изделиях, так и во встраиваемых системах.

Основные характеристики модуля MI910 фирмы iBASE:

- процессор: Intel Core 2 Duo / Celeron M с частотой до 2,4 ГГц (Socket 478, системная шина 533/800 МГц);
- чипсет: Intel GM965 + ICH8M, системная шина 533/800 МГц;
- ОЗУ: DIMM×2 до 4 Гбайт DDR-II PC2-6400;
- видеоконтроллер: Intel GMA3000, интегрирован в чипсет, VGA, 2×LVDS, дополнительно до двух DVI-выходов через опциональный Mini-PCI адаптер;
- интерфейсы: PCI, PCI Express x1, Mini-PCI;
- контроллеры НЖМД: 4 канала SATA 300 (4 устройства), 1 канал UltraATA/100 (2 устройства);
- сетевой интерфейс: один 10/100Base-T, опционально 10/100/1000Base-T;
- интегрированный аудиоконтроллер высокого разрешения;
- интерфейсы: 6×USB 2.0, 1×RS-232, 1×RS-232/422/485, 2×PS/2;
- сторожевой таймер.

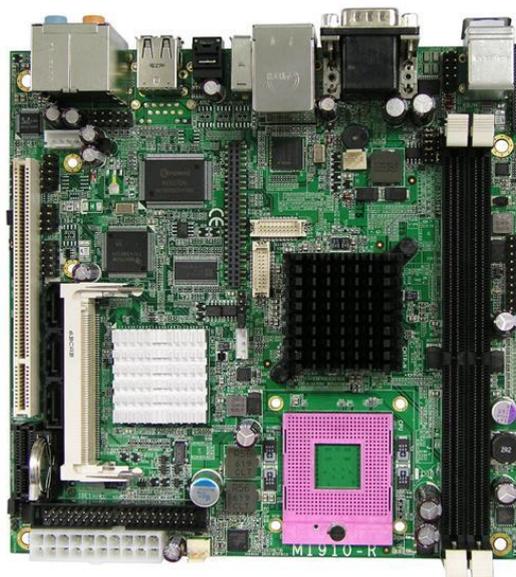


Рис. 4.12. Высокопроизводительная промышленная материнская плата MI910 фирмы iBASE формата Mini-ITX для ЦП Core 2 Duo на базе чипсета Intel GM965



Рис. 4.13. Компактный промышленный корпус для плат формата Mini-ITX с одним слотом расширения фирмы iBASE

Основные характеристики промышленного корпуса для плат формата Mini-ITX фирмы iBASE:

- настольное/настенное положение;
- совместим с Mini-ITX платами iBASE (кроме моделей с LGA775);
- отсек для 2,5" HDD с быстрым доступом;
- слот расширения для полноразмерной PCI платы;
- интегрированный бескорпусный БП ATX мощностью до 85 Вт;
- все интерфейсы на передней панели, до 6 USB портов, дополнительные штатные места под разъемы COM2/3/4, DVI, LVDS;
- выход питания DC 12 В для внешних устройств;
- режим запуска системы при подаче внешнего питания;
- габаритные размеры: 300×72×200 мм.

MicroPC

Форм-фактор, предложенный в 1990 г. фирмой Octagon Systems. Отличительная особенность плат заключается в их размере – 114×124 мм. Выходной разъем идентичен 8-разрядной шине ISA.



Рис. 4.14. Высокопроизводительная процессорная плата в формате MicroPC с поддержкой Ethernet и CompactFlash фирмы Fastwel CPU686E

3,5"

Форм-фактор таких плат соответствует размеру стандартного 3,5-дюймового дискового накопителя: 148×95 мм. Как правило, платы этого стандарта могут наращиваться модулями PC/104.

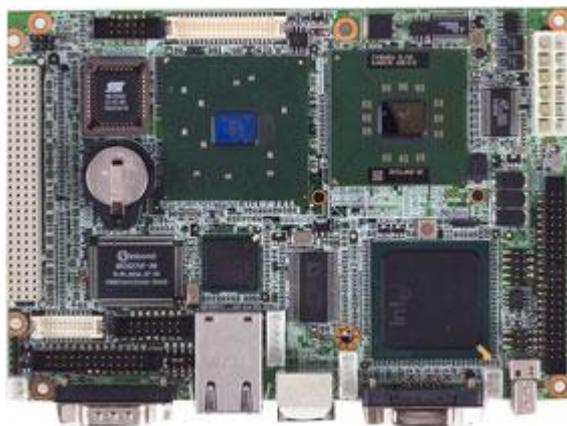


Рис. 4.15. Одноплатный компьютер фирмы ADVANTECH PCM-9381

Основные характеристики модуля ADVANTECH PCM-9381:

- формат 3,5";
- процессор Pentium M/Celeron M до 1,8 ГГц;
- комплектация процессором Socket 478 или на плате;
- кэш 2-го уровня на процессоре;

- чипсет: Intel 855GME;
- ОЗУ: до 1 Гбайт DDR (1×SODIMM);
- сторожевой таймер: 255 уровней;
- поддержка твердотельной памяти: разъём CompactFlash;
- видеосистема: VGA; LCD LVDS 48 бит;
- Ethernet: 10/100/1000 Мбит/с;
- аудиоконтроллер AC'97;
- USB 2.0: 3 шт.;
- порты ввода-вывода: 1×EIDE, 1×LPT, 1×RS-232/422/485, 1×RS-232, 1×IrDA;
- расширения: PC/104+.

5,25"

Форм-фактор таких плат соответствует размеру стандартного 5-дюймового дискового накопителя 203×145 мм. Платы этого стандарта могут наращиваться модулями PC/104 или PC/104+.

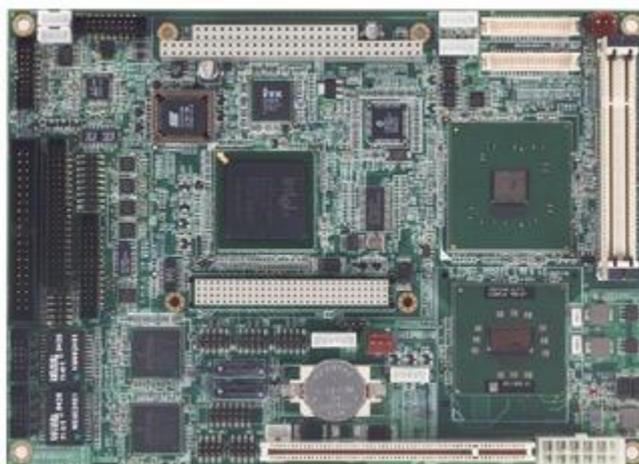


Рис. 4.16. Одноплатный компьютер PCM-9584 фирмы ADVANTECH серии Biscuit PC формата 5,25" на базе процессора Intel Pentium M

Характеристики модуля PCM-9584 фирмы ADVANTECH:

- процессор: Intel Pentium M до 2,0 ГГц;
- чипсет: Intel 915GM ICH6;
- ОЗУ: SDRAM до 2 Гбайт DDR-II (2×SODIMM);
- сторожевой таймер;
- поддержка твердотельной памяти: разъем CompactFlash, uDOC;

- видеосистема: разрешение до 2048×1536 точек; VGA/LVDS/TV-Out (опция);
- 2 независимых видеоинтерфейса;
- Ethernet: 2×10/100/1000 Мбит/с;
- аудио: AC'97;
- порты ввода-вывода: 1×EIDE, 2×SATA, 1×FDD, 1×клавиатура, 1×мышь, 3×RS-232, 1×RS-232/422/485, 1×LPT, 6×USB 2.0;
- расширения: 1×PCI; 1×mini-PCI; PC/104-Plus

1.4. Варианты крепления и монтажа плат



Рис. 4.17. Вариант 1:
платы расширения устанавливаются
в ISA-слоты компьютера

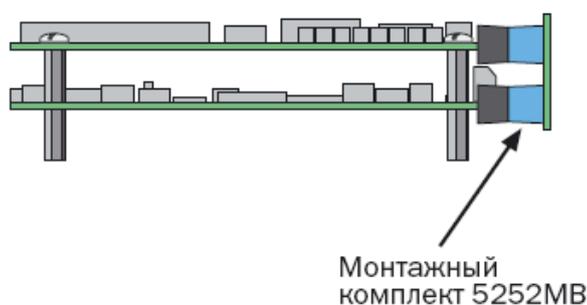


Рис. 4.18. Вариант 2:
установка «Этажеркой» процессорной платы
и платы расширения



Рис 4.19. Вариант 3:
автономное использование процессорной платы

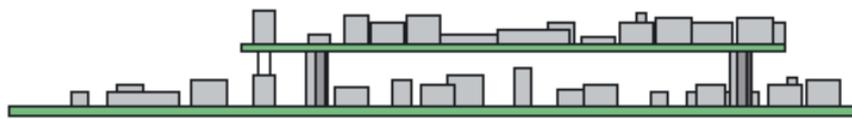


Рис. 4.20. Вариант 4:
установка плат стандарта PC/104 поверх плат
в формате MicroPC



Рис. 4.21. Вариант 5: гибкая установка «встык»



Рис. 4.22. Штатные карасы для настенного монтажа

4.5. Программируемые логические контроллеры, критерии выбора

Программируемый логический контроллер (ПЛК) – это микропроцессорное устройство, предназначенное для управления технологическими процессами в промышленности и другими сложными технологическими объектами [2]. Принцип работы ПЛК заключается в сборе сигналов от датчиков и их обработке по прикладной программе пользователя с выдачей управляющих сигналов на исполнительные устройства. ПЛК заменяет релейно-контактные схемы, собранные на дискретных компонентах – реле, счётчиках, таймерах, элементах жёсткой логики. Принципиальное отличие ПЛК от релейных схем заключается в том, что все его функции реализованы программно. На одном ПЛК можно реализовать схему, эквивалентную тысячам элементов жёсткой логики. При этом надёжность работы схемы не зависит от её сложности.

Дальнейшим этапом развития (ПЛК) является программируемый контроллер автоматизации (РАС). Эти устройства совмещают функции множества других изделий и могут использоваться в большинстве разрабатываемых систем управления.

На современном этапе в качестве ядра любой системы промышленной автоматизации используется ПЛК, к которому со стороны объекта автоматизации подключаются датчики и исполнительные органы. Через датчики в ПЛК поступает информация о текущем состоянии объекта, а через исполнительные органы ПЛК может изменять состояние управляемого объекта. Эта базовая схема может усложняться. Например, ПЛК могут подключаться к АРМ оператора для супервизорного управления или к БД для накопления информации и интеграции в АСУ предприятия. Поскольку все ПЛК строятся на базе цифровой техники, естественным образом предполагаются некоторые языковые средства их программирования. Однако, в силу специфики задачи, иногда алгоритмические языки программирования, такие как Си, Паскаль, Си++, не годятся для этих целей.

Специфика автоматизации предполагает наличие собственно системы управления, включающей датчики обратной связи и органы управления, и внешней среды, на которую система управления воздействует через органы управления, и объекта управления технической системы, реализующей некоторую производственную технологию. Воздействия (или, другими словами, реакция системы управления) определяются алгоритмом управления в зависимости от событий на объекте управления, информация о которых поступает через датчики обратной связи. Для цифровых систем это обстоятельство обуславливает циклич-

ность управляющего алгоритма по схеме: считывание состояния входных сигналов через датчики, их обработка и формирование выходных сигналов, выдача выходных сигналов на исполнительные органы. Событийность предполагает алгоритмические изменения программы и набора обрабатываемых ею входных/выходных сигналов в зависимости от происходящих на объекте событий.

Алгоритм управления предполагает синхронизацию своего исполнения с физическими процессами во внешней среде, что обуславливает необходимость развитой службы времени и активную работу с временными объектами: задержками, паузами, тайм-аутами.

Другая характерная особенность алгоритмов управления – логический параллелизм, отражающий существование множества параллельно протекающих процессов в объекте управления. Логический параллелизм предполагает наличие в алгоритме управления независимых или слабо зависимых частей логически обособленных потоков управления.

В состав классического ПЛК входят следующие компоненты (рис. 1.23):

- 1) объединительная панель;
- 2) блок питания;
- 3) процессорный модуль;
- 4) коммуникационные модули;
- 5) модули ввода/вывода;
- 6) панель расширения;
- 7) панель оператора.

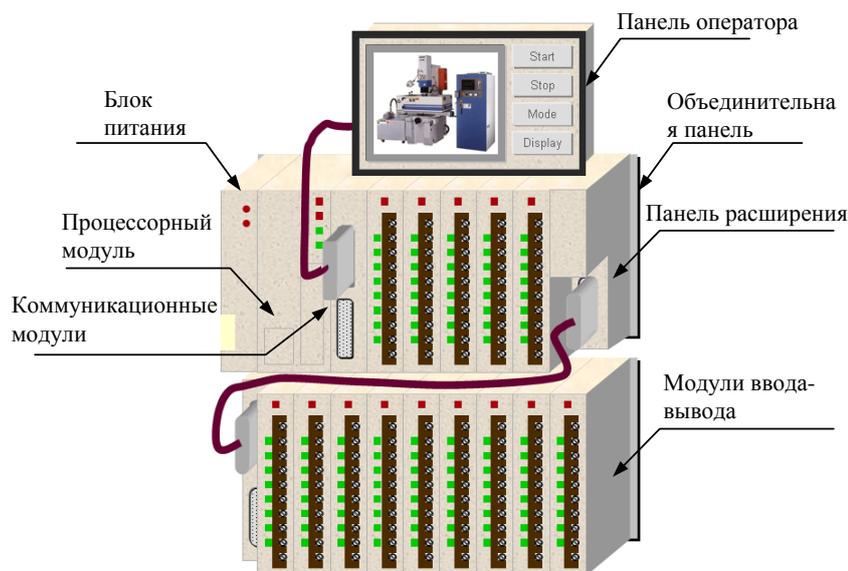


Рис. 4.23. Состав классического ПЛК

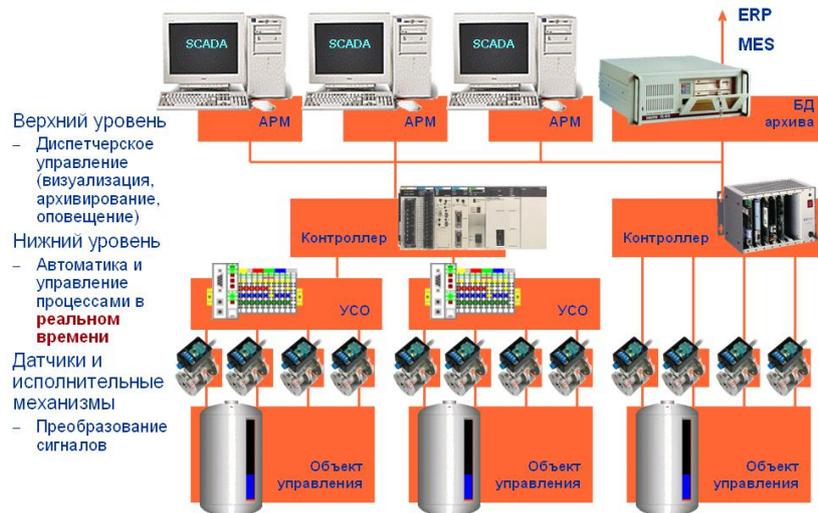
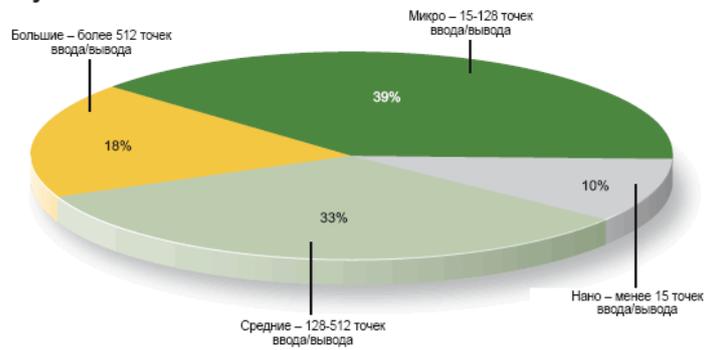


Рис. 4.24. Место ПЛК в структуре АСУ ТП

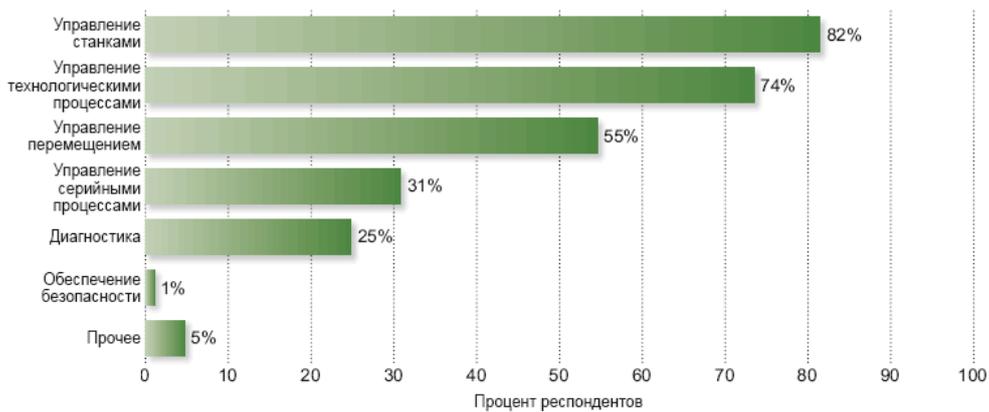
Типы установленных ПЛК



Источник: Control Engineering и Reed Research

Рис. 4.25. Классификация применяемых ПЛК в зависимости от количества точек ввода/вывода по данным Control Engineering

Использование ПЛК



Источник: Control Engineering и Reed Research

Рис. 4.26. Сферы применения ПЛК

Критерии выбора ПЛК:

1) *технические характеристики:*

- количество каналов ввода/вывода;
- быстродействие;
- уровни напряжения входов/выходов;
- напряжение изоляции;

2) *эксплуатационные характеристики:*

- диапазон рабочих температур;
- относительная влажность воздуха;

3) *потребительские свойства:*

- производительность;
- время выполнения операции;
- функциональность;
- надежность;
- наработка на отказ (MTBF);
- среднее время восстановления (MTTR);
- затраты;
- стоимость приобретения (стоимость оборудования и монтажа);
- стоимость эксплуатации (потребляемая мощность, гарантийный срок);
- массогабаритные характеристики.

Сетевые протоколы ПЛК, поддерживаемые большинством современных ПЛК:

- RS232/485;
- Ethernet;
- DeviceNet;
- Allen-Bradley Remote I/O;
- Modbus;
- ControlNet;
- Wireless protocol;
- Profibus;
- HART.

Языки международного стандарта МЭК 61131-3 для программирования ПЛК

В 1993 г. Международная электротехническая комиссия выпустила в свет стандарт МЭК 61131-3. Этот международный стандарт входит в группу стандартов МЭК 61131, которые охватывают различные аспек-

ты использования ПЛК. Декларируемые цели МЭК 61131-3 – стандартизация существующих языков ПЛК [1], а вернее, базовая платформа для такой работы в национальных комитетах стандартизации.

В стандарте МЭК выделяют 5 основных языков программирования ПЛК.

1. **SFC (Sequential Function Chart)** – графический язык, используемый для описания алгоритма в виде набора связанных пар: шаг (step) и переход (transition). Шаг представляет собой набор операций над переменными. Переход – набор логических условных выражений, определяющий передачу управления к следующей паре шаг-переход. По внешнему виду описание на языке SFC напоминает хорошо известные логические блок-схемы алгоритмов, хотя идеологически SFC близок к сетям Петри. SFC имеет возможность распараллеливания алгоритма. Однако SFC не имеет средств для описания шагов и переходов, которые могут быть выражены только средствами других языков стандарта. Происхождение: Grafset (Telemecanique-Groupe Schneider).

2. **LD (Ladder Diagram)** – графический язык, стандартизованный вариант класса языков релейно-контактных схем. Логические выражения на этом языке описываются в виде реле, которые широко применялись в области автоматизации в 60-х гг. Из-за своих ограниченных возможностей язык дополнен привнесенными средствами: таймерами, счетчиками и т.п. Происхождение: различные варианты языка релейно-контактных схем (Allen-Bradley, AEG Schneider Automation, GE-Fanuc, Siemens).

3. **FBD (Functional Block Diagram)** – графический язык, по своей сути похожий на LD: вместо реле в этом языке используются функциональные блоки. Алгоритм работы некоторого устройства, выраженный средствами этого языка, напоминает функциональную схему электронного устройства: элементы типа «логическое И», «логическое ИЛИ» и т.п., соединенные линиями. Корни языка выяснить сложно, однако большинство специалистов сходятся во мнении, что это ничто иное как перенос идей языка релейно-контактных схем на другую элементную базу.

4. **ST (Structured Text)** – текстовый высокоуровневый язык общего назначения, по синтаксису ориентированный на Паскаль. Самостоятельного значения не имеет: используется только совместно с SFC. Происхождение: Grafset (Telemecanique-Groupe Schneider).

5. **IL (Instruction List)** – текстовый язык низкого уровня. Выглядит как язык ассемблера, что объясняется его происхождением: для некоторых моделей ПЛК фирмы Siemens является языком ассемблера. В рамках стандарта IEC 1131-3 к архитектуре конкретного процессора

не привязан. Самостоятельного значения не имеет: используется только совместно с SFC. Происхождение – STEP 5 (Siemens).

Достоинства языков стандарта МЭК

1. Признанный во всем мире стандарт:
 - шаг за шагом все поставщики будут поддерживать его в будущем;
 - единообразные структуры, языки и способы их использования для всех поставщиков.
2. Экономит ваше время:
 - единая программная модель и концепция типов данных;
 - достаточно изучить один раз для разных типов ПЛК;
 - снижение количества недоразумений и ошибок;
 - стандартные функции и блоки функций;
 - повторное использование оттестированного ПО.
3. Поддержка безопасного и качественного программирования:
 - простое и удобное структурирование;
 - строгая типизация данных предотвращает появление ошибок.
4. Предоставляет подходящий язык для каждой задачи:
 - согласующиеся спецификации пяти языков программирования;
 - текстовые и графические языки;
 - доступность языков высокого уровня;
 - возможность смешивания различных языков.

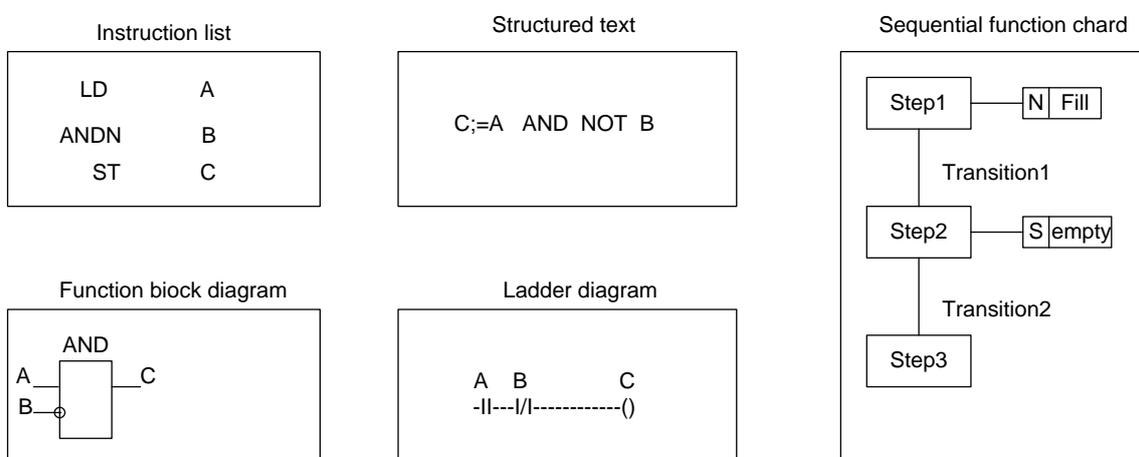


Рис. 4.27. Примеры работы с языками стандарта МЭК



Рис. 4.28. Используемые языки программирования ПЛК

4.6. Сервоконтроллеры

Сервоконтроллер представляет собой микропроцессорное устройство, способное управлять движением по заданной траектории в реальном масштабе времени. Это устройство может быть одно- или многоосевым (т.е. может управлять движением одной или нескольких осей одновременно). Программирование сервоконтроллера производится с помощью обычного персонального компьютера (ПК) на языке программирования, уникальном для данного контроллера. Загруженная программа в сервоконтроллер остается в памяти и управляет работой системы. Результатом работы сервоконтроллера является выдача управляющих сигналов на электропривод в какой-либо форме: обычно это аналоговое напряжение/ток (± 10 В, 4...20 мА, 0...20 мА и т.д.) которое пропорционально требуемой скорости, перемещению или крутящему моменту. В соответствии с сигналами обратной связи от датчиков положения происходит корректировка траектории движения исполнительного механизма.

При обзоре распространенных сервоконтроллеров выделяют 2 группы:

- 1) сервоконтроллеры, имеющие отдельное законченное исполнение;
- 2) программно-аппаратные сервоконтроллеры интегрированные в сервопривод.

4.6.1. Сервоконтроллеры, имеющие отдельное законченное исполнение

Наиболее распространенные сервоконтроллеры, относящиеся к этой группе, предназначены для установки в системы типа PCNC (Personal Computer Numerical Control). В такой системе сигналы обратной связи помимо сервопривода замыкаются на плату сервоконтроллера, а сигналы задания на привод поступают индивидуально на каждый через каналы ЦАП. Задачи контурного управления полностью вынесены на сервоконтроллер.

Приведенный в табл. 1.1 обзор наиболее распространенных сервоконтроллеров показывает, что наиболее перспективные сервоконтроллеры оснащены 64-битными микроконтроллерами с плавающей запятой, широким спектром различных видов интерполяции, а также большим числом дискретных входов/выходов. Одним из наиболее важных преимуществ таких модулей является отсутствие необходимости в доукомплектовании системы управления дополнительными модулями ввода/вывода. Однако стоимость таких сервоконтроллеров в некоторых случаях (в зависимости от оснащения) достигает 2000...3000\$. Ввиду этого при построении простых систем управления сервосистемами, наиболее предпочтительным является использование дешевых сервоконтроллеров с малым набором функций в сочетании с недорогими модулями ввода/вывода.



Рис. 4.29. Сервоконтроллер APCI-8001 фирмы ADDI-DATA



Рис. 4.30. Сервоконтроллер SERVO-300
фирмы ICP DAS

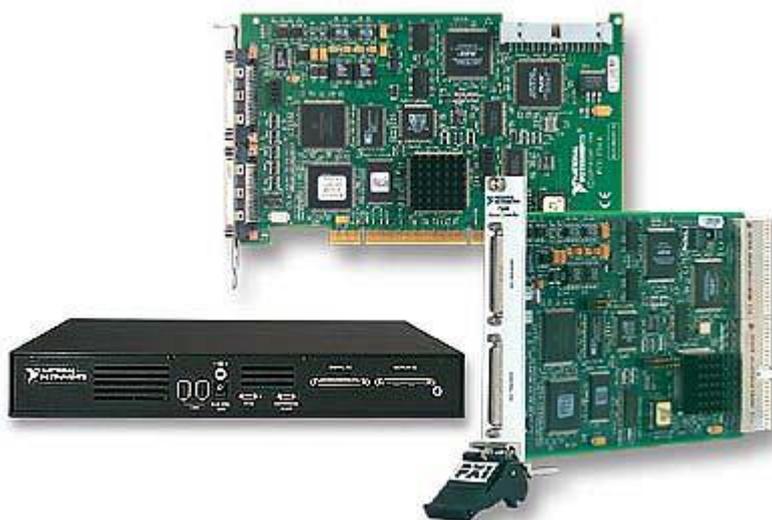


Рис. 4.31. Сервоконтроллеры
фирмы National Instruments



Рис. 4.32. The Brick Motion Controller
фирмы Delta Tau Data

Таблица 4.1

Модель	Интерполяция	Кол-во осей	Интерфейсы связи с ПК	Коммуникации	Тип сигнала ОС ДП	Дискретные входы/ выходы (аналоговые)	CPU	Память	Диапазон перемещений	Дополнительно
ADVANTECH, PCI-1241	Линейная, круговая	4	PCI	ЦАП 16 бит	TTL (2 МГц)	13 / 5	—	—	32 бит	Утилиты диагностики и конфигурирования. Разъемы: SCSI-II 68-pin
ADDIDATA, APCI-8001	Линейная круговая, сплайн CAD-интерполяция T/S-curve acceleration and deceleration, Point-to-point movement	3	PCI	ЦАП 16 бит / Step-Dir /INTERBUCAN (no CN open)	TTL (10 МГц) /SSI	16 / 8	64- бит RISC processor 150 МГц Floating point	32 МБайт	32 бит	Разъемы: 50-pin SUB-D male connector. Драйвера под Win 9x/NT/200, Linux. Автоматическая обработка откомпилированных пользовательских программ. Поддержка управления шаговых двигателей. Примеры программирования на Delphi, Borland C
PMC (Precision MicroControl), MultiFlex PCI 1440	Линейная, круговая, сплайн-интерполяция, point-to-point & coordinatd motion, Trapezoidal, S-cure and parabolic profiles	8	PCI	ЦАП 16 бит	TTL (5МГц)	16 / 16 8 АЦП 14bi	4- бит RISC processor, Floating point	16 МБайт Dynamic RAM. 512 Kbytes Flash ROM	32 бит	Драйвера под Win 9x/NT/2000/XP/Linux. Разъемы: SCSI-II 68-pin. Задание положения, и скорости и ускорения в формате 64 бит Floating point. Изменение параметров траектории и ПИД-регуляторов на лету. Примеры программирования на C/C++, Visual Basic, Delphi or LabVIEW. Программное обеспечение: Includes Motion Integrator™ suite of graphical installation, tuning and diagnostic programs

Продолжение табл. 4.1

Модель	Интерполяция	Кол-во осей	Интерфейсы связи с ПК	Коммуникации	Тип сигнала ОС ДП	Дискретные входы/ выходы (аналоговые)	CPU	Память	Диапазон перемещений	Дополнительно
ICP DAS, SER-VO300	Линейная, круговая	3	ISA	ЦАП 12 бит	TTL	8 / 10	—	KByte FIFO	—	Драйвера под DOS, Win 9x/NT/2000/XP. Примеры на VCB, VB, Delphi, LabView driver
ICP DAS, PCI-8134	Линейная, круговая, спиральная	4	PCI	—	TTL	24 / 6	—	—	—	
ICP DAS, PISO-PS400	Линейная 2/3 осевая, круговая 2 осевая, T/S-curve acceleration and deceleration, point-to-point & coordinated motion, T-curve and S-curve velocity profiles		PCI	ЦАП 16 бит	TTL (1 МГц)	128 / 128	MCX314As		32 бит	
PARKER ACR1505	Линейная, круговая, синусоидальная, кубические сплайны, NURBS, 3D дуги окружности, параболическая, T/S-curve acceleration and deceleration		PCI	АП 16 бит	TTL/SSI	16 / 16	2- бит floating point DSP, Texas TMS320VC33	8 МБайт 512 КБайт FLASH пользовательское ПО 512 KB FLASH системная память	—	Разъемы: 50-pin connectors. Коммуникации: 2 serial ports (RS232 and/or RS422), 1 parallel port (8 бит). Примеры программирования: Visual Basic, Visual C++, C++. Программное обеспечение: Program tools AcroVIEW Motion/PLC Program Development tools ActiveX controls/OCX controls

Продолжение табл. 4.1

Модель	Интерполяция	Кол-во осей	Интерфейсы связи с ПК	Коммуникации	Тип сигнала ОС ДП	Дискретные входы/ выходы (аналоговые)	CPU	Память	Диапазон перемещений	Дополнительно
Nova Electronics POSYS 1900	Линейная, круговая, T/S-curve acceleration and deceleration, point-to-point & coordinated motion, T-curve and S-curve velocity profiles		PCI	АП 16 бит / RS232 / 422 / 485 / CAN 2.0B	TTL (10 МГц) /SSI	8 / 4	CX314As	1МБайт	32 бит	Изменение параметров траектории и ПИД-регуляторов на лету. Режимы управления контуром положения: Close loop / Open loop (motor command is driven from user-programmed register). Разъемы: 100 position AMP connector, 68-position cable
Aerotech SMC – Software Motion Controller	Линейная, круговая, Point-To-Point	Д32	---	ireWire (IEEE-1394) / Device Net	TTL	8 / 8	К	ПК	---	Формат задания траектории G-code. Примеры на C/C++, Visual Basic. ПО: NCONTROL SDK, NLAB SDK, NLOGIC PLC, NVision VCM
ADVANT ECH, AMAX 2050KW	--	64	2×RS232 RS485, Ethernet, 2×USB	MONet™	---	2048 DIO	MD Geode GX2-400	256 МБайт DDR	---	Master. Поддержка VGA. Контроль, диагностика, удаленное управление
ADVANT ECH, AMAX-22xx	Линейная, круговая, -curve and S-curve velocity profiles	4	AMONet RS-485	LM×4, RDY×4, SVON×4, INP×4, ERC×4	TTL (6,5 МГц)	---	MD Geode GX2-400	---	28 бит	Slave для управления приводами Panasonic Minas A, Mitsubishi MR-J2S, Yaskawa Sigma-II. Разъемы: RJ45×2, SCSI-20P×8 (only AMAX-2242/J2S) SCSI-50P×4 (AMAX-2241/PMA and AMAX-2243/YS2)

Продолжение табл. 4.1

Модель	Интерполяция	Кол-во осей	Интерфейсы связи с ПК	Коммуникации	Тип сигнала ОС ДП	Дискретные входы/ выходы (аналоговые)	CPU	Память	Диапазон перемещений	Дополнительно
Prodigy PCI, Prodigy PC/104	Линейная, круговая, S-curve, trapezoidal, electronic gearing, and external profile modes	1, 2, 3, 4	PC/104 (ISA), PCI-bus, CANbus, serial communications	АП 16 бит, WM: 10-bit resolution at 20 kHz, 50/50 supports 2 or 3 phase motors; Sign magnitude supports 1 and 2 phase motors only ulse and Direction Output: MPulses/sec, TTL & Differential	TTL (8 МГц) /SSI	8 / 8 (8 АЦП 10 bit)	MD advanced Magellan™ Motion Processor	40 КБайт of dual-port RAM	32 бит	Поддержка: DC brush, brushless DC, step, and microstepping motors. Изменение параметров траектории и контура положения на лету. Период квантования: 50 μsec/axis. Программное обеспечение: PRO-MOTION® GUI. Примеры программирования на Borland C/C++, Visual Basic. Поддержка режима: multiple motion cards. Разъемы: 68-pin connector, RS232. Буфер на 2 точки останова по каждой оси
National Instruments NI735x	Линейная 3D, круговая 3D, T-curve and S-curve velocity profiles	8	PCI	АП 16 бит	TTL (20 МГц)	8 / 8 (8 АЦП 10 бит)	2 бит DSP	256 КБайт ROM	32 бит	Драйвера: Windows 2000/NT/XP, Linux and Mac OS X, LabVIEW Real-Time Буфер для точек останова по каждой оси. ПО: LabVIEW, NI Motion Assistant. Разъемы: 2×68-pin female high-density VHDCI type

Окончание табл. 4.1

Модель	Интерполяция	Кол-во осей	Интерфейсы связи с ПК	Коммуникации	Тип сигнала ОС ДП	Дискретные входы/ выходы (аналоговые)	CPU	Память	Диапазон перемещений	Дополнительно
Delta Tau Data S systems Turbo PMAC2 Brick Motion Controller	Линейная, круговая, T-curve and S-curve velocity profiles	8	USB2.0 and Ethernet TCP/IP or RS-232 port.	АП 18 бит	TTL (10 МГц)	16 / 8 Расширяется до 64	0 MHz DSP56303 CPU (120 MHz PMAC equivalent) (fast internal memory for 1st 15 axes servo & commutation)	128k×24 SRAM (for motion & uncompiled PLC progs, variables, tables, buffers). M×8 flash memory for user backup & firmware	32 бит	Поддержка работы: 64 asynchronous PLC program capability, 256 motion program capacity. Изменение параметров на лету
Delta Tau Data Systems PMAC2-PC/104	Линейная, круговая, T-curve and S-curve velocity profiles, Rapid point-to-point move mode; – Cubic B-spline interpolation mode; – Cubic Hermite-spline (PVT) interpolation mode; – Automatic move-until-trigger functions with hardware capture; – Interactive jog moves	8	USB2.0 and Ethernet TCP/IP or RS-232 port.	ЦАП 12 бит	TTL, Sinusoidal encoders, interferometers: – Resolvers; – Potentiometers; – LVDTs, RVDTs; – Parallel-format encoders, interferometers; – MLDTs; – Serial absolute encoders (e.g. SSI)	24 / 12	Motorola DSP 56k Digital Signal Processor (CPU options from 40 to 160 MHz)	128k×24 internal zero-wait-state SRAM 512k×8 flash memory for user backup and firmware	32 бит	48-bit floating-point math for user programs. PLC program capability. Разъемы: 50-pin IDC header for amplifier/encoder interface. 34-pin IDC header for flag interface. Дополнительные функции: – Hardware and software overtravel limits; – Amplifier enable/fault handshaking; – Following error limits; – Integrated current limit; – Encoder loss detection (some versions); – Watchdog timer; – Program and communications checksums



Рис. 4.33. PMAC2-PC/104 Motion Controller for 4 or 8 Axis фирмы Delta Tau Data



Рис. 4.34. АМАХ 2050KW (Master) и АМАХ-2241/РМА (Slave)

AUTOMATION 3200 SOLUTION

1.0 G Pentium® 4 computer running Windows 2000/XP with FireWire® port

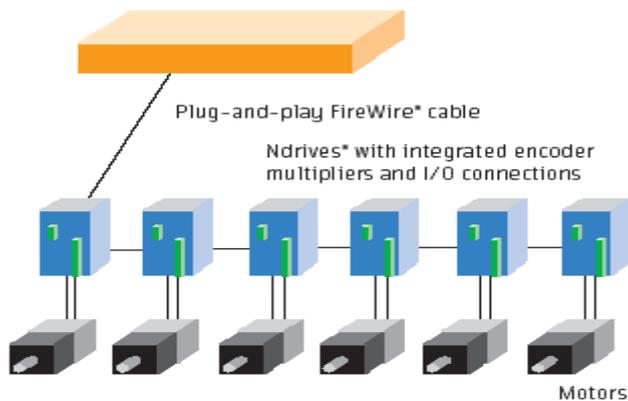


Рис. 4.35. Архитектура управления сервоприводами фирмы Aerotech

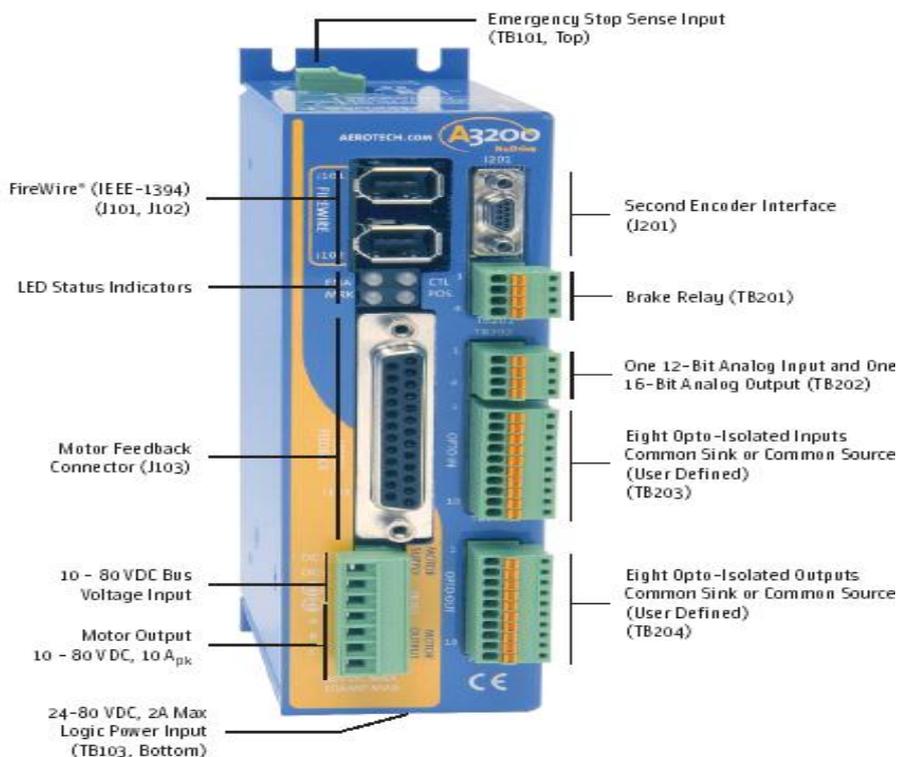


Рис. 4.36. Сервопривод Ndrive MP Aerotech

Одним из распространенных и недорогих сервоконтроллеров является трехосевой сервоконтроллер SERVO-300 фирмы ICP DAS, устанавливаемый в ISA-шину компьютера. Этот контроллер оснащен двумя видами интерполяции – линейной и круговой, а также 8 дискретными входами и 10 выходами. Единственным недостатком такого сервоконтроллера является использование ISA-шины. Ввиду того что на современных недорогих персональных компьютерах не установлена такая шина, то при создании системы управления, оснащенной данным сервоконтроллером, возникает необходимость в покупке специализированного промышленного компьютера с ISA-шиной. Стоимость сервоконтроллера не превышает 500\$, что позволяет строить в целом недорогие системы управления перемещением.

4.6.2. Состояние рынка сервоконтроллеров, перспективы развития

Состояние рынка сервоконтроллеров характеризуется следующими факторами:

- в целом ситуация на сегодняшнем рынке отражает переход от простых двух-, трехосевых сервоконтроллеров к многоосевым, обладающим такими видами интерполяции: линейная, круговая, сплайн-

интерполяция, NURBS, синусоидальная, параболическая, спиральная с поддержкой программируемых T/S-законов разгона торможения.

- Алгоритмы функционирования контура положения предполагают возможность изменения параметров контура положения (коэффициентов регуляторов, обратной связи, параметров траектории, T/S-законов разгона – торможения).

- Преимущественно наибольшее распространение получают сервоконтроллеры, оснащенные PCI-интерфейсом (выполненные как устанавливаемая PCI-карта в компьютер либо как законченный блок, устанавливаемый на DIN-рейку).

- Для интеграции в системы сторонних разработчиков достаточно удобен вариант сервоконтроллера Delta Tau Data Systems РМАС2-РС/104. Он обладает практически всеми параметрами, присутствующими современному сервоконтроллеру, как с точки зрения алгоритмического обеспечения, так и по наличию периферии и поддерживаемым сигналом обратной связи от датчиков положения.

- Существуют производители Aerotech (рис. 4.36), выносящие частично задачи расчета траектории на верхний уровень, – программная реализация на ПК.

- В качестве интерфейсов обратной связи наиболее распространены TTL (не менее 2 МГц)/SSI. Однако следует отметить, что в ряде случаев (например Delta Tau) существуют сервоконтроллеры, оснащенные такими интерфейсами, как синусоидальный, резольвер, параллельный код.

- Разрядность ЦАП современных сервоконтроллеров составляет в основном 16 бит.

- Увеличение количества дискретных входов/выходов (до 24, 32, 64). Это позволяет отказаться от дополнительной покупки специализированных модулей ввода/вывода, что, в свою очередь, позволяет реализовывать функции PLC на сервоконтроллере.

- Для вывода большого количества сигналов используются многопиновые разъемы, например 68-pin female high-density VHDCI type.

- Ряд производителей функции PLC выносят в отдельные модули, специализирующиеся только на функциях обработки дискретного ввода/вывода.

- Большинство производителей поддерживают параллельную работу нескольких сервоконтроллеров.

- Практически все сервоконтроллеры оснащены алгоритмами позиционирования в программный и аппаратный «ноль».

- Большинство производителей вносят алгоритмы управления типа «Look-Ahead».

- Исторически сложилось, что наиболее распространенным форматом задания траекторий движения является: G-code. Однако ряд производителей, особенно плат с шиной PCI предлагают набор библиотек со своими функциями. Согласование этих функций и G-кодов выполняется с помощью дополнительных библиотек.

- Применение 64-битных RISC-процессоров с арифметикой поддерживающей плавающую запятую, либо специализированных сигнальных микроконтроллеров, предназначенных для использования в системах «Motion Control» (MCX314As, PMD advanced Magellan™ Motion Processor).

- В качестве интерфейсов связи с сервоприводами, помимо ЦАП, используются Ethernet, CAN либо специализированные интерфейсы, например AMONet™ (Advantech).

- Интерфейсы связи с ПК различны, в основном зависит от производителя: Ethernet, USB, FireWire, PCI, ISA.

- Частота квантования в контуре положения в среднем составляет 500 Гц, в некоторых случаях она выше.

- Разрядности перемещений составляют +32...–32 бит.

Помимо аппаратной составляющей сервоконтроллера, следует также отметить программное обеспечение, поставляемое вместе с сервоконтроллерами. В общем случае базовое программное обеспечение содержит необходимый набор драйверов под наиболее распространенные операционные системы Windows NT/XP, Linux, QNX, DOS. Далее, после установки драйверов пользователь может использовать для конфигурирования параметров сервоконтроллера фирменное программное обеспечение либо (у каждого производителя свой подход к реализации ПО и функциональным возможностям), используя описание набора функций, написать собственное программное обеспечение для конфигурирования сервоконтроллера, а также интегрировать его в технологический процесс. Так, например, доступ к сервоконтроллеру в среде Windows NT/XP осуществляется с помощью специализированных бесплатных DLL – библиотек.

Глава 5 ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

5.1. Сервоприводы

5.1.1. Тенденции в развитии сервоприводов

Прогресс в областях электроники и используемых в электротехнике материалов изменил ситуацию в технике привода. До сих пор в сервотехнике применялись в основном двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. Главный недостаток двигателей переменного тока по сравнению с двигателями постоянного тока состоит в ограниченной возможности регулирования скорости. Последние достижения в области электроники, особенно в микроконтроллерах, позволяют компенсировать этот недостаток путем использования современных средств управления.

В настоящее время происходит смещение акцентов в приводных системах от двигателей постоянного тока к двигателям переменного тока. Тенденция перехода к синхронным двигателям переменного тока особенно очевидна в сервосистемах, которые почти всегда выполнялись с использованием электроприводов постоянного тока. Новые мощные постоянные магниты, изготовленные из сплавов неодим-железо-бора и самарий-кобальта, благодаря их высокой энергоемкости могут существенно улучшить характеристики двигателя при одновременном снижении массо-габаритных показателей электрических машин. Это, в свою очередь, сказывается не только в снижении его габаритов, но и в улучшении динамических характеристик привода.

В современной приводной технике во многих случаях предъявляются требования к следующим характеристикам:

- к погрешности позиционирования;
- к погрешности стабилизации скорости;
- к широкому диапазону регулирования;
- к стабилизации момента вращения;
- к перегрузочной способности;
- к высокой динамике.

Требования к динамике складываются из ускоряющихся процессов обработки, увеличения циклов обработки и связанной с ними производительностью машины. Высокая точность очень часто определяет возможность использования систем электропривода в новых технологиях. Этим требованиям должны отвечать современные высокодинамичные системы электропривода.

В соответствии с вышесказанным можно дать определение сервоприводу. Сервопривод – это система привода, которая в широком диапазоне регулирования скорости обеспечивает динамичные, высокоточные процессы и обеспечивает хорошую их повторяемость.

Изначально в машиностроительных отраслях сервоприводы были преимущественно вспомогательными приводами (приводы подач в станках, приводы роботов и т.п.). Однако в настоящее время ситуация изменилась, теперь и главные приводы реализуются с использованием сервотехники. Принципиально перечисленных выше качеств можно добиться с использованием двигателей постоянного тока независимого возбуждения, асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов.

5.1.2. Техническое развитие сервоприводов

Первоначально на рынке доминировали пневматические и гидравлические сервоприводы. Привод постоянного тока получил распространение лишь в 60-х гг., с развитием полупроводниковой техники. С точки зрения требований динамики развитие сервоприводов проходило в направлении создания двигателей постоянного тока с малым моментом инерции. В основу получения малого момента инерции ротора были положены два решения. Первое предполагало реализацию якоря двигателя в виде тонкого плоского диска, не содержащего железа, второе основывалось на получении цилиндрического немагнитного якоря. В обоих случаях в начале 70-х гг. стали широко применять постоянные магниты из редкоземельных материалов, обеспечивающих получение повышенного значения индукции в воздушном зазоре и высокого крутящего момента.

В качестве силовых преобразователей первоначально использовались аналоговые усилители с силовыми транзисторами и выходным напряжением приблизительно до 100 В. Позже появились тиристорные преобразователи, которые применялись до конца 70-х гг., когда им на смену пришли импульсные преобразователи постоянного тока на ключевых транзисторах. Это сопровождалось значительным повышением изначально низкого коэффициента полезного действия электронных источников питания. Напряжение, которое могло быть получено на выходе электронных источников питания, ограничивалось приблизительно на уровне 200 В из-за низкого допустимого напряжения транзисторов и ограничения напряжения между коммутируемыми сегментами коллектора двигателя. Транзисторные преобразователи, как правило, подключали к сети через трансформатор. Это позволяло осуществить согласование выходного напряжения преобразователя с питающей сетью.

Управление контурами скорости и момента было аналоговым, со всеми вытекающими из этого проблемами помехоустойчивости (восприимчивости низковольтных сигналов к наводкам), в широком диапазоне регулирования скорости, характерном для сервоприводов. Для измерения действительной скорости в канале обратной связи применялись тахогенераторы постоянного тока.

Развитие преобразователей частоты, первоначально реализуемых на тиристорах, позднее на силовых транзисторах, привело к повышению использования малоизнашиваемых асинхронных стандартных двигателей переменного тока для приводов с невысокими требованиями по точности управления.

Исследования бесщеточных двигателей, которые могут быть использованы в сервоприводах, были начаты с середины 70-х гг. В противоположность обычной компоновке двигателя постоянного тока разработчики пришли к перспективному новому решению: якорь – на статоре, поле возбуждения – на роторе. Так появились бесщеточные двигатели постоянного тока, или двигатели с электронной коммутацией. Эти электрические машины принципиально представляют собой синхронные двигатели СД с постоянными магнитами, в которых положение ротора контролируется простым импульсным датчиком положения (энкодером), производящим 6 импульсов на оборот, по числу полюсов СД. В дополнение к электронной бесконтактной коммутации и низкому износу, этот тип привода имеет следующие преимущества:

- пониженный момент инерции из-за отсутствия обмотки на роторе;
- простота охлаждения, т.к. отвод тепла от статора предпочтительнее, чем от ротора;
- повышенный КПД, т.к. нет потерь, связанных с обмоткой возбуждения.

Электронная коммутация секций обмотки статора производится каждые 60 электрических градусов и осуществляется датчиком положения ротора (ДПР). Как и коммутация с помощью коллектора, в двигателях постоянного тока этот принцип коммутации также реализуется в виде устройства коммутации и имеет блочное исполнение. Для управления скоростью двигателя необходим дополнительный датчик скорости, например тахогенератор.

Параллельно с этим развивалось также и направление по применению асинхронного двигателя переменного тока в качестве бесщеточного сервопривода. Этот тип двигателя дешев в производстве и имеет дополнительное преимущество с возможностью управления в диапазоне ослабления поля.

С другой стороны, с разработкой бесщеточных двигателей проводились теоретические исследования по так называемой синусной коммутации сервопривода. Принципиально двигатель с синусной коммутацией представляет собой СД с постоянными магнитами, со всеми преимуществами, указанными выше. Однако датчиком положения ротора в этом случае служит резольвер, выходными синусоидальными сигналами которого управляется ток статора машины.

Указанные выше все три типа бесщеточных приводов используются в настоящее время и обеспечивают почти полную замену приводов со щетками с начала 90-х гг. Решающим фактором этих успехов явился прогресс в области полупроводниковой техники.

Развитие высокой степени интеграции, высокоскоростных процессорных систем и модулей энергонезависимой памяти облегчило внедрение цифрового управления. Во всяком случае, функциональные задачи, встречающиеся более или менее часто в индивидуальных технических системах, не так сильно сказывались на цене. Внедрением индивидуального программного обеспечения удалось избежать увеличения количества аппаратных модулей.

Силовые модули в системах управления для всех трех типов бесщеточных приводов основаны на следующем: преобразователь частоты (инвертор), управляемый датчиком положения ротора двигателя, предпочтительнее, чем инвертор с независимым управлением, используемый для стандартных двигателей переменного тока. Функциональные различия состоят только в наличии замкнутой и разомкнутой обратной связи в системе управления. Развитие силовых транзисторов с начала 90-х гг. сделало также возможным подключать системы управления сервоприводами (сервоконтроллеры) непосредственно к сети, без использования сетевого трансформатора.

Таким образом, пройдя несколько этапов эволюции, современный сервопривод представляется сложной системой, показанной на рис. 5.1.

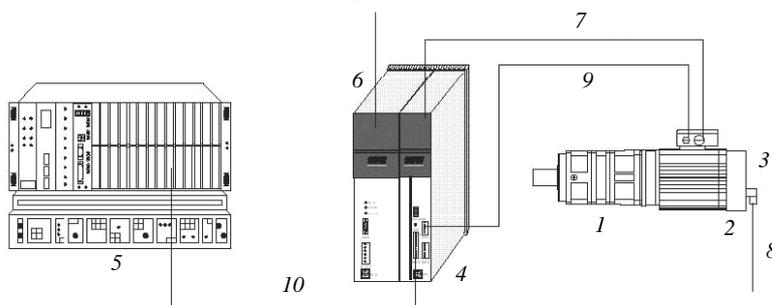


Рис. 5.1. Компоненты сервопривода: 1 – двигатель (с редуктором); 2 – датчик обратной связи; 3 – тормоз; 4 – сервоусилитель; 5 – внешняя управляющая система; 6 – сетевой кабель; 7 – кабель двигателя; 8 – кабель тормоза; 9 – кабель датчика обратной связи; 10 – кабель управления

2.1.3. Области применения сервоприводов

Сервопривод первоначально применялся только в машиностроении, при инструментальной обработке материалов. Однако его потенциал был очень быстро реализован в начале 70-х гг. в результате расширения областей обработки, развития промышленных роботов и систем автоматизированной сборки.

В противоположность инструментальной обработке, замена пневматического и гидравлического оборудования шла медленнее, часто из-за больших различий в требованиях к размещению привода. В промышленности обработки материалов и робототехнических системах сначала использовались двигатели постоянного тока с дисковыми роторами совместно с низколюфтовыми планетарными редукторами или другими типами компактных редукторов, обеспечивающих минимизацию массогабаритных показателей привода. Позднее двигатели постоянного тока с дисковыми роторами были заменены бесщеточными двигателями. Теперь, когда автоматизация полностью охватила все области машиностроения, доминируют электроприводы, и механика машин сильно упростилась с использованием современных индивидуальных приводов взамен центрального привода. В результате расширился рынок сервоприводов. Сегодня трудно найти сферу деятельности, где нет применения сервоприводам. Наибольшее применение они находят в следующих областях:

- в изготовлении бумаги;
- изготовлении металлического листа;
- упаковке;
- обработке материалов;
- подъемно-транспортном оборудовании;
- деревообработке;
- производстве строительных материалов.

Сервоприводы широко используются в различных областях, и не все применения имеют высокую динамику. Однако возможности получения высокостабильного или точного управления, широкий диапазон регулирования скорости, высокая помехоустойчивость, малые габариты и вес часто являются решающим фактором их применения.

Благодаря современным цифровым технологиям сервоприводы сегодня использовать намного легче, чем несколько лет назад. Цифровые технологии предлагают широкий выбор ориентированных на специальное применение возможностей, большое разнообразие устройств связи с объектами (как напрямую, так и через шины интерфейсов) и возможность использовать персональный компьютер для контроля, оптимиза-

ции и автоматической настройки привода. Гидравлические и пневматические приводы, упомянутые выше, в настоящее время имеют только отдельные ниши на рынке.

2.1.4. Обзор наиболее распространенных систем сервоприводов

Если сравнивать распространенные сегодня системы привода, то базой для сравнения должны служить различные факторы. В качестве критериев сравнения наиболее целесообразно выбрать следующие три принципиальных показателя:

- характеристики двигателей;
- основные характеристики приводов;
- конфигурации системы управления.

Сводные данные по описанным критериям приведены в табл. 2.1. Сравнение приводится для конкретных двигателей близкой мощности с близкой номинальной скоростью [20].

Таблица 2.1

Параметры	Асинхронный двигатель, питающийся от сети	Двигатель постоянного тока	Синхронный двигатель с постоянными магнитами
1	2	3	4
Мощность, кВт	7,5	8,3	7,5
Скорость, об/мин	2900	3200	3000
Тип/типоразмер	DFV132M2	GFVN160M	DFY112ML
Тип защиты	IP54	IP44	IP65
Охлаждение	Вентилятор	Вентилятор	Самоохлаждение через поверхность
Длина, мм	400	625	390
Полная масса, кг	66	105	38,6
Масса ротора, кг	17	29	8,2
$J_d \cdot 10^{-4}$, кгм ²	280	496	87,4
Номинальный момент, Нм	24,7	24,7	24
Максимальный момент, Нм	2,6 <i>Нм</i>	1,6 <i>Нм</i>	3,0 <i>Нм</i>
Максимальное ускорение, 1/с ²	1588	797	8238
Максимальная динамика, % (серводвигатель = 100 %)	20	10	100
Время разгона без нагрузки, $t_{разг}$, мс	191	420	38

В табл. 2.1 приняты следующие обозначения:

- под максимальным угловым ускорением понимается максимальное угловое ускорение $a_{\max} = M_{\max} / J_{\text{д}}$;

- время разгона без нагрузки определяется выражением $t_{\text{разг}} = \frac{J_{\text{д}} \cdot n_{\text{д}}}{9,55 \cdot M_{\max}} = \frac{J_{\text{д}} \cdot \omega_{\text{д}}}{M_{\max}}$;

- максимальная динамика определяется по выражению $\omega / a_{\text{серво}} \cdot 100 \%$.

Оценив массу различных двигателей, видно, что синхронный двигатель с постоянными магнитами имеет наименьшую массу (рис. 2.2). Этот факт является достаточно важным преимуществом данного типа двигателей, особенно в случаях установки двигателя на перемещаемом механизме. Соответственно, наибольшей массой обладает двигатель постоянного тока.

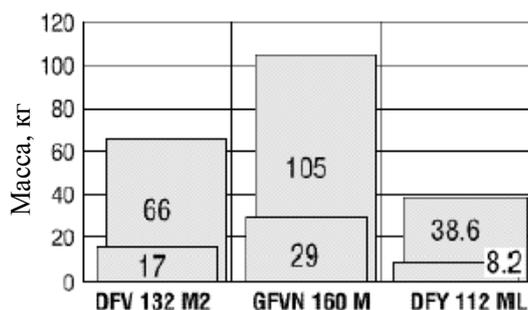


Рис. 2.2. Масса двигателей и роторов

Сравнивая моменты инерции двигателей, видно (рис. 2.3), что они особенно сильно различаются у двигателя постоянного тока и синхронного. Малый момент инерции двигателя выгоден, если исполнительный орган имеет небольшой момент инерции, приведенный к двигателю. Однако при большом моменте инерции исполнительного органа эта особенность синхронного двигателя оказывается несущественной.

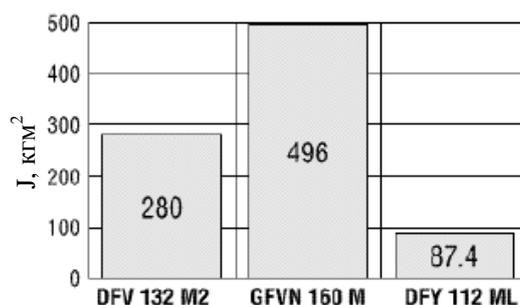


Рис. 2.3. Моменты инерции различных типов двигателей

Сравнение максимальной динамики различных типов двигателей показывает, что синхронные двигатели обладают наиболее высокими показателями по сравнению с другими типами двигателей (рис. 2.4).

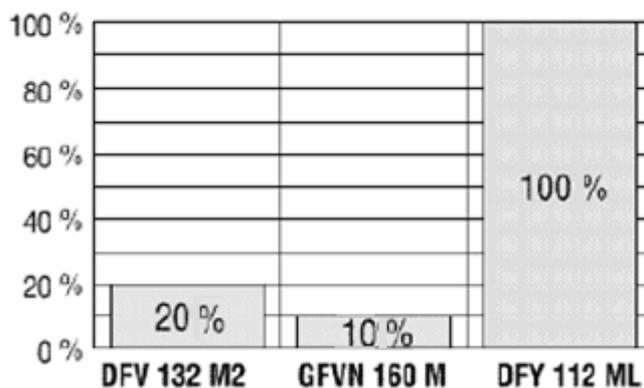


Рис. 2.4. Максимальная динамика

Из табл. 2.2 видно, что, благодаря высокому максимальному моменту M_{\max} и малому моменту инерции, синхронный двигатель имеет весьма малое время разгона без нагрузки, что позволяет рекомендовать его для динамичных электроприводов.

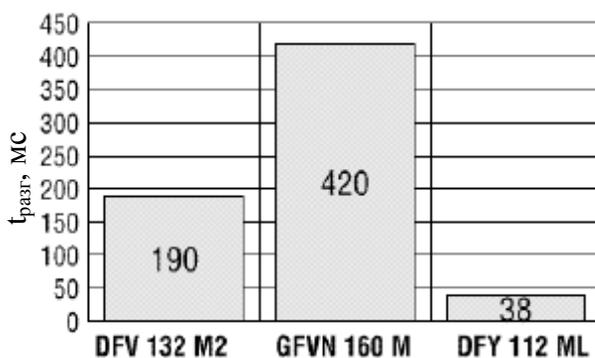


Рис. 2.5. Максимальная динамика

Другим значимым критерием сравнительной оценки систем сервоприводов являются характеристики исполнительных электроприводов. Обзор таких характеристик для различных типов приводов показан в табл. 2.2, 2.3

Таблица 2.2

Характеристики	Двигатель постоянного тока	Асинхронный двигатель, управляемый от преобразователя частоты (разомкнутый контур U/f)	Асинхронный двигатель, управляемый от преобразователя частоты (замкнутый контур U/f)	Синхронный двигатель
1	2	3	4	5
Диапазон регулирования R	100 (300):1	10 (20):1	100:1	300 (10000):1
Перегрузка M/M_n (%)	150...200	150	$> M_K^{1)}$	300
$t_{разг}$ (%) при замкнутом контуре управления	500	450...500	300...400	100
Принудительное охлаждение для широкого диапазона регулирования R	да	да	да	нет
Статический момент	в ограниченной мере	нет	в ограниченной мере	да
Обслуживание двигателя	большое	небольшое	небольшое	небольшое
Ремонт двигателя	средний	легкий	легкий	сложный
Взаимозаменяемость двигателей	да	да	да	возможно
Потребность в запасных частях	большая	небольшая	Небольшая (датчик)	большая
Управление большой внешней массой	отлично	хорошо	хорошо	сложно из-за малого $J_{дв}$
Аварийный останов с помощью механического тормоза двигателя	хорошо	хорошо	хорошо	хорошо ²⁾
Четырехквadrантный режим	с возвратом энергии в сеть (рекуперативное торможение)	с тормозным прерывателем /тормозным резистором	с тормозным прерывателем тормозным резистором	с возвратом энергии в сеть или тормозным прерывателем/ тормозным резистором

Окончание табл. 2.2

1	2	3	4	5
Возможность позиционирования и точность повторения	зависит от тахогенератора и внешних устройств	отдельно нет, в отличие от замкнутой по скорости системы	точность позиционирования приблизительно ± 50 угловых минут	точность позиционирования приблизительно ± 50 угловых минут

Примечания:

1) когда двигатель питается от преобразователя частоты с возможностью управления скоростью, соответствующий выбор преобразователя частоты позволяет получить максимальный момент двигателя в 300 % M_H и более;

2) в синхронных двигателях механический тормоз является только аварийным и стояночным тормозом.

Таблица 2.3

Характеристики	Асинхронный двигатель			Двигатель постоянно-го тока	Синхронный двигатель
	Прямое подключение к сети	ПЧ с управлением U/f	ПЧ с регулятором		
Тип	DV132S4 1400 об/мин	DV132S4 1400 об/мин	DV132S4 1400 об/мин	GVN132S 3200 об/мин	DFY112M 3000 об/мин
Мощность	5,5 кВт	5,5 кВт	5,5 кВт	5,3 кВт	17,5 Нм (5,5 кВт)
Редуктор	R82 $i = 14,69$	R82 $i = 14,69$	R82 $i = 14,69$	R82 $i = 33,87$	R82 $i = 31,78$
Тип устройства управления/мощность, ток	Нет	МС 31В 075 5,5 кВт	МС 31В 075 5,5 кВт	MR 315 15 А	MAS 51А-030 30 А
Пусковой момент M_H	2,4 M_H	1,3 M_H	2,0 M_H	1,5 M_H	3 M_0
max. время разгона	230 мс	450 мс	300 мс	620 мс	200 мс
Торможение	механическое торможение от полной скорости	динамическое торможение, затем механический тормоз	динамическое торможение, затем удержание механический тормоз	динамическое торможение, затем механический тормоз	динамическое торможение, затем удержание механический тормоз
max. ускорение $J_{внеш}/J_{двиг}$	6,7 $м/с^2$ 5,4	3,5 $м/с^2$ 5,4	5,3 $м/с^2$ 5,4	2,43 $м/с^2$ 1,0	7,45 $м/с^2$ 3,4
Полный тормозной путь (приблиз.)	150 мм	300 мм	190 мм	380 мм	125 мм
Теоретическая точность остановки	18 мм	0,4 мм	0,12 мм	0,12 мм	0,05 мм
Практическая точность	около 25 мм	около 3 мм	около 1 мм	около 1 мм	около 0,5 мм

остановки					
-----------	--	--	--	--	--

В соответствии с вышесказанным можно выделить следующие достоинства и недостатки рассмотренных сервоприводов. Преимущества:

- отличное поддержание скорости;
- относительно высокая стоимость системы;
- отличные динамические возможности;
- широкий диапазон регулирования скорости;
- высокая точность позиционирования;
- статический момент (при нулевой скорости);
- высокая перегрузочная способность ($3 M_0$).

Одним из наиболее значимых недостатков является относительно высокая стоимость системы.

2.1.5. Обзор серводвигателей

До недавнего времени сервоприводы выполнялись с использованием бесщеточных двигателей постоянного тока с постоянными магнитами совместно с тиристорными или транзисторными регуляторами. Сегодня в качестве сервоприводов все шире применяются электроприводы с синхронными двигателями, с постоянными магнитами. (рис.2.6). Их преимуществами, по сравнению с приводами постоянного тока, являются:

- хорошее соотношение цена/мощность;
- хорошие массогабаритные показатели;
- длительный срок службы;
- высокая перегрузочная способность.

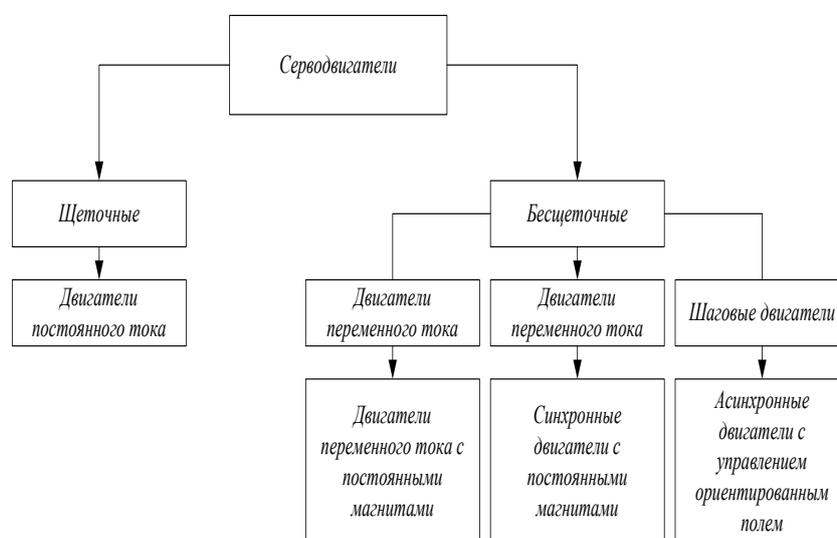


Рис. 2.6. Классификация серводвигателей

Приведенные системы отличаются конструкцией двигателя, конструкцией управляющей системы и типом обратной связи. В качестве примера рассмотрим далее три основные системы:

- асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и с управлением ориентированным полем;
- синхронный двигатель с постоянными магнитами (с прямоугольной коммутацией)/бесщеточный двигатель постоянного тока;
- синхронный двигатель с постоянными магнитами (с синусоидальной коммутацией)/бесщеточный двигатель переменного тока.

2.1.6. Обзор рынка современных сервоприводов

Выбор того или иного электропривода в системах управления перемещением имеет ключевое значение. В частности, корректный выбор сервопривода в станках с числовым программным управлением определяет не только показатели качества продукции на выходе, но и показатели экономичности использования ресурсов. Так, в одних случаях необходимо добиться предельно возможных показателей точности, быстродействия, надежности, КПД и т.д., достижимых на современном уровне техники и технологий, а в других - найти наиболее простое и экономичное решение. Современное состояние рынка сервоприводов предлагает пользователю большой выбор, поэтому решение тех или иных задач в первую очередь следует рассматривать с позиций выбора оптимального решения из возможных.

2.1.7. Синхронные сервоприводы Panasonic

В качестве примера сервоприводов фирмы Panasonic рассмотрим линейку сервоприводов MINAS A4. Это новая серия компактных высокопроизводительных сервоприводов (серводвигатель + сервоконтроллер) мощностью от 50 до 5000 Вт.

Отличительной особенностью сервоприводов Panasonic MINAS A4 служит простая и удобная настройка параметров благодаря сочетанию функций автоматической регулировки скорости в режиме реального времени и адаптивного фильтра, позволяющего подстраиваться под резонансную частоту системы.

Сервоконтроллеры MINAS A4 оснащены двухканальным фильтром компенсации вибраций, возникающих при старте и остановке двигателя. Эта функция особенно актуальна для высокоскоростных применений, при точной обработке твердых материалов и в машинах и механизмах с невысокой жесткостью конструкции.



Рис. 2.6. Внешний вид сервопривода фирмы Panasonic

Специализированное программное обеспечение PANATERM™ позволяет быстро запрограммировать сервоконтроллер, провести полную или частичную диагностику, мониторинг состояния и производительности системы. При необходимости сервомоторы Panasonic могут комплектоваться встроенным стояночным тормозом.

Серия Panasonic MINAS A4 включает несколько типоразмеров серводвигателей с различным моментом инерции ротора: сверхнизким, низким, средним и высоким. Основные технические характеристики сервоприводов MINAS A4 приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Напряжение питания	однофазное – 230 В, 50/60 Гц, до 1,5 кВт; трехфазное – 230 В, 50/60 Гц, от 0,75 до 5 кВт
Степень защиты	двигателя – IP 65, сервоконтроллера – IP 20
Скорость	3000 об/мин – номинальная, 5000 об/мин – максимальная
Мощность	от 50 до 5000 Вт, 6 типоразмеров
Момент	номинальный - 0,16...23,8 Нм, максимальный - 0,95...71,4 Нм
Энкодер	инкрементальный - 2500 имп/об, абсолютный - 17 бит
Управление	скоростью, моментом, позицией

Общие рабочие характеристики сервоконтроллеров серии MINAS A4:

1. Режимы работы:

- позиционирование;
- управление скоростью;
- управление моментом в замкнутом контуре.

2. Простая настройка регулятора скорости с помощью функции «Автоматическая настройка» в режиме реального времени.

3. Высокая производительность: полоса пропускания сигнала управления скоростью – 1000 Гц.

4. Функция «Фильтр подавления вибрации» для уменьшения вибрации при запуске и остановке двигателя.

5. Компактный размер (от 40×130×150 мм).

6. Максимальная частота импульсов при позиционировании – 2 МГц.

Сервоконтроллеры MINAS A4 делятся на подсерии, каждая подсерия разработана для решения отдельных специфических задач.

Серия MINAS A4 P – точное позиционирование

Общие рабочие характеристики:

1. Позиционирование с использованием комбинации входов/выходов.

2. Простой и экономичный способ позиционирования без дополнительного контроллера, без генератора импульсов.

3. Запоминание до 60 предустановленных позиций.

4. Легкое управление скоростью вручную (с помощью опции «Jog»).

Области применения:

• технологическое оборудование для микроэлектронной промышленности;

• координатные столы;

• роботы и порталные манипуляторы;

• упаковочное оборудование;

• подъемно-транспортное и конвейерное оборудование;

• оборудование для легкой и пищевой промышленности.

Серия MINAS A4 A – контроль позиционирования через порт RS 485 (38 кбит/сек)

Общие рабочие характеристики:

1. Управление сервоконтроллерами через интерфейс RS 485.

2. Максимальное количество осей – 31.

3. Управление по стандартному LAN-кабелю.

Области применения:

• технологическое оборудование для микроэлектронной промышленности;

• приводы позиционирования;

• роботы и порталные манипуляторы;

- упаковочное оборудование;
- подъемно-транспортное и конвейерное оборудование;
- оборудование для легкой и пищевой промышленности.

Серия MINAS A4 N – высокоскоростное управление по шине (100 Мбит/сек)

Общие рабочие характеристики:

1. Синхронизация и одновременное управление перемещениями (до 32 осей) со скоростью передачи данных - 100 Мбит/сек.
2. Различные варианты подключения сервоконтроллера и специализированного контроллера.
3. Управление по стандартному LAN-кабелю.

Области применения:

- технологическое оборудование для микроэлектронной промышленности;
- точные координатные системы;
- роботы и порталные манипуляторы;
- автоматизированные сборочные линии;
- станочное оборудование;
- упаковочное оборудование;
- подъемно-транспортное и конвейерное оборудование;
- оборудование для легкой и пищевой промышленности.

Серия MINAS A4 T – точное регулирование усилия (давления)

Общие рабочие характеристики:

1. Точное замкнутое регулирование усилия по сигналу тензодатчика.
2. Простое программирование системы с помощью комбинации входов, выходов (выбор функции – поиск, дополнительное усилие, фиксированное усилие, референсирование).
3. Выбор 8 типов команд усилия с помощью комбинации параметров и аналоговых входов.

Области применения:

- оборудование для микроэлектронной промышленности;
- кузнечно-прессовое оборудование;
- штамповочное и печатное оборудование;
- станочное оборудование;
- оборудование для обрабатывающей промышленности.

2.1.8. Синхронные сервоприводы Metronix

Синхронные сервоприводы Metronix – базовый продукт для системных решений в области промышленной автоматизации, предлагаемых компанией Metronix Co., Ltd (Южная Корея) под торговой маркой Any Pack. Сервоприводы Metronix в зависимости от предназначения выпускаются в трех версиях: VS, VP, VK.

Серия VS – стандартная общепромышленная, реализует управление по скорости, моменту (± 10 В) и положению (step/dir) рис(2.7) Преобразователи частоты серии VS могут работать в следующих режимах:

- Управление позицией при использовании внешнего контроллера, задающего последовательность импульсов.
- Управление скоростью по аналоговому входу или дискретным входам.
- Управление моментом по аналоговому входу в режиме ограничения максимального момента.
- Управление скоростью/позицией.
- Управление скоростью/моментом.
- Управление позицией/моментом.



Рис. 2.7 Внешний вид сервопривода фирмы Metronix серии VS

Для связи преобразователя частоты VS и персонального (промышленного) компьютера используется встроенный COM-порт. При необходимости через конвертор RS232/RS485 преобразователи частоты можно объединить в сеть. Более полные технические характеристики приводов серии VS приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Модель APD-VS		5	01	02	04	05	10	15	20	25	50	75	110
Питающее напряжение*		3×200–230 В (+10/–15 %), 50/60 Гц											
Параметры двигателей	$U_{\text{ном}}$, В	3 фазы, ШИМ											
	$I_{\text{ном}}$, А	1,2	1,65	1,65	3,2	4,3	6,4	11	16	21	32	38	50
	$I_{\text{макс}}$, А	3,6	4,95	4,95	9,6	12,9	19,2	33	48	63	96	102	125
Датчик положения	стандартный	Инкрементальный 5 В, 2000–10000 имп/об											
		Абсолютный 11/13 бит											
Режим управления скоростью	Функция управления	Диапазон регулирования $D\omega = 10000$. Максимальная частота $f = 400$ Гц											
	Команды на скорость	Аналоговая уставка ± 10 В, цифровая уставка (7 скоростей)											
	Время разгона/торможения, м·с	Линейная, S-образная механическая характеристика, 0...106											
Режим управления позицией	Входная частота импульсов, кГц	500											
	Описание импульсов	А+В, сдвинутые по фазе; вперед + назад импульс; направление + импульс											
	Электронное редуцирование	4 скорости, выбираемые дискретно, - от 1/50 до 50											
Точность поддержания скорости		$< \pm 0,01$ % (при нагрузке 0...100%); $< \pm 0,1$ % (при $t^\circ = 25 \pm 10$ °С)											
Режим управления моментом		Аналоговая уставка на момент, $U = \pm 10$ В, отклонение от линейной зависимости < 4 %											
Торможение		Рекуперативное, динамическое											
Условия окружающей среды	Диапазон рабочей температуры, °С	0...+50											
	Температура хранения, °С	–20...+80											
	Относительная влажность, %	< 90											

Примечание. * – возможно использование одной фазы.

Специальная серия VP предназначена для выполнения специальных задач:

- Линейно-координатное позиционирование с возможностью выбора до 64 позиций шестью дискретными входами (VP1). Типичная сфера применения – обеспечение линейного перемещения в системах с трансмиссией на ШВП.

- Угловое позиционирование с возможностью выбора до 32 позиций пятью дискретными входами (VP2). Типичная сфера применения – поворотные столы, роторные конвейерные линии, устройства автоматической смены инструмента и т.п.

- Позиционирование с использованием подачи дотягивания (VP3). Типичная сфера применения – упаковочные машины, всевозможные виды подающих устройств с позиционированием как по сигналу с энкодера на валу двигателя, так и по метке внешнего дискретного датчика.

- Программируемое пошаговое позиционирование с возможностью выбора до 8 программ тремя дискретными входами (VP5). Каждая программа может иметь до 100 шагов (позиций), сохраняемых в памяти преобразователя частоты.



Рис. 2.8. Внешний вид сервопривода фирмы Metronix серии VP

Более полные технические характеристики приводов серии VP приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Модель APD-VP		R5	01	02	04	05	10	15	20	35	50	75	110
Питающее напряжение*		3×200...230 В (+10/-15 %), 50/60 Гц											
Параметры двигателей	$U_{ном}$, В	3 фазы, ШИМ											
	$I_{ном}$, А	1,2	1,65	1,65	3,2	4,3	6,4	11	16	21	32	38	50
	I_{max} , А	3,6	4,95	4,95	9,6	12,9	19,2	33	48	63	96	102	125
Датчик положения	Стандартный	Инкрементальный 5 В, 2000...10000 имп/об											
	Оptionальный	Абсолютный 11/13 бит											
Установка позиционирования координат		Установка 64 точек max. через входные клеммы. Установка 6 позиций, 2 цифровые установки скорости											
Расширение входов/выходов	Контакты входа/выхода	Входы – 20 точек; выходы – 9 точек											
	Описание импульсов	А+В, сдвинутые по фазе; вперед + назад импульс; направление + импульс											
	Аналоговые входы	Максимально 4 канала, $U = \pm 10$ В											
	Аналоговые выходы	Максимально 2 канала; $U = 0...5$ В											
	Выходы энкодера	А, В, N каналы с напряжением 5 В; возможность деления частоты импульсов – от 1:1 до 1:16											
Торможение		Рекуперативное, динамическое											
Условия окружающей среды	Диапазон рабочей температуры, °С	0...+50											
	Температура хранения, °С	-20...+80											
	Относительная влажность, %	< 90											

Примечание. * – возможно использование одной фазы.

Серия VK – однофазная версия ПЧ, работает только под управлением контроллера движения (сигнал step/dir). Обобщенные характеристики сервоприводов Metronix (рис 2.9) приведены в сводной табл. 2.7

Таблица 2.7

Диапазон мощностей	от 0,03 до 11 кВт
Питающее напряжение (3-фазный ток)	200...230 В (+10/-15 %), 50 Гц
Диапазон рабочих температур	0...+50 °С
Класс защиты	IP 55; IP 65
Допустимая влажность	< 90 %
Диапазон регулирования скорости	10000 об/мин
Допустимая перегрузка по моменту	3·Мн
Неравномерность частоты вращения при температуре от 10 до 25 °С	<± 0,1 %

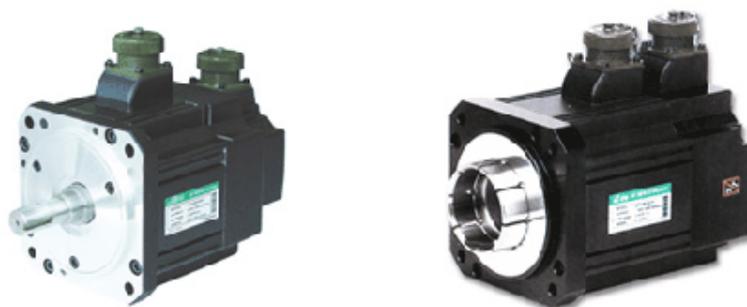


Рис. 2.9. Внешний вид двигателей фирмы Metronix

Основные преимущества приводов Metronix:

- Встроенный комплект рекуператора, позволяющий возвращать энергию в сеть, и встроенный ключ сброса энергии при динамических торможениях.
- Тестовый режим работы преобразователей частоты.
- Функции устранения вибраций при вращении двигателя и его останове позволяют исключить работу преобразователя частоты в колебательном режиме, как при наладке, так и в эксплуатации.
- Возможность использования как относительных, так и абсолютных инкрементальных датчиков положения.
- Выбор режима работы системы управления – управление по скорости или по моменту.
- Наличие расширенного пакета программного обеспечения позволяет легко и быстро менять функции преобразователя частоты и решать на его базе различные технические задачи (в т.ч. по реализации управления приводами подачи).

- Наличие в линейке продукции Metronix двигателей с полым валом позволяет исключить из кинематической схемы промежуточное устройство – соединительную муфту.

- Программируемые выходы позволяют строить системы с высокой степенью защиты от различных нештатных ситуаций и с максимальной информативностью для оператора.

Функции, используемые при управлении скоростью:

- Автоподстройка коэффициентов пропорциональной и интегральной составляющей регулятора скорости при изменяющихся моментах инерции.

- Свободно программируемый ПИ регулятора скорости позволяет использовать отдельно как П, так и И составляющую и легко адаптировать преобразователь частоты к конкретным условиям применения.

- Использование как аналоговой уставки, так и цифрового задания различных скоростей (до 7) с помощью дискретного переключателя.

- Устранение ползучей скорости привода с помощью уменьшения чувствительности системы к флуктуациям токов.

- Удобное формирование механических характеристик привода при переменных режимах работы, задание времени разгона и торможения, формирование S-образных кривых.

- Уставка задания скорости как с цифрового, так и с аналогового источника уставки.

- Функция задания реверса, исходя из значения аналоговой уставки и с помощью логических сигналов.

- Входной ЦАП 12 бит.

Функции, используемые при управлении моментом:

- Ограничение момента для адаптации динамических выбросов момента к реальным условиям функционирования машины (механизма).

- Момент удержания скорости в нуле равен моменту сопротивления.

- Задание уставки на момент в аналоговом формате.

- Исключение резонансной частоты исполнительного органа из полосы пропускания контура управления моментом привода.

Функции, используемые при управлении положением:

- Встроенный модуль ограничения перемещений исполнительного механизма позволяет строить безопасные системы позиционирования без датчиков ограничения.

- Функция выбора люфта позволяет учитывать реальные зазоры при построении систем позиционирования без реализации этой функции в системах контроля верхнего уровня, что значительно упрощает структуру программы контроллера, задающего уставку на позицию.
- Реализация процесса позиционирования с применением подачи дотягивания.
- Наличие встроенного модуля поиска нулевой метки датчика позиции.
- Точность позиционирования определяется типом датчика обратной связи.

2.1.9. Синхронные сервоприводы Mitsubishi Electric

Наиболее совершенным сервоприводом фирмы Mitsubishi Electric является сервопривод серии *MR-J2-SUPER*. Изображение сервопривода приведено на рис. 2.10.



Рис. 2.10. Внешний вид сервопривода MR-J2-SUPER фирмы Mitsubishi Electric

Ряд ключевых изменений, реализованных в Super-серии, позволил существенно улучшить характеристики сервоприводов Mitsubishi по сравнению с предыдущей серией MR-J2. Использование, например, быстродействующего RISC-процессора Mitsubishi позволило значительно улучшить динамические характеристики привода. Серводвигатели Super-серии также претерпели изменения: разработана новейшая модель двигателей серии HC-KFS, являющихся самыми компактными и идеально подходящими в качестве приводов механизмов с большим моментом инерции и низкой механической податливостью.

Разрешающая способность встроенных в двигатели Super-серии абсолютных энкодеров была увеличена с 13 до 17 бит, что существенно улучшило точность синхронизации и позиционирования приводов. Улучшены также Коммуникационные возможности привода: дополнительный порт RS422/RS485 позволяет подключить до 32 приводов в единую сеть.

Как было сказано выше, разрядность абсолютных энкодеров серводвигателей увеличена до 17 бит, а по специальному заказу может быть расширена до 20 бит. В таких энкодерах реализована запатентованная Mitsubishi Electric технология, существенно снизившая габаритные размеры датчика и, как следствие, серводвигателя. Максимальное уменьшение размеров было и остается одной из наиболее приоритетных задач при разработке всей продукции Mitsubishi Electric. Разумеется, при разработке сервоусилителей данная задача также не осталась без внимания. Например, в сервоусилителях MR-J2-Super используются только оптимизированные компьютерными средствами с точки зрения теплового рассеяния полупроводниковые компоненты, что позволило разместить их в корпусе минимально возможных габаритов. Использование специального микропроцессора Mitsubishi позволило более чем в два раза увеличить полосу пропускания привода: от 250 до 550 Гц, что, разумеется, крайне важно для механизмов, функционирующих в режиме коротких циклов. Периоды позиционирования также должны занимать минимально возможное время. Данный параметр был также улучшен до 0,9 мс, что в сравнении с предыдущей моделью (5 мс) значительно меньше. В будущем будут разработаны специальные версии сервоусилителей, способные реализовывать периоды позиционирования 0 мс.

Алгоритмы автоматической настройки в реальном времени

Интеллектуальные функции, реализованные в MR-J2-Super, облегчают установку и наладку привода. Высококвалифицированным специалистам, востребованным для этого ранее, сейчас не приходится использовать свои глубокие знания. MR-J2-Super действительно не требует глубокого понимания процессов, протекающих в приводе. Некоторые интеллектуальные функции реализованы в самом сервоусилителе и функционируют в режиме реального времени, некоторые – в специально разработанном программном обеспечении, используемом на стадии установки и наладки. Одной из таких функций, реализованных в сервоусилителе, является функция автоматической настройки, адаптирующая параметры привода к параметрам постоянно изменяющейся нагрузки. Для правильного функционирования алгоритма автоматической

настройки необходимо знать точное соотношение момента инерции двигателя и приводимого механизма. Способ, используемый для определения этого соотношения, должен подходить для различных механических систем и иметь возможность определять и корректировать данное соотношение во время работы. Это означает, что параметры должны определяться в режиме реального времени и во всех возможных, реальных на практике, условиях. Исходными данными для расчета данного соотношения являются значения времени отклика тока и скорости. Тем не менее, при возникновении каких-либо возмущений, например, высокое трение или чрезмерно интенсивное время разгона/торможения, расчетное значение соотношения инерций двигателя и нагрузки может довольно существенно отличаться от реального значения. Традиционные алгоритмы автоматической настройки дают в таких условиях неудовлетворительные результаты, что опять вызывает необходимость вмешательства человека для ручной коррекции параметров. Таким образом, смысл автоматической настройки теряется. Алгоритм автоматической настройки, разработанный Mitsubishi Electric для MR-J2-Super, существенно отличается: он эффективно идентифицирует и отслеживает такого рода режимы, что позволяет исключать ошибки расчета и, как следствие, вмешательство человека для коррекции параметров. Таким образом, для MR-J2-Super практически нет ограничений по области применения с точки зрения динамических свойств механизмов, обеспечивая качественное регулирование как для нагрузок с резкими измерениями момента, так и для высокофрикционных нагрузок.

Адаптивная система подавления вибраций

Снижение вибрации является еще одной online-функцией сервопривода. Специально разработанная адаптивная система подавления вибрации автоматически распознает резонансные явления и предотвращает их прогрессирование. После распознавания вибрации выполняется расчет ее составляющих, исходя из сигналов обратной связи, после чего активизируются адаптивные алгоритмы фильтрации. Коэффициент демпфирования рассчитывается и корректируется автоматически во время работы, исключая тем самым ошибки, возможные при использовании традиционных алгоритмов подавления вибрации, использующие фиксированные заранее введенные характеристики фильтров.

Еще одно преимущество заключается в том, что даже смещение точки резонанса, вызванного колебаниями нагрузки во время функционирования, автоматически идентифицируется и отслеживается. Однако в некоторых случаях (в частности, в диапазоне частот до 1 кГц) различ-

ные виды вибрации могут все же требовать выполнения детального анализа механизма и соответствующего конфигурирования параметров по результатам анализа. Проблема заключается в том, что это требует больших затрат времени и специального программного инструмента, реализующего алгоритм быстрого преобразования Фурье. В прошлом это, как правило, приводило к полному отказу от такого рода исследований и удалению резонансных явлений другими, значительно более трудоемкими, способами. Новый сервоусилитель Mitsubishi Electric серии MR-J2-Super имеет интегрированную процедуру виброанализа. Тем не менее, т.к. данные алгоритмы требуют высокой точности и, как следствие, интенсивности расчетов, основная часть вычислений выполняется с помощью компьютера. Сервоусилитель же измеряет необходимые значения и выполняет команды, передаваемые ему с компьютера. Программное обеспечение, установленное на компьютере, функционирует следующим образом. Сначала сервоусилитель выдает сигнал задания момента таким образом, что это приводит к вибрации вала двигателя. После этого начинается анализ и расчет резонансных точек, вызывающих нестабильное функционирование, а также определение математической модели механизма. В результате расчетов определяются оптимальные уставки контроллера и фильтра, что позволяет снизить уровень вибрации до минимума и обеспечить максимально лучшие динамические характеристики. Данная функция является стандартной для всех сервоприводов Mitsubishi Electric.

Конфигурационное программное обеспечение также имеет функцию, позволяющую разработчику выполнить оптимизацию привода у себя на столе при неподключенном приводе. Например, можно выполнить симуляцию и определить динамические характеристики механизма на основании математической модели, полученной ранее. Если анализ в режиме online невозможен, можно использовать виртуальную модель. Данный инструмент позволяет моделировать функционирование системы в условиях различных параметров движения и уставок контроллера без необходимости выполнения реальных движений. Это позволяет еще до физического пуска привода определить параметры контроллера и предотвратить тем самым возможные проблемы из-за высокочастотных вибраций.

Новейшие технологии, реализованные в сервоприводах Mitsubishi Electric, не только позволяют сократить период рабочего цикла и увеличить точность позиционирования. Многие вспомогательные средства, функционирующие в автоматическом режиме, позволяют настроить сервопривод средствами, реализованными в сервоусилителе или программном обеспечении к нему. Необходимость в использовании каких-

либо других программных или аппаратных средствах отсутствует. Реализованные в сервоприводах алгоритмы способны даже отслеживать изменения приводимых механизмов и адаптироваться к ним автоматически. Достижение оптимального результата происходит быстро и легко и не требует наличия опыта и глубоких знаний обслуживающего персонала.

Серия MR-C – является идеальной альтернативой шаговым приводам.

- Диапазон мощностей – от 100 до 400 Вт.
- Номинальный момент – до 1,3 Нм.
- Перегрузочная способность – до 400 %.
- Двигатели с абсолютным энкодером - 4096 позиций/оборот.

Компактная серия MR-C обладает достоинствами приводов с замкнутым контуром регулирования по ценам приводов с разомкнутым контуром. Обеспечение равномерного плавного вращения во всем диапазоне скоростей - от 0 до номинальной скорости, перегрузочная способность – до 400 % от номинального момента. Высокие динамические характеристики для задач с короткими рабочими циклами, значительными пусковыми моментами. Алгоритм адаптивной настройки контуров в реальном времени, автоматическая настройка параметров контуров регулирования исключают необходимость трудоемких настроек и делают установку быстрым и несложным процессом.

Другие важные преимущества данной серии:

- Режим пробного пуска предусмотрен с помощью клавиш самого модуля.
- Двигатели с ультрамалым моментом инерции серии HC-PQ обеспечивают надежную работу и высокую динамику в режиме коротких рабочих циклов.
- Расширенные защитные функции предотвращают выходы из строя как сервоусилителя, так и двигателя.
- Соответствие мировым стандартам CE и UL.
- Опциональный последовательный интерфейс для подключения компьютера с программным обеспечением под Windows для установки параметров и настройки привода.

Серия MR-J2-CL сочетает в себе сервоусилитель и модуль позиционирования в одном корпусе. Серия MR-J2-CL построена на базе сервоусилителей хорошо зарекомендовавшей себя серии MR-J2. Интегрированный в MR-J2-CL контроллер может хранить в своей памяти до 8 программ по 60 шагов каждая. Каждая программа может быть активи-

зирована в любой момент. Модуль также оснащен программируемыми входами/выходами для связи с внешними устройствами.

Кроме упрощения программирования и уменьшения числа кабелей, данный модуль имеет еще одно очень важное достоинство: он является одним из самых быстродействующих сервоприводов на рынке и соответственно идеально подходит для задач одноосевого позиционирования.

Основными преимуществами данной серии являются:

- Компактный сервоусилитель с интегрированным модулем позиционирования.
- Идеально подходит для задач одноосевого позиционирования.
- Может хранить в памяти до 8 программ по 60 шагов каждая.
- Программируемые входы/выходы.
- Автоматическая настройка.
- Интерфейсы RS-232 и RS-485.
- Подключение до 32 модулей в общую сеть по интерфейсу RS-485.
- Отдельный интерфейс для подключения к компьютеру.
- Программное обеспечение под Windows® для программирования параметров и настройки контуров регулирования.
- Совместимость со всеми двигателями, кабелями и периферийным оборудованием сервоусилителей серии MR-J2.
- Импульсный вход для подключения маховика (ручного генератора импульсов) удобен в режиме обучения (ввод координат в ручном режиме).

2.1.10. Синхронные сервоприводы OMRON

Сервоприводы фирмы Omron – это функционально законченные исполнительные устройства, состоящие из управляющего модуля (сервоконтроллера) и сервомотора. Предназначены для работы как в составе сети промышленных ПЛК, так и в автономном режиме. В зависимости от номинальной мощности и типа управления выпускаются несколько серий сервоконтроллеров. Для каждой из серий отдельно поставляется собственная серия сервомоторов модели R88M мощностью от 30 Вт до 5 кВт. Поставляемые модели сервомоторов могут комплектоваться встроенным шифратором и тормозом.

Серия UE – простой универсальный сервопривод малой мощности широкого назначения. Сервоконтроллер серии UE предназначен для управления одним сервомотором посредством импульсного сигнала. (рис. 2.11). Сервоконтроллер предназначен для работы с сервомоторами

серии R88M-UE. Может использоваться как самостоятельное устройство или совместно с ПЛК. Подключаемая панель оператора с индикатором и функциональной клавиатурой. Несложная настройка посредством задания основных 10 параметров. Встроенная функция полного контроля параметров системы и выдачи сигналов аварии. Самое лучшее соотношение цена/быстродействие и самое высокое быстродействие во всей U-серии. Может служить альтернативой шаговым системам.



Рис. 2.11. Внешний вид сервопривода OMRON серии UE

- диапазон мощностей управляемого сервомотора: 100...750 Вт;
- диапазон силы тяги сервомотора:
 - установившейся: 0,318...2,39 Н·м;
 - пиковой: 0,96...7,10 Н·м;
- напряжение питания: 200...230 В (однофазное);
- тип применяемого шифратора: инкрементный (до 1024 отсчетов/об.);
- модель применяемого сервомотора: R88M-UE;
- сигнал управления тормозом: есть;
- тип сигнала управления: импульсный;
- управление: ручное (панель оператора), программное (по сети);
- контролируемые параметры: частота вращения, сила тяги, состояние устройства.

Серия UT – мощный универсальный сервопривод (рис. 2.12). Сочетает в себе возможности импульсного и аналогового управления. Предназначен для работы с сервомоторами серии R88M-UT мощностью до 5,5 кВт. Может использоваться как самостоятельное устройство или работать совместно с ПЛК. Подключаемая панель оператора с индикатором и функциональной клавиатурой. Встроенные функции самонастройки, контроля параметров системы и выдачи сигналов аварии. Обладает расширенным набором команд оператора:

- диапазон мощностей управляемого сервомотора: 1,0...5,5 кВт;
- диапазон силы тяги сервомотора:
 - установившейся: 8,34...35,0 Н·м при 1500 об./мин,
3,18...15,8 Н·м при 3000 об./мин;
 - пиковой: 23,3...87,6 Н·м при 1500 об./мин,
9,54...44,4 Н·м при 3000 об./мин;
- напряжение питания: 200...–230 В (трехфазное);
- тип применяемого шифратора: инкрементный;
- модель применяемого сервомотора: R88M-UT;
- сигнал управления тормозом: есть;
- тип сигнала управления: импульсный и аналоговый;
- управление: ручное (панель оператора), программное (по сети);
- контролируемые параметры: частота вращения, сила тяги, состояние устройства.



Рис. 2.12. Внешний вид сервопривода OMRON серии UT

Серия UA – универсальный сервопривод, по основным характеристикам схожий с серией UE, но в отличие от нее имеющий аналоговое управление (рис.2.13). Имеет больший, по сравнению с серией UE, диапазон поддерживаемых мощностей. Предназначен для работы с сервомоторами серии R88M-U. Может использоваться как самостоятельное устройство или работать совместно с ПЛК. Подключаемая панель оператора с индикатором и функциональной клавиатурой. Встроенные функции самонастройки, контроля параметров системы и выдачи сигналов аварии. Наличие аналогового выхода (сигналы оборотов и момента). Сервоконтроллер отличается очень компактной конструкцией. Сервомоторы R88M-U обладают сверхнизким моментом инерции ротора.

На базе серии UA выпускается серия FND-X со встроенным позиционером и полностью цифровым принципом управления на основе

дискретного ввода-вывода или по интерфейсу CompoBus-S. Основные технические характеристики сервоконтроллера серии FND-X и типы применяемых сервомоторов идентичны серии UA.



Рис. 2.13. Внешний вид сервопривода OMRON серии UA

Характеристики сервопривода OMRON серии UA:

- диапазон мощностей управляемого сервомотора: 30...750 Вт;
- Диапазон силы тяги сервомотора:
 - установившейся: 0,095...2,39 Н·м,
 - пиковой: 0,29...7,10 Н·м;
- напряжение питания: 200...230 В (однофазное);
- тип применяемого шифратора: инкрементный (до 2048 отсчетов/об.), абсолютный (только для FND-X);
- модель применяемого сервомотора: R88M-U;
- сигнал управления тормозом: есть;
- тип сигнала управления: аналоговый (цифровой для FND-X);
- управление: ручное (панель оператора), программное (по сети);
- контролируемые параметры: частота вращения, сила тяги, состояние устройства.

2.2. Преобразователи частоты и софтстартеры для асинхронных двигателей

Ежегодно в мире выпускается более 1 миллиарда электродвигателей. Из них более половины нуждаются в оснащении электронной системой управления – софтстартеры, преобразователи частоты для асинхронных двигателей, сервоприводы.

Основная задача управления электроприводом состоит не только в осуществлении пуска/останова, в изменении направления вращения, но и в регулировании скорости вращения или связанной с ней производительности электропривода.

Общепромышленные механизмы, управляемые преобразователями частоты:

1) механизмы непрерывного транспорта, работающие продолжительное время на постоянной скорости, имеющие характеристику момента, не зависящую от скорости – эскалаторы, конвейеры, транспортеры;

2) механизмы с «насосной» характеристикой нагрузки, меняющейся при изменении скорости, – насосы, вентиляторы (также работают на постоянной скорости, но требуют регулирования производительности);

3) агрегаты с большой инерционной массой и повышенным пусковым моментом – центрифуги, мельницы, дробилки, мешалки, сепараторы (тяжелые условия пуска и длительный разгон);

4) машины, работающие в циклическом режиме, – фасовочно-упаковочное оборудование, дозирующие аппараты, маркировочные машины (непрерывно чередующиеся разгон/торможение).

Существует два основных типа преобразователей частоты:

- с непосредственной связью;
- с промежуточным контуром постоянного тока.

В первом случае выходное напряжение синусоидальной формы формируется из участков синусоид преобразуемого входного напряжения. При этом максимальное значение выходной частоты принципиально не может быть выше частоты питающей сети. Частота на выходе преобразователя этого типа обычно лежит в диапазоне от 0 до 25...33 Гц.

Во втором случае - преобразователи частоты с промежуточным контуром постоянного тока, выполненные на базе инверторов напряжения (наиболее распространенные). Структурная схема такого преобразователя приведена на рис. 2.14.

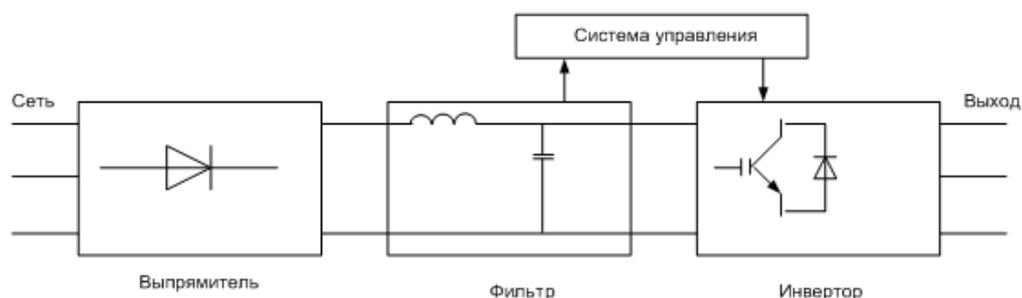


Рис. 2.14. Структурная схема преобразователя частоты с промежуточным контуром постоянного тока

Концепция функционирования преобразователя частоты: переменное напряжение сети преобразуется с помощью диодного выпрямителя, а затем сглаживается в промежуточной цепи индуктивно-емкостным фильтром. Далее осуществляется обратное преобразование из постоянного тока в переменный, обеспечивая формирование выходного сигнала с необходимыми значениями напряжения и частоты. Выходной каскад инвертора обычно выполняется на основе IGBT-модулей (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor – биполярный транзистор с изолированным затвором, рассчитанный на токи до нескольких килоампер, напряжение – до нескольких киловольт и имеющий частоту коммутации 30 кГц и выше).

Наиболее часто в инверторах применяется метод высокочастотной широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В этом случае выходной сигнал преобразователя представляет собой последовательность импульсов напряжения постоянной амплитуды и изменяющейся длительности, которая на индуктивной нагрузке, каковой является обмотка статора, формирует токи синусоидальной формы (рис. 2.15). Возможный диапазон регулирования частоты – от 0 до нескольких тысяч герц.

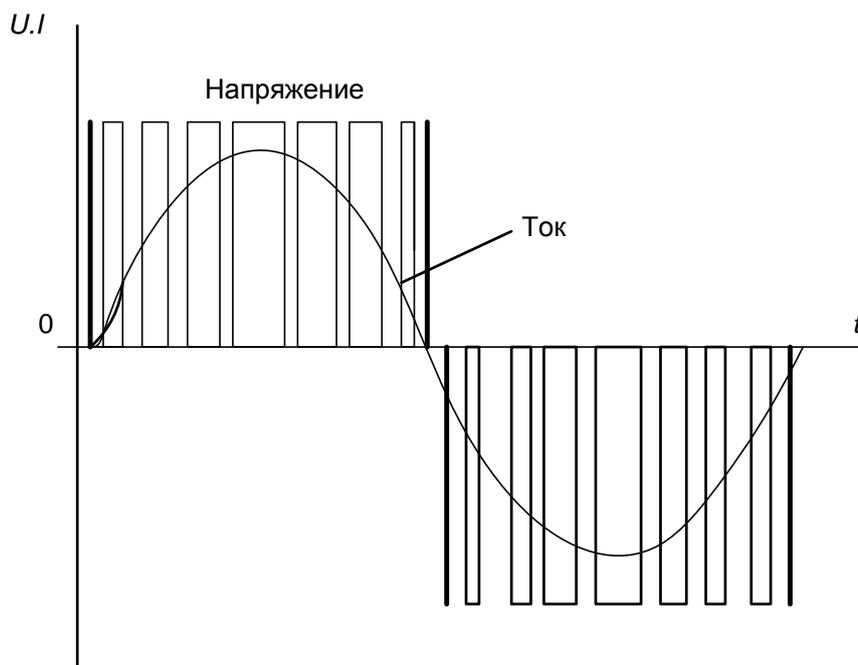


Рис. 2.15. Выходной сигнал преобразователя частоты

Требования к электроприводу определяются диапазоном требуемых скоростей и типом нагрузки. Зависимость между скоростью вра-

щения и моментом сопротивления неодинакова для нагрузок разного типа (рис. 2.16).

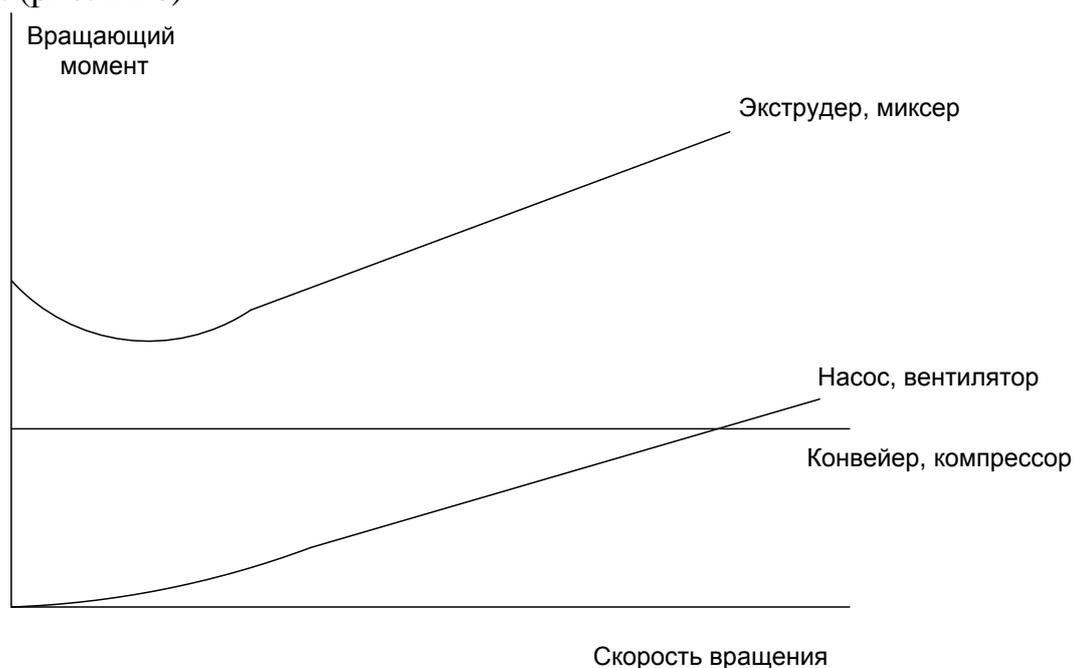


Рис. 2.16. Механические характеристики типичных нагрузок

Однако, помимо классических механизмов и типичных нагрузок, существует большая масса уникальных. Таким образом, выбору электродвигателя и преобразователя частоты должен предшествовать этап анализа характера нагрузки и ее механической характеристики. В зависимости от характера нагрузки преобразователь частоты должен обеспечивать различные режимы управления электродвигателем, реализуя ту или иную зависимость между скоростью вращения электродвигателя и выходным напряжением.

Для решения задач регулирования скорости момента в современном электроприводе применяют два основных метода частотного управления:

- 1) скалярное управление;
- 2) векторное управление.

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

Основной принцип скалярного управления - изменение частоты и амплитуды питающего напряжения по закону $U/f^n = \text{const}$, где $n \geq 1$. Конкретный вид зависимости определяется требованиями, предъявляемыми к приводу нагрузкой. Обычно за независимое воздействие принимается частота, а значение напряжения при данной частоте определяет вид механической характеристики, значения пускового и критического моментов. Скалярное управление обеспечивает постоянство перегрузочной способности привода независимо от частоты напряжения, однако имеет место снижение развиваемого двигателем момента при низких частотах (при $f < 0,1f_{\text{НОМ}}$). Максимальный диапазон регулирования скорости вращения ротора, при неизменном моменте сопротивления, для приводов со скалярным управлением достигает 1:10.

Основной недостаток – отсутствие возможности одновременного регулирования момента и скорости. Однако скалярные режимы управления позволяют обеспечить управление параллельно подключенными двигателями.

2.2.1. Практическое применение преобразователей частоты в системах автоматизации

Перечисленные режимы управления достаточны для большинства применений. Вместе с тем для повышения качества управления приводом требуется использование других, более совершенных, методов управления. К ним относятся метод управления потокосцеплением (Flux Current Control – FCC) и метод бессенсорного векторного управления (Sensorless Vector Control – SVC). Оба метода базируются на использовании адаптивной модели электродвигателя, которая строится с помощью специализированного вычислительного устройства, входящего в состав системы управления преобразователя и датчика обратной связи. Практическое применение преобразователей частоты для управления различными технологическими процессами показано на рис. 2.17–2.24.

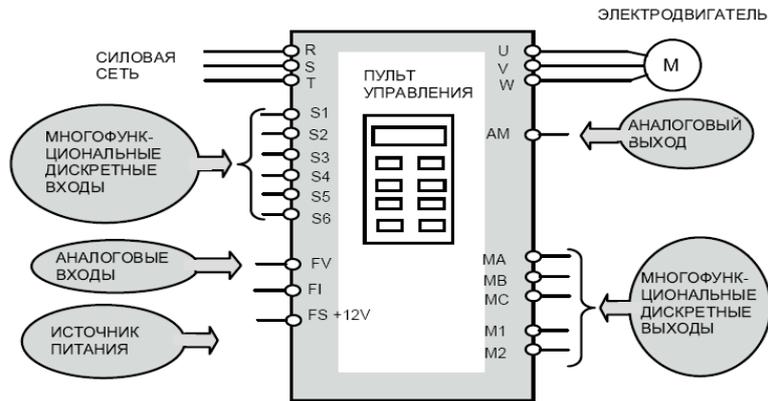


Рис. 2.17. Обобщенное представление каналов ввода/вывода общепромышленного ПЧ



Рис. 2.18. Внешний вид панелей преобразователей частоты фирмы ВЕСПЕР: а – E2-MINI; б – E2-8300

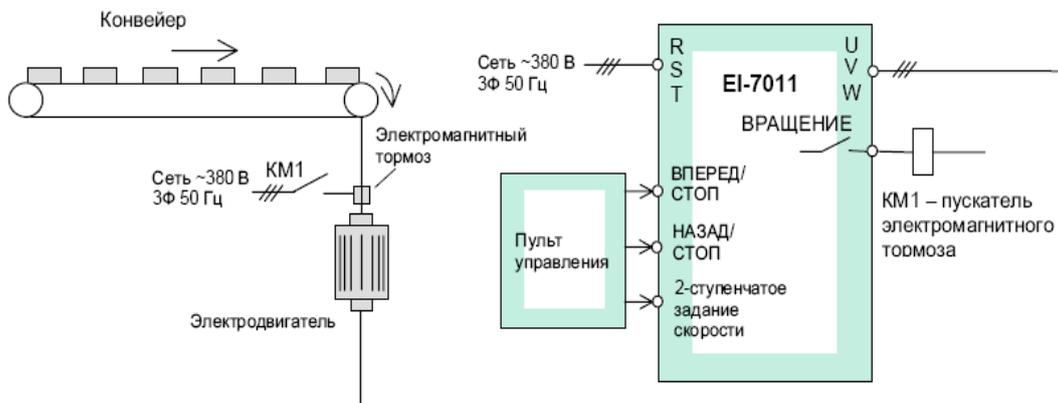


Рис. 2.19. Блок-схема управления конвейером: ПЧ Веспер EI-7011 продлевает ресурс оборудования и обеспечивает требуемую производительность

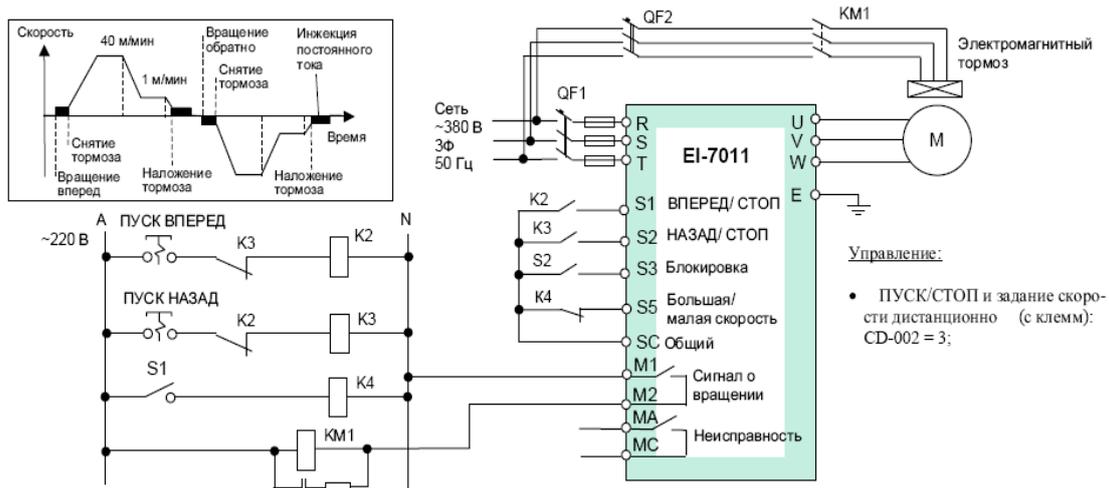


Рис. 2.20. Схема подключений ПЧ Веспер EI-7011 для управления конвейером

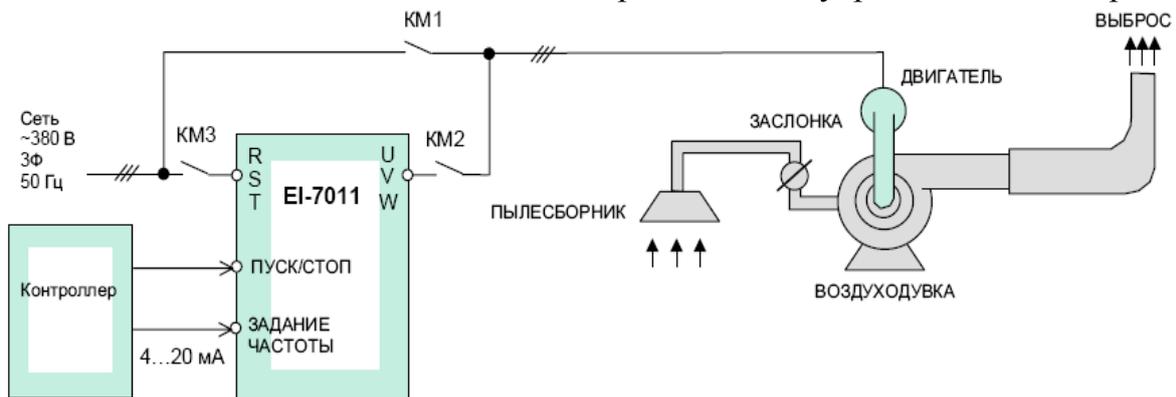


Рис. 2.21. Блок-схема применения ПЧ Веспер EI-7011 для управления пылеуловителем: преобразователь частоты сохраняет электроэнергию и улучшает КПД

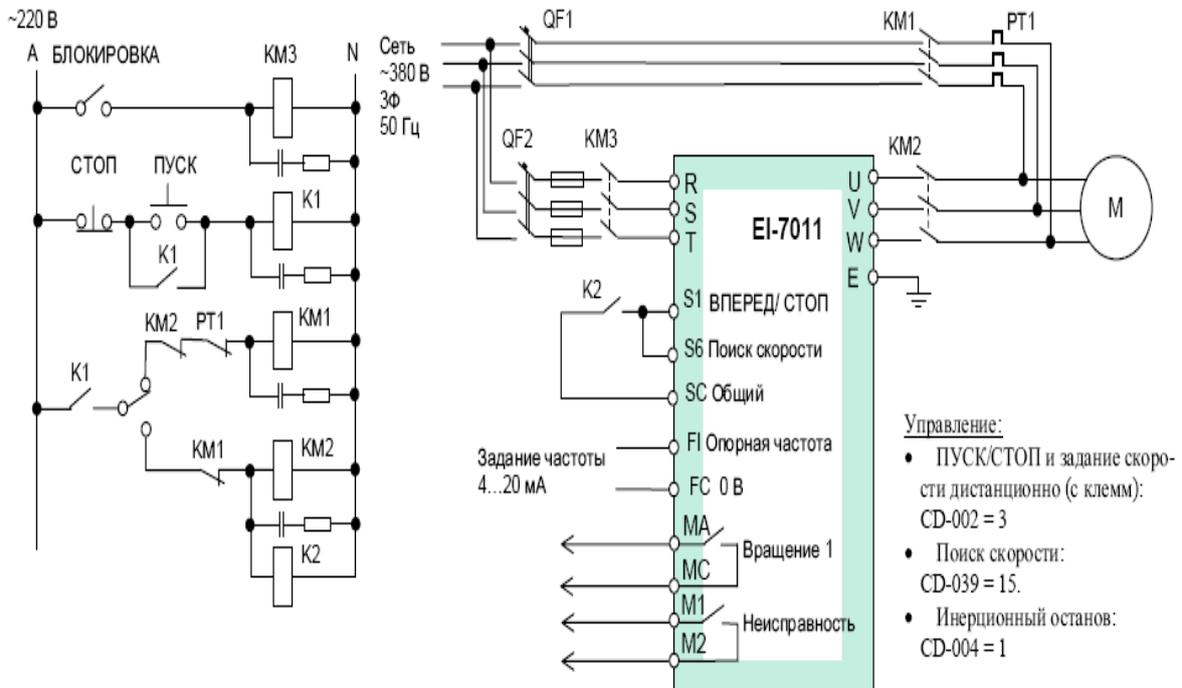


Рис. 2.22. Схема подключения ПЧ для управления пылеуловителем с резервным переключением на сеть

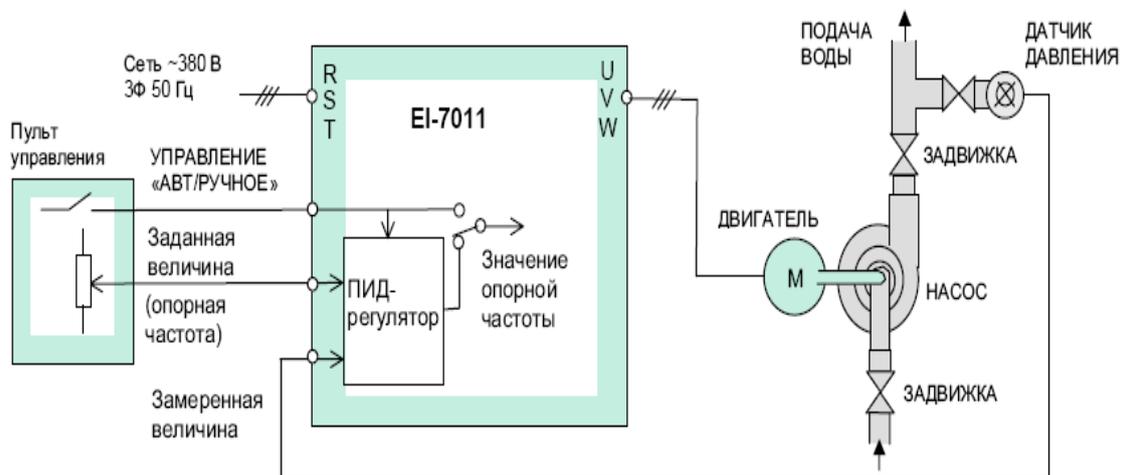


Рис. 2.23. Блок-схема применения ПЧ для управления насосом подачи воды и поддержания давления: обеспечение функций энергосбережения и поддержания заданного параметра

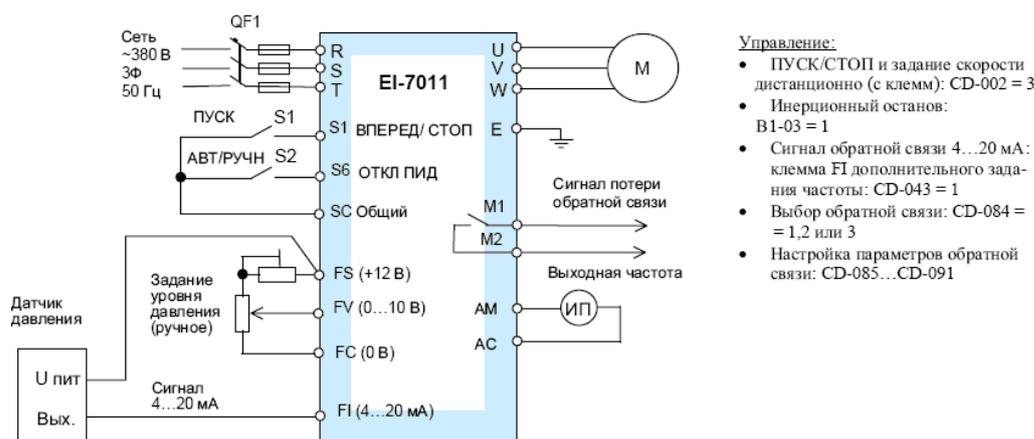


Рис. 2.24. Схема подключения ПЧ для управления насосом

2.2.2. Рекомендации применения преобразователей частоты и их настройки

Сечение проводов и длина кабеля:

- Если длина силового кабеля между преобразователем и двигателем велика (особенно при малой выходной частоте), момент вращения двигателя уменьшается из-за падения напряжения на кабеле. Необходимо использовать силовой провод достаточного сечения.

- Собственный пульт управления преобразователя при необходимости может быть вынесен для дистанционного управления на длину не более 10 м при применении удлинительного шлейфа пульта управления.

- Для дистанционного управления аналоговым сигналом расстояние между преобразователем и источником сигнала должно быть не более 100 м (сечение сигнальных проводов не должно приводить к падению напряжения и искажению сигнала задания частоты). Кабель аналогового управления должен быть проложен отдельно от силовых и дискретных цепей управления.

- Если предполагается управление от внешнего контроллера задания частоты, используйте «витую пару» в экране с заземлением, как показано на рис. 2.25.

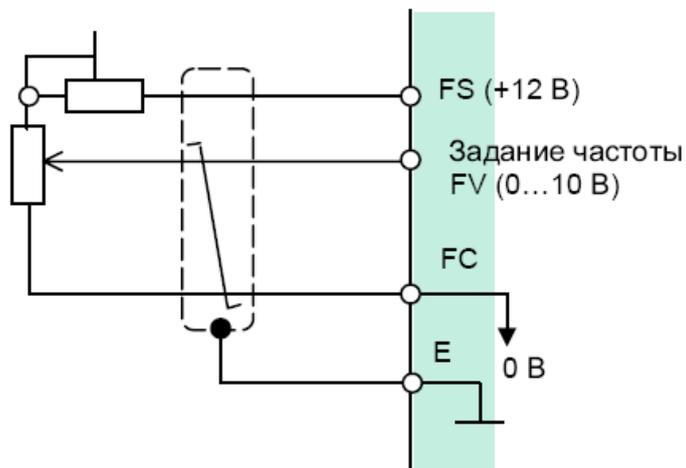


Рис. 2.25. Схема подключения аналогового сигнала управления

Применение стандартных электродвигателей

Стандартный электродвигатель, управляемый частотным преобразователем, вырабатывает немного меньшую мощность, чем при управлении напрямую от сети. Эффект ухудшения охлаждения на малых скоростях приводит к повышению его температуры и уменьшению момента вращения. Допустимые нагрузочные характеристики стандартного электродвигателя показаны на рис. 2.26. Если требуется длительный (100 %) момент на малых скоростях, необходимо использовать электродвигатель с независимым обдувом.

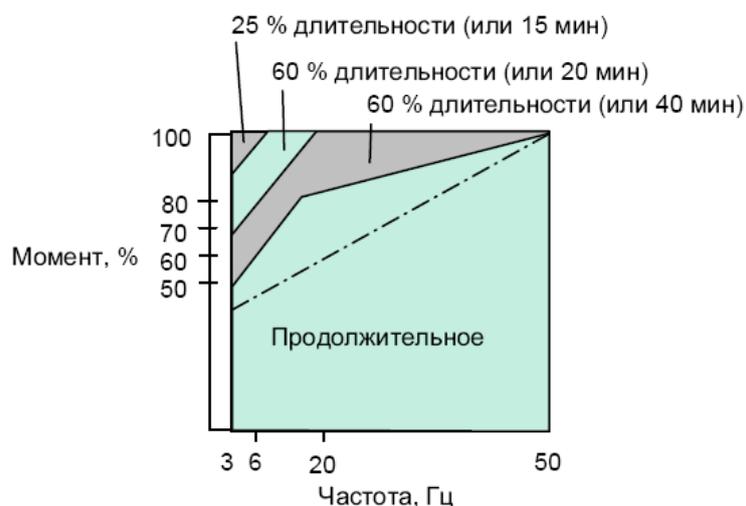


Рис. 2.26. Характеристики допустимой нагрузки для стандартного электродвигателя

Применение нестандартных двигателей

Описание некоторых нестандартных двигателей приведено в таблице 2.8

Таблица 2.8

Электродвигатель с тормозом	Применение двигателей, оснащенных тормозом с независимым источником питания. Подсоединяйте тормоз к источнику питания на первичной стороне преобразователя. Когда тормоз включен (двигатель остановлен), выход преобразователя должен быть отключен
Двигатель с изменяемым числом полюсов	Выбирайте преобразователь с увеличенным выходным током для каждой группы полюсов. Смена полюсов может быть произведена только после остановки двигателя. Если производится смена полюсов во время вращения двигателей, срабатывает защита от регенеративного перенапряжения или токов перегрузки, напряжение на выходе преобразователя отключится и двигатель инерционно остановится
Погруженные электродвигатели	Поскольку номинальный ток погруженного двигателя больше, чем у стандартного двигателя, выбирайте преобразователь большей мощности. Если расстояние между преобразователем и двигателем велико, используйте кабель достаточного сечения
Взрывозащищенные двигатели	Взрывозащищенный двигатель, применяемый с преобразователем, должен быть подобран по току и принят как взрывозащищенное оборудование. Преобразователь не является взрывозащищенным и не должен устанавливаться в месте, где присутствуют взрывоопасные газы
Электродвигатель с редуктором	Способ смазки и ограничение продолжительности вращения различаются у разных производителей. Когда применяется масляная смазка, продолжительное вращение на малой скорости может привести к выгоранию масла. Для управления электродвигателем со скоростями, большими, чем 50 Гц, необходима консультация с заводом-изготовителем
Однофазный двигатель	Однофазный двигатель непригоден для регулирования скорости при помощи частотного преобразователя. Когда выходное напряжение преобразователя прикладывается к двигателю с конденсатором, высшие гармонические составляющие могут разрушить конденсатор. Для двигателя с расщепленно-фазным и двигателя с отраженным пуском внутренний центробежный выключатель не выключится и пусковая обмотка может выгореть. Поэтому применяется только трехфазный двигатель

Работа на повышенных скоростях

Если стандартный электродвигатель используется на частотах силового напряжения свыше 50 Гц, необходимо учесть, что момент вращения двигателя пропорционально уменьшается.

Вибрации

При применении высокой частоты несущий преобразователь EI-7011 может уменьшить вибрации двигателя до уровня, сравнимого с уровнем при управлении от сети стандартного напряжения и частоты. Увеличенная вибрация может быть по следующим причинам:

- 1) реакция механической системы на резонансной частоте;
- 2) остаточный разбаланс вращающейся части.

Формулы для выбора мощности преобразователя для длительного режима работы приведены в табл. 2.9.

Таблица 2.9

Параметр	Формула расчета
Требуемая выходная мощность для нагрузки допустимого диапазона	$\frac{k \cdot P}{\eta \cdot \cos \varphi} \leq \text{Мощность преобразователя [кВА]}$
Мощность двигателя	$k \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{дв}} \cdot I_{\text{дв}} \cdot 10^{-30} \leq \text{Мощность преобразователя [кВА]}$
Ток двигателя	$k \cdot I_{\text{дв}} \leq \text{Ток преобразователя [А]}$

Формулы для расчета перегрузочной способности группового электропривода приведены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Параметр	Формула для расчета (перегрузочная способность - 150 % в течение 1 минуты)	
	Двигатель разгоняется менее 1 минуты	Двигатель разгоняется более 1 минуты
	$\frac{k \cdot P_{\text{дв}}}{\eta \cdot \cos \varphi} \{n_{\text{дв}} + n_{\text{од}}(K_{\text{п}} - 1)\} =$ $= P_{\text{пр}} \{1 + n_{\text{од}} / n_{\text{дв}}(K_{\text{п}} - 1)\} \leq$ $\leq 1,5 \cdot \text{Мощность преобразователя [кВА]}$	$\frac{k \cdot P_{\text{дв}}}{\eta \cdot \cos \varphi} \{n_{\text{дв}} + n_{\text{од}}(K_{\text{п}} - 1)\} =$ $= P_{\text{пр}} \{1 + n_{\text{од}} / n_{\text{дв}}(K_{\text{п}} - 1)\} \leq$ $\leq \text{Мощность преобразователя [кВА]}$
	$n_{\text{дв}} \cdot I_{\text{дв}} \{1 + n_{\text{од}} / n_{\text{дв}}(K_{\text{п}} - 1)\} \leq$ $\leq 1,5 \cdot \text{Ток преобразователя [А]}$	$n_{\text{дв}} \cdot I_{\text{дв}} \{1 + n_{\text{од}} / n_{\text{дв}}(K_{\text{п}} - 1)\} \leq$ $\leq \text{Ток преобразователя [А]}$

Для пуска электродвигателя применяются следующие выражения (табл.2.11):

Таблица 2.11

Параметр	Формула для расчета: $t_p < 60$ с
Общая пусковая мощность по отношению к мощности преобразователя	$\frac{k \cdot n}{973 \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \left[\frac{T_n}{9,8} + \frac{4J}{375} + \frac{N}{t_p} \right] \leq$ $\leq 1,5 \cdot \text{Мощность преобразователя [кВА]}$

Принятые обозначения:

$P_{дв}$ – мощность на валу двигателя для применения нагрузки [кВт];

η – КПД двигателя;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности двигателя;

$U_{дв}$ – номинальное напряжение двигателя [В];

$I_{дв}$ – номинальный ток двигателя [А];

k – поправочный коэффициент, определяемый фактором искажения токов из-за ШИМ ($k = 1,1$);

$P_{пр}$ – длительная мощность [кВА];

$K_{п}$ – отношение токов двигателя ($I_{пуск}/I_{ном}$);

$n_{дв}$ – количество параллельно подключенных электродвигателей;

$n_{од}$ – количество одновременно запускаемых двигателей;

J – общий вносимый момент инерции на валу двигателя [$\text{кг} \cdot \text{м}^2$];

T_n – момент нагрузки [$\text{н} \cdot \text{м}$];

t_p – время разгона двигателя [с].

Расчет мощности электродвигателя

Вращательное движение (рис.2.27):

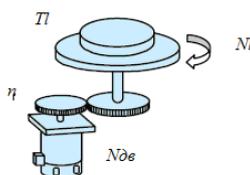


Рис. 2.27. Вращательное движение

$$P_0 = \frac{2\pi \cdot T_l \cdot N_l}{60 \cdot \eta \cdot 10^3} \text{ [кВт]} - \text{мощность вращения};$$

$$P_p = \frac{4J_l^2 \cdot N_l^2}{365 \cdot 10^3 \cdot t_p} \text{ [кВт]} - \text{требуемая мощность для разгона};$$

$$T_L = \frac{N_l}{N_{дв} \cdot \eta} \cdot T_l \text{ [Н} \cdot \text{м]} - \text{момент нагрузки на валу двигателя};$$

$$J_L = \left(\frac{N_l}{N_{дв}} \right)^2 \cdot J_l \text{ [кг} \cdot \text{м}^2] - \text{момент инерции нагрузки, приведенный}$$

к валу двигателя;

$$t_p = \frac{2\pi(J_{дв} + J_L) \cdot N_{дв}}{60(T_{дв} \cdot \alpha - T_L)} \text{ [с]} - \text{время разгона};$$

$$t_T = \frac{2\pi(J_{дв} + J_L) \cdot N_{дв}}{60(T_{дв} \cdot \beta + T_L)} \text{ [с]} - \text{время торможения}.$$

Поступательное движение (рис.2.28):

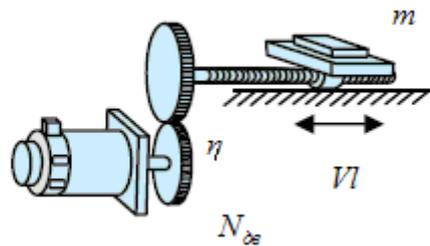


Рис. 2.28. Поступательное движение

Принятые обозначения:

N_l – скорость вращения нагрузки [об/мин];

$N_{дв}$ – скорость вращения двигателя [об/мин];

V_l – линейная скорость нагрузки [м/мин];

η – КПД электродвигателя;

μ – коэффициент трения;

m – масса нагрузки [кг];

$J_{\text{дв}}$ – момент инерции двигателя [кг · м²];
 J_l – момент инерции нагрузки [кг · м²];
 T_l – момент нагрузки [Н · м];
 $T_{\text{дв}}$ – номинальный момент электродвигателя;
 α – 0,8...1,2;
 β – 0,05...0,1;
 t_p – время разгона;
 t_T – время торможения.

2.2.3. Перечень наиболее распространенных преобразователей частоты

Delta Electronics, Inc

Серии VFD (L, S, M, F, G, E, B, V, VE), серия E – встроенный ПЛК.

ABB

Серии ACS (50, 100, 140, 160, 400, 550, 800).

Danfoss

Серии VLT (FCD / FCM 300, 2800, 5000 Flux, 6000 HVAC, 8000 AQUA, FC301/302).

Lenze

Серии (SMD, ESMD) / Vector / Servo / HVAC.

FUJI

Серии FRN (C1S, C1E, F1S, F1L, E1S, E11S, G11S) Frenic 5000, FRENIC Mini.

Control Techniques

Серии (Unidrive V3, SP, VTC / Commander SE, GP, SK, SX).

EMOTRON

Серии (CF, DFE, FDU, VFB / VFX), IP20, IP54.

Vacon

Серии (NXL, NXS, NXP, NXC, VACON 10, CX, CXR, NX Drive).

KEB

Серии COMBIVERT (F5B, F5C, F5GMS) BASIC, COMPACT, GENERAL / MULTI / SERVO.

TeCorp Electronics

Серии HC1 (A, C, H, P, R).

SIEMENS

Серии Micromaster 410, 420, 440 (430 – вентиляторная и насосная серия), 6SE.

Schneider Electric

Серии (Altivar).

LG

Серии PM, SV, LG (iG, iS, iH, iC) – RUS.

HYUNDAI

Серии N100, N300.

Mitsubishi Electric

Серии (FR-A 540, FR-E 520, FR-S 520S, FR-S540, FR-F740, FR-A740).

HIТACHI

Серии SJ100, SJ200, SJ300, L100, L200, L300P.

Веспер

Серии EI (8001, 7011, P7002, 9011, 8001, -МИНИ, 7009 M) / E2 (8300, -МИНИ).

Omron (Yaskawa)

Серии CIMR (J7, E7, V7, F7, L7) / 3G3JV, 3G3PV, 3G3MV, 3G3RV / G5C.

Toshiba

Серии VFnc1S, VFS11, VFP7, VF-AS1, VFPS1, TOSVERTV (VF-S9 VF-A7 VF-S9 MV).

GENERAL ELECTRIC

Серии AV300i.

SIEI

Серии AVy.

Rosenberg

Серии SFE.

Sew Eurodrive

Серии Movitrac 07, Movidrive MDX61B.

Rockwell Automation

Серии PowerFlex, Bulletin, низковольтные и высоковольтные.

Основные характеристики преобразователя частоты Danfoss VLT® AutomationDrive FC 300 (рис. 2.29)



Рис. 2.29. Изображение преобразователя частоты
Danfoss VLT® AutomationDrive FC 300

Номенклатура продукции

0,25...37 кВт (200...240 В);
0,37...800 кВт (380...500 В);
37 кВт – 1,2 МВт (525...690 В)

Корпуса

Привод отвечает требованиям класса защиты корпуса/шасси IP 20. Дополнительно обеспечивается класс защиты IP21/NEMA 1, IP55/NEMA 12, IP 54/NEMA12 или IP66 NEMA 4х.

Интеллектуальный логический контроллер

В стандартной комплектации VLT® AutomationDrive предусмотрена функция безопасного останова, пригодная для установок категории 3 в соответствии с требованиями стандарта EN 954-1. Эта функция предотвращает самопроизвольный запуск привода.

Техника безопасности

В стандартной комплектации VLT® AutomationDrive предусмотрена функция безопасного останова, пригодная для установок категории 3 в соответствии с требованиями стандарта EN 954-1. Эта функция предотвращает самопроизвольный запуск привода.

Панель местного управления (LCP) с «горячим» подключением

Панель местного управления можно подсоединять и отсоединять, не прерывая работы. Настройки легко переносятся с одного привода на другой с помощью панели управления или компьютера, на котором установлено соответствующее программное обеспечение.

Интеллектуальное управление теплоотводом

Охлаждение может быть организовано двумя способами, каждый из которых имеет свои преимущества. Принудительное конвекционное охлаждение: вентилятор направляет холодный воздух на ребра охлаждения алюминиевого корпуса для отвода тепла. Канал легко чистится без риска повреждения электроники. «Холодная плита»: внешнее охлаждение через заднюю панель алюминиевого корпуса. Воздуховод: воздух, подаваемый из помещения поста управления или извне, охлаждает теплоотвод без контакта с электронными элементами.

Принадлежности

В зависимости от потребностей для VLT AutomationDrive FC 302 предусмотрен широкий выбор вспомогательных устройств. Дополнительные сведения см. в инструкции по эксплуатации.

Дополнительные устройства

Дополнительные устройства для шин связи, синхронизации, пользовательских программ и т.п., поставляются готовыми к установке.

Дополнительные средства отображения

Графическая панель местного управления (LCP102).

Цифровая панель местного управления (LCP101).

Комплект для монтажа панели местного управления.

Дополнительные устройства

Плата внешнего источника питания 24 В.

Дополнительные шины Fieldbus

PROFIBUSDPV1 (MCA 101).

Profisafe-Stop (MCA 103).

DeviceNet (MCA 104).

CANOpen (MCA 105).

EtherNet IP (MCA 121).

Дополнительные устройства ввода/вывода

Модуль ввода/вывода общего назначения (МСВ 101).

Вход датчика положения (МСВ 102).

Вход резольвера (МСВ 103).

Дополнительный модуль реле (МСВ 105).

Защищенный модуль ввода/вывода ПЛК (МСВ 108).

Плата термистора РТС (МСВ 112).

Дополнительные устройства для управления перемещением

Модуль управления перемещением (МСО 305).

Модуль управления синхронизацией (МСО 350).

Модуль управления позиционированием (МСО 351).

Центрирующее наматывающее устройство (МСО 352).

Тормоз

Тормозные резисторы.

Монтажные приспособления и шасси для резисторов.

Фильтры

Фильтр гармоник (АНФ005/010МСЕ).

Синусоидальные фильтры (МСС 101).

Фильтр dU/dt (ограничения нарастания напряжения).

Прочие принадлежности

1 монтажный комплект IP21/NEMA. Разъем адаптера Profibus типа Sub-D9. Развязывающая панель для кабелей Fieldbus. Кабель USB для подключения к компьютеру

2.2.4. Пример подключения модуля МСО-305

**к преобразователю частоты VLT® AutomationDrive
фирмы Danfoss**

Модуль расширения МСО-305 подключается к шине преобразователя частоты внутри его корпуса. Пример инсталляции модуля расширения показан ниже, на рис. 2.30.

Интегрированный программируемый Motion Controller для FC301 и FC302. МСО-305 оптимизирован для задач синхронизации (электронный редуктор), позиционирования, САМ-контроллер.(рис.2.31)

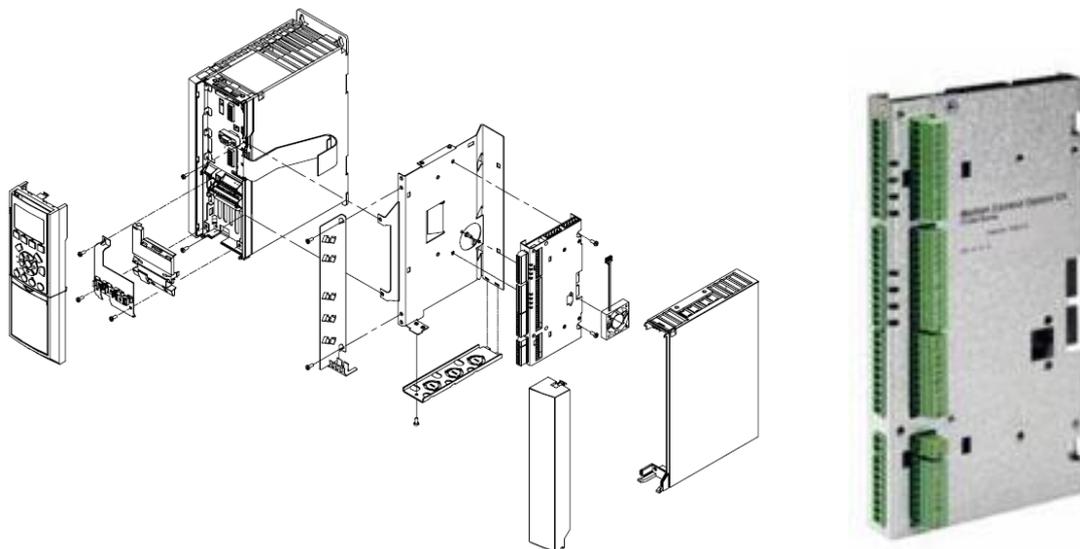


Рис. 2.30. Изображение модуля расширения MCO-305 и примера инсталляции в корпус преобразователя частоты

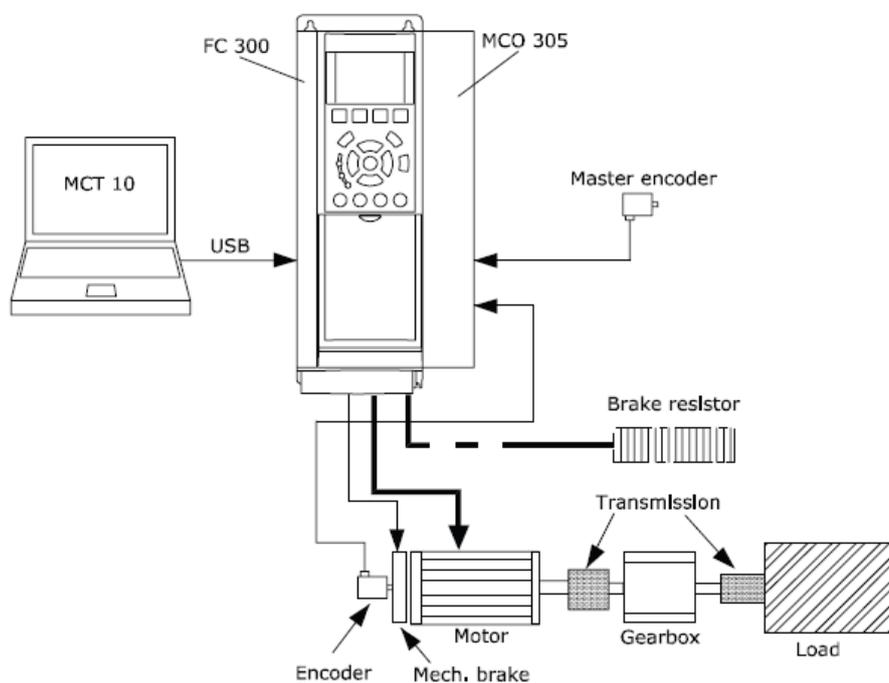


Рис. 2.31. Пример системы управления с подключенным модулем MCO-305

Разработка прикладных программ для MCO-305 и конфигурирование/ввод в эксплуатацию осуществляются с помощью программного пакета, интегрированного в VLT Motion Control Tools MCT 10. Программный пакет включает редактор с примерами программ, редактор САМ-профиля, а также функции «test-run» и «осциллографа» для опти-

мизации контроллера. МСО-305 поддерживает программирование под управлением событий, используя язык структурно-текстового программирования, разработанный специально для таких приложений.

Базовые функции модуля:

- Функция выхода в ноль (Home).
- Абсолютное и относительное позиционирование.
- Программные и аппаратные конечные выключатели.
- Синхронизация скорости, положения и по метке.
- САМ-управление (электронный кулачок).
- Функция виртуального мастера для синхронизации нескольких ведомых приводов.
 - On-line настраиваемое передаточное отношение.
 - On-line настраиваемое смещение.
 - Определение прикладных параметров, доступных через панель локального управления FC 300.
 - Доступ на Чтение/Запись всех параметров FC 300.
 - Приём и передача данных по интерфейсу полевой шины (при наличии Field-bus опции).
 - Обработка прерываний по различным событиям: дискретный вход, позиция, данные Field-bus, изменение параметра, изменение статуса и времени.
 - Вычисления, сравнения, обработка битов и логические функции.
 - Условные и безусловные переходы.
 - Инструмент графической оптимизации ПИД-регуляторов.
 - Отладчик программ.

Контур регулирования МСО-305

МСО-305 имеет ПИД (Пропорционально, Интегрально, Дифференциальный) контроллер для управления позиционированием на основе сигналов обратной связи по положению. ПИД контроллер МСО 305 управляет позиционированием во всех режимах, кроме синхронизации скорости, где управляет скоростью. FC 300 – это «усилитель» в контуре управления МСО-305, и таким образом должен быть оптимизирован к подключенному двигателю и нагрузке перед настройкой ПИД контроллера МСО 305. Преобразователь частоты может работать как в открытом, так и в замкнутом контуре внутри контура управления МСО-305 (рис.2.32, 2.33):

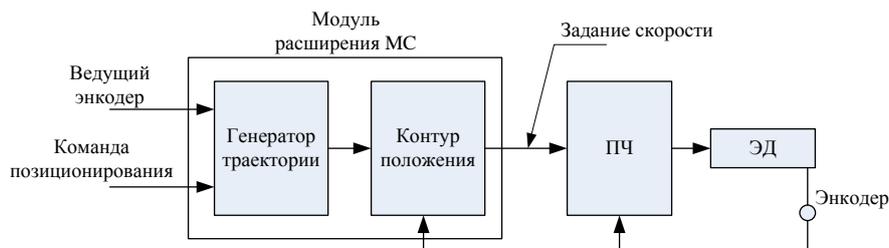


Рис. 2.32. Структура контура регулирования положения

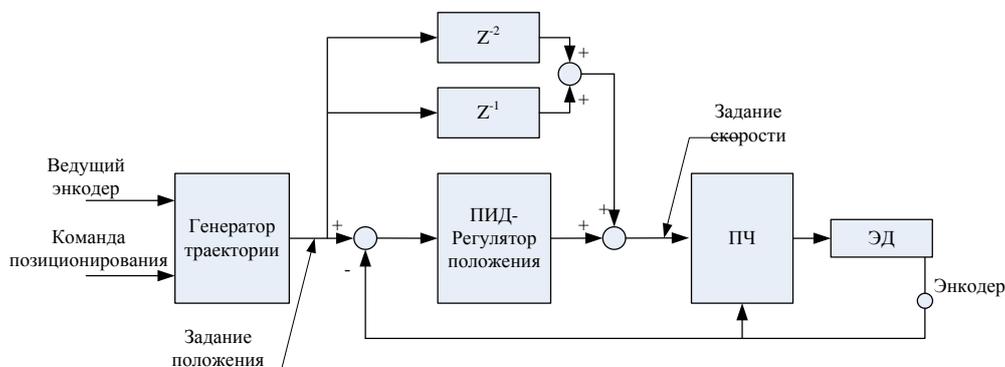


Рис. 2.33. ПИД-регулятор с блоками скоростной компенсации

Типовые примеры применения плат расширения МСО-305

Синхронизация используется в приложениях, где 2 и более валов должны следовать друг за другом по скорости или по положению (следящий привод). Это может быть простая система ведущий-ведомый (master-slave), где ведомый привод следует за скоростью или положением ведущего привода, или это может быть мультиосевая система, где несколько ведомых приводов следуют за скоростью или положением общего привода-мастера. Электронная синхронизация намного гибче, чем механический вал, ремень или цепь, т.к. коэффициент передачи (передаточное отношение) и смещение могут настраиваться прямо во время работы. Скорость и положение ведомого привода управляются на основании сигнала энкодера ведущего привода.

Во время синхронизации ведомый привод всё время ограничивается максимальной скоростью и ускорением/торможением. В дополнение ограничивается величина отклонения скорости ведомого от скорости ведущего (рис. 2.34).

МСО-305 обеспечивает три основных типа синхронизации:

- 1) синхронизацию скорости;
- 2) синхронизацию положения;
- 3) синхронизацию по метке.

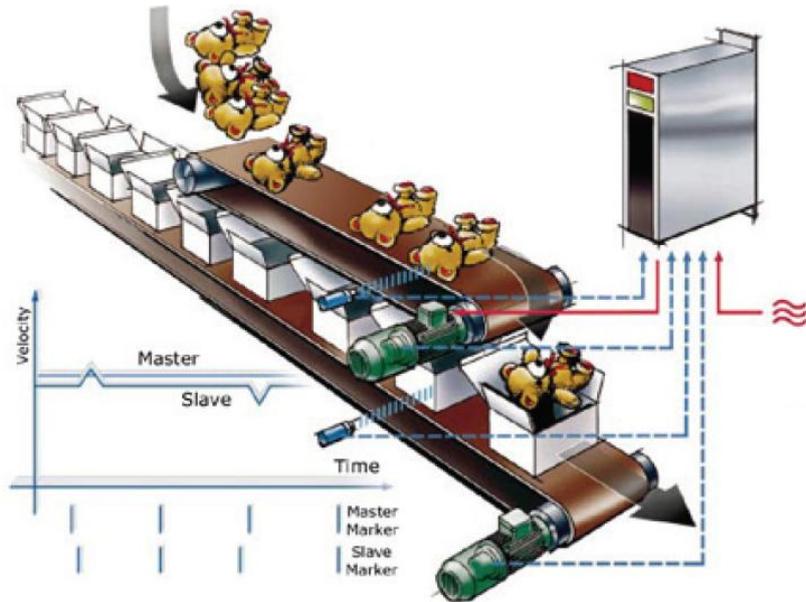


Рис. 2.34. Пример управления технологическим процессом на базе функции синхронизации

Обычно термин позиционирование для привода означает перемещение вала в заданное положение. Для того чтобы получить точное позиционирование, необходимо использовать замкнутый по положению контур регулирования.

Процедура позиционирования с контроллером замкнутого контура требует следующего: задания скорости, ускорения, торможения и заданного положения; профиль скорости рассчитывается на основании актуального значения положения вала (сигнал обратной связи от энкодера) и вышеупомянутых параметров; вал вращается согласно рассчитанному профилю скорости до того, как будет достигнуто заданное положение.

Типичные приложения, где требуется точное позиционирование:

- паллетизёры, например для укладки коробок на паллету;
- координатные столы, например наполнение материала в поддоны на вращающемся столе (рис. 2.35);
- конвейеры, например, где материал режется по длине.
- подъёмники, например, остановки лифта на различных уровнях.

МСО-305 обеспечивает три основных типа позиционирования:

- 1) абсолютное;
- 2) относительное;
- 3) по метке (конечному выключателю).

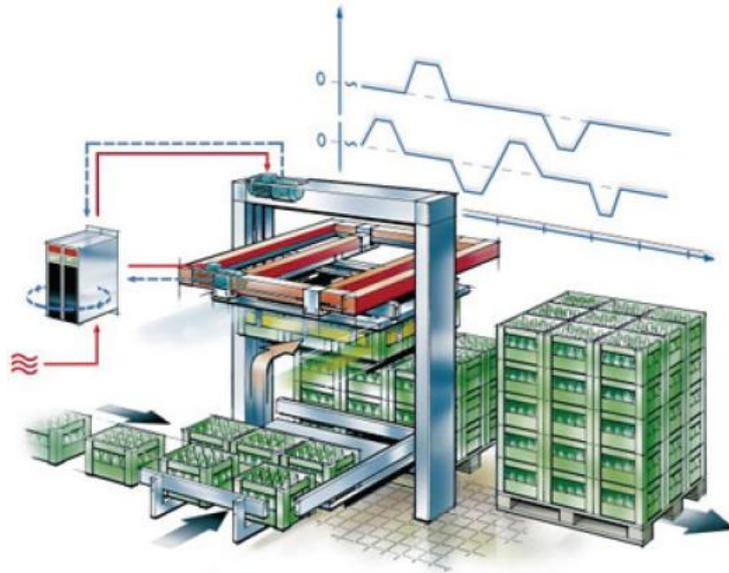


Рис. 2.35. Пример управления технологическим процессом на базе функции позиционирования

Глава 3 ДАТЧИКИ

3.1. Общие сведения о датчиках

В системах автоматики датчик предназначен для преобразования контролируемой или регулируемой величины (параметра контролируемого объекта) в выходной сигнал, более удобный для дальнейшего движения информации, поэтому датчик нередко называют преобразователем, хотя этот термин является слишком общим, т.к. любой элемент автоматики и телемеханики, имея свой вход и выход, является в той или иной мере преобразователем.

В простейшем случае датчик осуществляет только одно преобразование $Y = T(X)$, например: силы в перемещение (в пружине) или температуры в электродвижущую силу (в термоэлементе) и т.п. Такой вид датчиков называют «датчики с непосредственным преобразованием». Однако в ряде случаев не удастся непосредственно оказать воздействие входной величины X на необходимую выходную величину Y (если такая связь неудобна или она не дает желаемых качеств). В этом случае осуществляют последовательные преобразования: входной величиной X воздействуют на промежуточную Z , а величиной Z – на необходимую выходную величину Y :

$$Z = f_1(X); \quad Y = f_2(Z).$$

В результате получается функция, связывающая X с Y , –

$$Y = f_2[f_1(X)] = F(X).$$

Число таких последовательных преобразований может быть и больше двух, и в общем случае функциональная связь Y с X может проходить через ряд промежуточных величин:

$$Y = f_n\{\dots[f_2(f_1(X))]\} = F(X).$$

Датчики, имеющие такие зависимости, называются датчиками с последовательным преобразованием. Входная часть таких датчиков называется воспринимающим органом, выходная – исполнительным органом. Все остальные части называются промежуточными органами. В датчике с двумя преобразованиями промежуточные органы отсутствуют, в нем имеются только воспринимающий и исполнительный органы. Нередко один и тот же конструктивный элемент выполняет функции нескольких органов. Например, упругая мембрана выполняет функцию воспринимающего органа (преобразование давления в силу) и функцию исполнительного органа (преобразование силы в перемещение).

Классификация датчиков. Исключительное многообразие датчиков, применяемых в современной автоматике, вызывает необходимость их классификации. В настоящее время известны следующие типы датчиков, которые наиболее целесообразно классифицировать по входной величине, практически соответствующей принципу действия (табл. 3.1):

Таблица 3.1

Наименование датчика	Входная величина
Механический	перемещение твердого тела
Электрический	электрическая величина
Гидравлический	перемещение жидкости
Пневматический	перемещение газа
Термический	тепловая
Оптический	световая величина
Акустический	звуковая величина
Радиоволновой	радиоволны
Ядерный	ядерные излучения

Ознакомление со всеми этими датчиками возможно только в специальных работах, посвященных датчикам. В данном пособии рассматриваются наиболее распространенные датчики, у которых хотя бы одна из величин (входная или выходная) – электрическая.

Электрические датчики, в зависимости от принципа производимого ими преобразования, делятся на два типа – модуляторы и генераторы.

У модуляторов энергия входа воздействует на вспомогательную электрическую цепь, изменяя ее параметры и модулируя значение и характер изменения тока или напряжения от постороннего источника энергии. Благодаря этому одновременно усиливается сигнал, поступивший на вход датчика.

Наличие Постороннего источника энергии является обязательным условием работы датчиков-модуляторов (рис. 3.1). Модуляция осуществляется с помощью изменения одного из трех параметров – омического сопротивления, индуктивности и емкости. В соответствии с этим различают группы омических, индуктивных и емкостных датчиков.

Каждая из этих групп может делиться на подгруппы. Так, наиболее обширная группа омических датчиков может быть разделена на подгруппы: тензорезисторы, потенциометры, терморезисторы, фоторезисторы. Ко второй подгруппе относятся варианты индуктивных датчиков, магнитоупругие и трансформаторные. Третья подгруппа объединяет различного типа емкостные датчики.

Второй тип – датчики-генераторы, которые являются просто преобразователями (рис. 3.1). Они основаны на возникновении электродвижущей силы под влиянием различных процессов, связанных с контролируемой величиной. Возникновение такой электродвижущей силы может происходить, например, вследствие электромагнитной индукции, термоэлектричества, пьезоэлектричества, фотоэлектричества и других явлений, вызывающих разделение электрических зарядов. Соответственно этим явлениям генераторные датчики подразделяются на индукционные, термоэлектрические, пьезоэлектрические и фотоэлектрические.

Возможны еще группы электротехнических, электростатических датчиков, датчиков Холла и др. В результате получается общая схема классификации основных датчиков по выходной электрической величине, представленная на рис. 3.1.

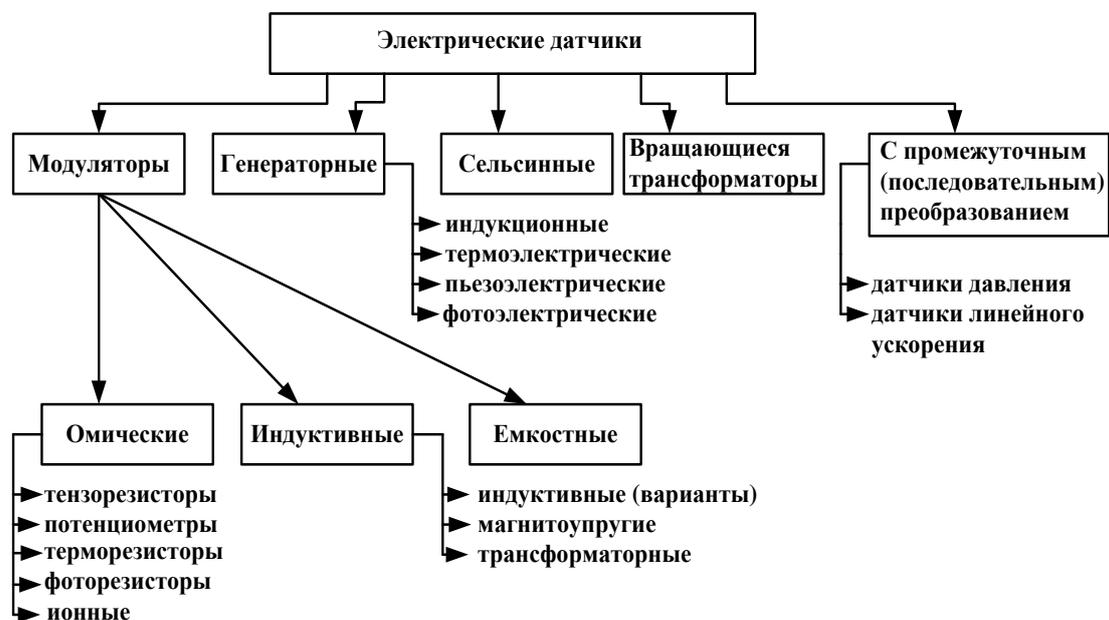


Рис. 3.1. Схема классификации основных электрических датчиков

В настоящее время в автоматике и в телемеханике наибольшее распространение получают электрические датчики. С помощью электрических датчиков получают наиболее простые, удобные и надежные формы связи задающих и исполнительных систем автоматического регулирования. Электрические датчики используются практически во всех отраслях современной техники. Большинство электрических датчиков обладает универсальностью, и их можно применять для решения различных технических задач.

3.2. Омические датчики

К датчикам с изменяющимся омическим сопротивлением относятся тензометрические датчики, которые применяются для измерения упругих деформаций (измерения растяжения или сжатия тел), а также для измерения крутящих и изгибающих моментов, возникающих на поверхности различных механических деталей при их механической нагрузке. Значение измеренной деформации позволяет с помощью известных формул теории упругости и упругих констант (постоянных значений) материала деталей вычислять механические напряжения в них и судить о целесообразности их конструкции. Тензодатчики (рис. 3.2), используемые в автоматическом контроле, дают возможность следить за деформациями и напряжениями при статических и динамических нагрузках.

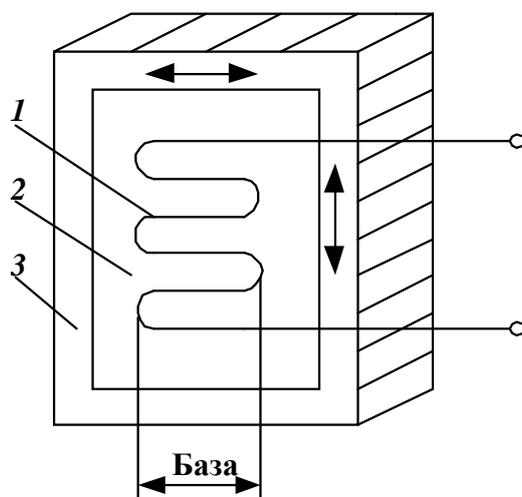


Рис. 3.2. Проволочный тензодатчик

Основным элементом проволочного тензодатчика является константовая проволока диаметром 0,015...0,05 мм, сложенная в виде петлеобразной решетки (спирали) между двумя склеенными полосками тонкой бумаги или пленки (рис. 3.3). Датчик 1 через специальную бумагу 2 приклеивается к детали 3, деформацию которой нужно измерить. При действии деформации, например при растяжении, как показано на рис. 3.3 сплошной стрелкой, вместе с деталью будет растягиваться и проволока. При этом ее длина l увеличится, а сечение S уменьшится. За счет этого сопротивление проволоки $R = \rho \cdot l/S$ увеличивается. Это сопротивление является выходной величиной датчика.

Если деформация будет действовать, как показано на рис. 3.3 пунктирной стрелкой, то проволока на изгибах еще больше будет изгибаться.

При этом ни длина, ни толщина проволоки практически не изменяются. Следовательно, не будет изменяться сопротивление датчика, деформацию такого направления датчик не измеряет.

Относительное изменение сопротивления тензодатчика

$$\Delta R / R = K \cdot \Delta l / l,$$

где K – коэффициент относительной чувствительности (в пределах упругой деформации проволоки величина постоянная); l – начальная длина деформируемого участка проволоки.

Для тензодатчиков, выпускаемых промышленностью, используется константановая (или фехралевая) проволока. Тензочувствительность таких датчиков может иметь значения от 1,7 до 2,9, сопротивление составляет 50...2000 Ом, база – 5...30 мм, номинальный рабочий ток при наклейке на металлические детали – 30 мА, допустимые относительные деформации – не более 0,3 % (при большей деформации проволока оборвется), максимальная рабочая температура составляет 500 °С (для датчиков с пленочной основой). Достоинство проволочных тензодатчиков – простота конструкции, практически безынерционность: недостаток – малая чувствительность (при работе сопротивление тензодатчика изменяется не более чем на 0,3 %). С целью исключения зависимости тензодатчика от температуры применяют мостовые схемы с двумя тензодатчиками в смежных плечах моста, из которых один не подвергается деформации, но находится в тех же температурных условиях. Это достигается перпендикулярным расположением обоих датчиков. Тогда температурные изменения сопротивления уравниваются и баланс схемы сохраняется (рис. 3.3).

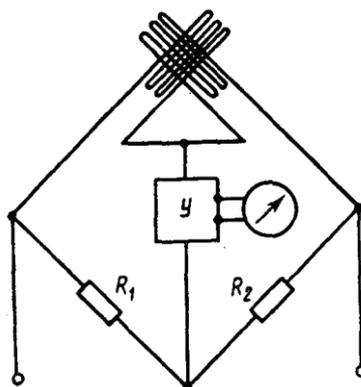


Рис. 3.3. Мостовая схема включения тензодатчиков
(У – усилитель)

Измерительный, или регистрационный, прибор обычно включается через усилитель. Погрешность измерений с применением проволочных тензодатчиков находится в пределах $1 \pm 0,5 \%$.

Разработаны также полупроводниковые тензодатчики, у которых чувствительность в 50–60 раз выше, чем у проволочных. Их недостатки – малая механическая прочность, влияние освещенности, разброс параметров у различных образцов.

3.3. Потенциометрические датчики

Применяются для измерения угловых или линейных перемещений и преобразования этой величины в изменение сопротивления. Конструктивно датчики такого типа представляют собой каркас *1* прямоугольной или кольцевой формы, на который намотана в один ряд тонкая проволока (рис. 3.5, *а*). По ниткам проволоки *4* скользит щетка *3*, называют термисторы применяют в диапазоне температур от -100 до 120 °С. В сравнении с металлическими полупроводниковые термисторы обладают большей чувствительностью и меньшей инерционностью. У них высокое внутреннее сопротивление, что позволяет не учитывать сопротивление соединительных проводов. Недостатками полупроводниковых термисторов являются узкий диапазон температур, нелинейность статической характеристики и разброс параметров между отдельными экземплярами. Термисторы нашли широкое применение в измерительной технике.

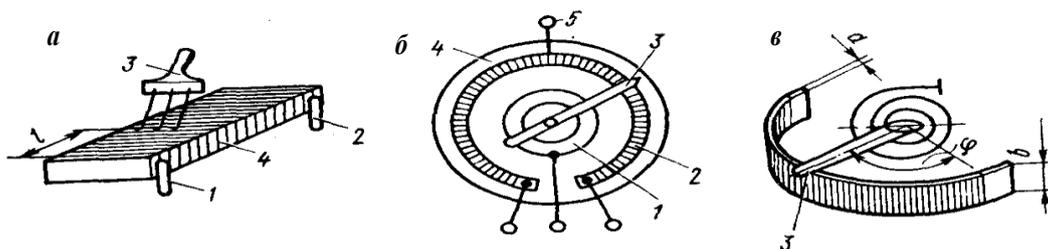


Рис. 3.4. Принципиальная конструкция потенциометрического датчика:
а – прямоугольного; *б* – кольцевого; *в* – секторного

Термоанемометр – прибор для измерения скорости газа – представляет собой термосопротивление, изготовленное из платиновой нити, укрепленной между двумя токопроводящими электродами, к которым (рис. 3.5) подводится постоянный ток. Нагрев нити током будет зависеть от условий ее охлаждения, а охлаждение, в свою очередь, будет за-

висеть от скорости движения окружающего нить газа. Статическая характеристика $R = f(v)$ криволинейна и снимается экспериментально.

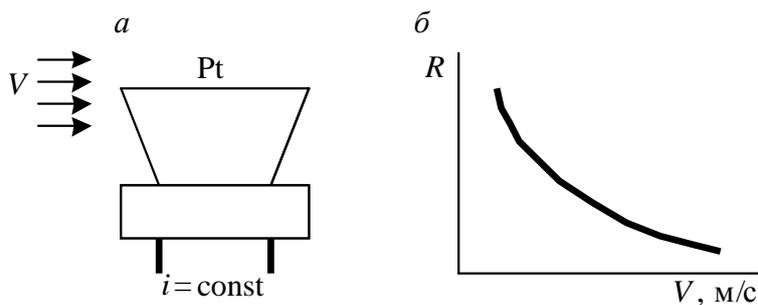


Рис. 3.5. Термоанемометр:
а – его схема; б – график работы

3.4. Фоторезисторные датчики

Фоторезисторные датчики нашли широкое применение в системах автоматики для контроля с любым видом передаваемой информации: сигнализации, измерения и регистрации.

Фотосопротивления – это полупроводники, у которых число свободных электронов и электропроводность увеличиваются при освещении. В настоящее время для фотосопротивлений применяется сернистый свинец (PbS), сернистый висмут ($Bi_2 S_2$) и сернистый кадмий (CdS). Конструкция фотосопротивлений весьма проста. Тонкий слой полупроводникового материала наносится на прозрачную пластинку, к которой прикрепляются электроды, осуществляющие контакт с полупроводниковым слоем. При подаче к электродам электрического напряжения через полупроводник пойдет ток, сила которого зависит от освещенности светочувствительной поверхности. Зависимость тока от освещенности называется световой характеристикой фотосопротивления.

Ионные датчики представляют разнообразную подгруппу датчиков, у которых входная величина функционально связана с током ионной проводимости, а следовательно и с омическим сопротивлением, которое обусловлено наличием ионов. С током ионной проводимости приходится преимущественно встречаться в ЖИДКИХ и газообразных средах.

Примером электролитического датчика является концентратомер, основанный на зависимости сопротивления между двумя электродами от концентрации раствора (рис. 3.6). С увеличением концентрации число ионов увеличивается, что и вызывает увеличение проводимости.

На принципе действия ионных датчиков разработаны и применяются устройства с ядерными излучениями для измерения толщины,

плотности и массы материалов, толщины покрытий, уровней самых различных материалов, вплоть до расплавленных металлов, расхода жидкостей и газов, газового анализа и др.

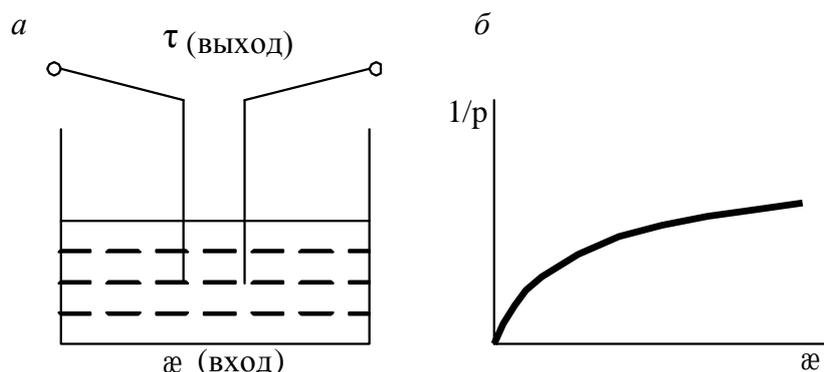


Рис. 3.6. Концентратор:
а – его схема; б – график работы

3.5. Индуктивные датчики

Индуктивные датчики нашли широкое применение в системах автоматизации для измерения линейного или углового перемещения. Принцип действия их основан на изменении индуктивности катушки с магнитопроводом при перемещении якоря. Простой принцип действия позволил создать целый ряд конструкций датчика (рис. 3.7).

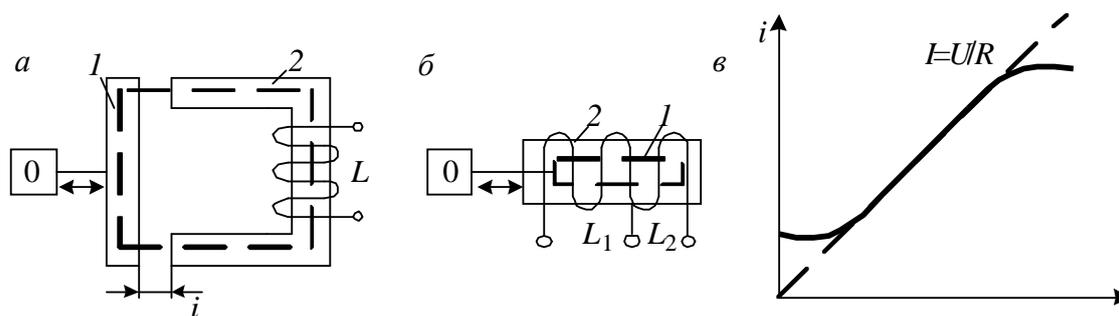


Рис. 3.7. Схемы индуктивных датчиков

Индуктивный датчик с подвижным якорем (рис. 3.7, а) представляет собой катушку 2 с ферромагнитным сердечником и с подвижным якорем 1. При перемещении якоря 1 датчика воздушный зазор изменяется, а следовательно, изменяется и индуктивность катушки 2. Ток в катушке датчика

$$I = U / Z = U \sqrt{R^2 + x_L^2},$$

где U – напряжение питания; Z – полное сопротивление катушки; R – активное сопротивление катушки; $X_L = 2\pi fL$ – индуктивное сопротивление катушки; f – частота напряжения питания; L – индуктивность катушки, зависящая от воздушного зазора.

Как видно при постоянных U , R и f ток катушки зависит только от ее индуктивности, а следовательно, от воздушного зазора. Таким образом, ток в катушке датчика пропорционален воздушному зазору, т.е.

$$I = KS,$$

где K – коэффициент пропорциональности (или чувствительности) датчика.

Реальная характеристика индуктивного датчика отличается от идеальной (показана пунктиром на рис. 3.7, в) наличием некоторой нелинейности.

Индуктивный датчик с подвижным сердечником (рис. 3.7, б) представляет собой катушку с подвижным ферромагнитным сердечником I . От средней точки обмотки сделан вывод, который позволяет создать измерительную схему. Когда сердечник находится в центре катушки, то в силу симметрии $L_1 = L_2$. При перемещении сердечника, например вправо, индуктивность правой половины катушки L_2 увеличивается, а левой L_1 – уменьшается. По изменению этих индуктивностей можно измерить значение перемещения сердечника. Эти датчики применяют для измерения значительных перемещений – до 50 мм. Статическая характеристика – линейная.

3.6. Магнитоупругие датчики

Магнитоупругие датчики относятся к подгруппе индуктивных датчиков, т.к. принцип действия их основан на свойстве ферромагнитных материалов изменять магнитную проницаемость при упругих деформациях, вызываемых механической нагрузкой. Индуктивность же катушки прямо пропорциональна магнитной проницаемости магнитопровода катушки. Таким образом, получается цепь последовательных преобразований: механическая сила – механическая напряженность – магнитная проницаемость – индуктивность. Магнитоупругие датчики применяются для измерения больших усилий.

3.7. Трансформаторные датчики

Трансформаторные датчики имеют на своем выходе взаимоиндуктивность, и поэтому их также можно отнести к подгруппе индуктив-

ных датчиков. Они отличаются от индуктивных датчиков тем, что используют на выходе явление электромагнитной индукции.

Однако это явление носит вспомогательный характер и используется для модулирования изменений напряжений на выходе. Наиболее распространенным типом трансформаторного датчика, получившим широкое применение в телемеханике для передачи на расстояние показаний различных приборов, является датчик с поворотной катушкой, называемой также индукционным преобразователем (рис. 3.8). Катушка датчика изготовлена в виде рамки, пронизываемой переменным магнитным потоком, который создается обмоткой возбуждения, подключенной к источнику стабилизированного напряжения стандартной частоты. При повороте катушки меняется значение пронизывающего ее магнитного потока, а следовательно и индуцированной ЭДС. С помощью полюсных наконечников можно получить прямолинейную статическую характеристику при повороте рамки на 70° от нейтрального положения. Соединяя механической связью ось рамки с осью стрелки показывающего прибора, можно преобразовать показания прибора в электрическое напряжение.

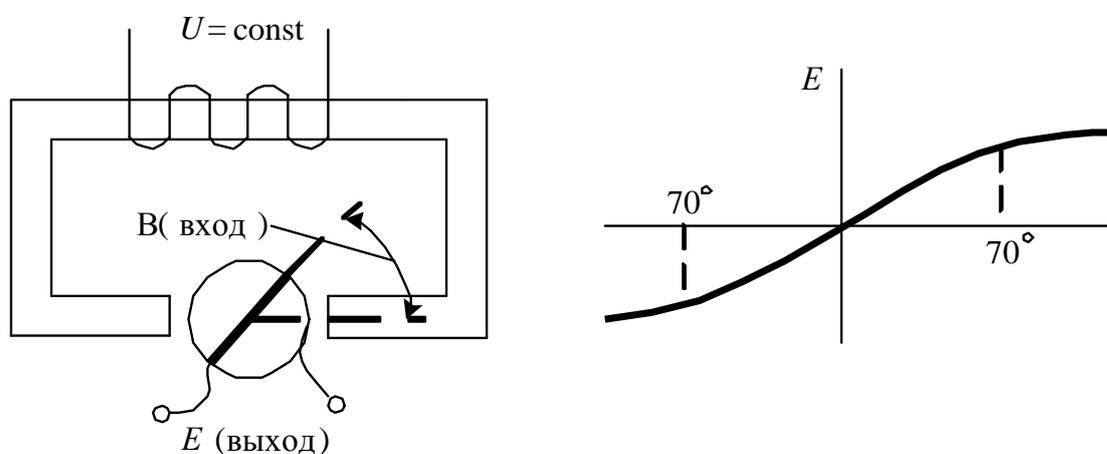


Рис. 3.8. Трансформаторный датчик углового перемещения

Достоинством всей подгруппы индуктивных датчиков являются: отсутствие скользящих контактов, высокая чувствительность и сравнительная простота конструкции, а недостатками – возможность работы только на переменном токе, трудность получения нулевого значения напряжения на выходе датчика, необходимость предохранения от помех. Динамические свойства датчиков зависят от инерционности подвижных частей.

3.8. Емкостные датчики

Емкостные датчики. Емкостные датчики предназначены для преобразования измеряемой неэлектрической величины в изменение емкости. Датчик представляет собой плоский конденсатор с изменяемой емкостью.

Емкость плоского конденсатора

$$C = \varepsilon S / d ,$$

где ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды между пластинами; S – площадь пластин; d – расстояние между пластинами.

Изменяя ε , d и S , можно получить три типа емкостных датчиков.

Емкостный датчик с переменным расстоянием между пластинами содержит две неподвижные пластины 1 и 2 и подвижную пластину 3, которая механически связана с измеряемым объектом (рис. 3.9, а). Когда $d_1 = d_2$, то $C_1 = C_2$.

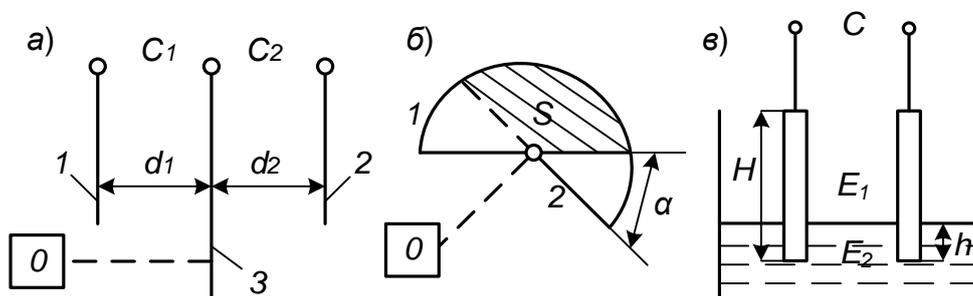


Рис. 3.9. Виды емкостных датчиков

При перемещении подвижной пластины 3 влево d_1 уменьшается, а d_2 – увеличивается. Из-за этого емкость между пластинами 1 и 3 увеличивается, а емкость между пластинами 2 и 3 уменьшается. По изменению этих емкостей можно измерить линейное перемещение объекта (практически до 0,1 мм). Статической характеристикой такого датчика является гипербола, что не очень удобно для измерения перемещения. Применяя такой тип датчика, следует учитывать не емкость, а реактивное емкостное сопротивление

$$X_c = V(\omega C) = d(\omega \varepsilon C) ,$$

которое прямо пропорционально расстоянию между пластинами, т.е. перемещению, и для него статическая характеристика будет прямой (рис. 3.9).

Емкостный датчик с поворотными пластинами (рис. 3.9, б) представляет собой воздушный конденсатор, у которого одна группа пластин 1 неподвижна (обычно через одну пластину), а другая может поворачиваться на некоторый угол α . При $\alpha = 0$ площадь перекрытия пластин 3 (заштрихована) наибольшая, поэтому емкость C между подвижными и неподвижными пластинами наибольшая. При повороте подвижных пластин на угол α площадь перекрытия и емкость датчика уменьшаются. Такие датчики применяются для измерения углов поворота от 0 до 180° . Емкостный датчик с переменной диэлектрической проницаемостью представляет собой конденсатор с переменным диэлектриком. При разных величинах диэлектрической проницаемости воздуха ε_1 и перемещаемого диэлектрика ε_2 образуются два параллельно соединенных конденсатора, общая емкость которых

$$C = C_1 + C_2 = \varepsilon_2 Rb / d + \varepsilon_1 b(H - R) / d = \varepsilon_1 bH / d + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) Rb / d ,$$

где b – ширина пластин.

Отсюда видно, что при перемещении диэлектрика, т.е. при изменении уровня жидкости, изменяются перемещение h и емкость датчика C . По изменению емкости C определяют перемещение h . Такие датчики применяются для измерения уровня жидкости.

На принципе изменения диэлектрической проницаемости строятся также датчики для измерения влажности материалов, что позволяет автоматизировать это измерение, занимающее много времени при лабораторном его выполнении с помощью сушильных шкафов. Принцип действия датчика основан на влажности измеряемого материала, влияющей на диэлектрическую проницаемость.

Достоинства емкостных датчиков: высокая чувствительность, простота, малая инерционность. Недостатки: сильное влияние возможных побочных емкостей и посторонних электрических полей (необходима экранировка), значительное влияние температуры (изменяются размеры пластин) и влажности (изменяется состав воздуха) окружающей среды.

3.9. Индукционные датчики.

К группе генераторных датчиков можно отнести преобразователи различных видов энергии в электрическую. Наибольшее применение в качестве датчиков находят индукционные, термоэлектрические и пьезоэлектрические преобразователи.

Принцип действия индукционных датчиков основан на законе электромагнитной индукции, дающем возможность непосредственного преобразования входной измеряемой величины в ЭДС без источника

дополнительной энергии. К этим датчикам относятся тахогенераторы постоянного и переменного тока, представляющие собой небольшие электромашинные генераторы, у которых выходное напряжение пропорционально угловой скорости вращения вала генератора. Тахогенераторы используются как датчики угловой скорости.

Тахогенераторы постоянного тока бывают двух типов: с возбуждением от постоянных магнитов и с электромагнитным возбуждением от независимого источника постоянного тока. Так как индуктированная электродвижущая сила пропорциональна не только скорости вращения, но и магнитному потоку, то основным требованием к тахогенераторам является постоянство магнитного потока:

$$E = BLv = \frac{\Phi}{S} L \pi D n / 60 = K \cdot \Phi \cdot n .$$

Тахогенераторы переменного тока также бывают двух типов: синхронные и асинхронные.

Синхронные тахогенераторы имеют простую конструкцию и состоят из статора (наружной обмотки) и ротора, выполненного в виде постоянного магнита с несколькими полюсами (рис. 3.10). При вращении ротора в статоре индуктируется ЭДС и значение частоты, которой определяются известным и формулами:

$$E = 4,44 R \omega f \Phi = Kn, \quad f = (P / 60)n .$$

Следовательно, с изменением скорости вращения вместе с ЭДС изменяется и частота. Это создает неудобство при использовании такого датчика в автоматических устройствах с индуктивностью и емкостью, т.к. при изменении скорости вращения будут изменяться параметры (индуктивное и емкостное сопротивления) нагрузки и самого тахогенератора, благодаря чему линейность статической характеристики нарушается. Это явление накладывает определенные ограничения в применении синхронных тахогенераторов.

Их применяют лишь в качестве индикаторов для непосредственного измерения скорости вращения.

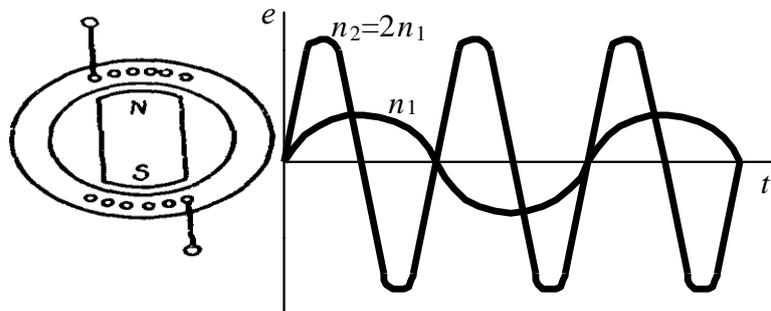


Рис. 3.10. Синхронный тахогенератор:
a – схема; *б* – график электродвижущей силы

Асинхронный тахогенератор нашел широкое применение в автоматических схемах управления, т.к. его частота не зависит от скорости вращения ротора, что создает линейность статической характеристики.

Конструктивно-асинхронный тахогенератор представляет собой асинхронный двухфазный двигатель с полым ротором. Две обмотки статора сдвинуты на 90° , и к одной из них подводится постоянное по амплитуде и частоте напряжение возбуждения, создающее магнитный поток Φ_1 (рис. 3.11). Этот поток никакого влияния на вторую обмотку при неподвижном роторе не оказывает, т.к. перпендикулярен ее магнитной оси, поэтому при неподвижном роторе вторая обмотка никакого напряжения создавать не будет. Но если ротор начнет вращаться, то его стенки будут пересекать поток Φ_1 и в них появятся токи, создающие магнитный поток Φ_2 , направленный по магнитной оси второй катушки.

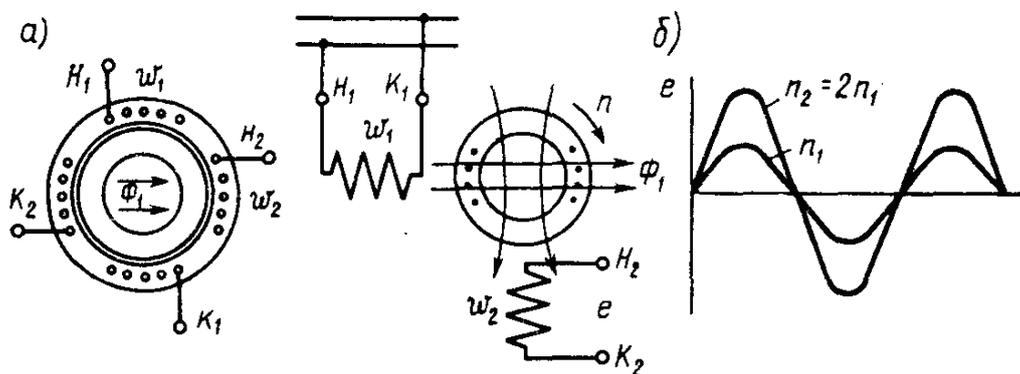


Рис. 3.11. Асинхронный тахогенератор:
a – схема; *б* – график электродвижущей схемы

Так как поток Φ_1 изменяется по синусоиде, то и поток Φ_2 будет тоже синусоидальным и будет наводить вследствие этого во второй обмотке индуцированную ЭДС

$$E = 4,44K_{\omega_1} f \omega_2 \Phi_2,$$

где f – частота, определяемая только частотой напряжения возбуждения; K – коэффициент пропорциональности.

От скорости вращения зависит только поток Φ_2 , создаваемый током в роторе, который зависит от потока Φ_1 и частоты вращения n :

$$\Phi_2 = K_1 I_{\text{рот}} = K_2 \Phi_1 n.$$

Так как поток Φ_1 прямо пропорционален напряжению возбуждения, поддерживаемому постоянным током, то

$$\Phi_2 = K_3 U_n = K_4 n; \quad E_2 = Kn,$$

т.е. индуцированная во второй обмотке электродвижущая сила прямо пропорциональна скорости вращения ротора.

3.10. Термоэлектрические датчики

Термоэлектрические датчики предназначены для измерения температуры. Они состоят из двух термоэлектродов 1 и 2, изготовляющихся из разнородных проводников (рис. 3.12). Одни концы этих проводников сварены (спаяны), а два других служат выходом датчика, откуда снимается выходное напряжение. Точка спая термоэлектродов помещается в область контролируемой температуры. Если температура свободных «холодных» концов термопары t_1 отличается от температуры горячего спая t_2 , то, в силу термоэлектрического эффекта, в термоэлектродах возникает термоЭДС E_t , пропорциональная разности температур. Это можно объяснить тем, что энергия свободных электронов в различных металлах по-разному растет с ростом температуры. Если вдоль проводника существует перепад температуры, то электроны на горячем конце приобретают более высокие энергии и скорости, чем на холодном; благодаря этому возникает движение электронов от горячего конца к холодному, разное в разных металлах. При наличии замкнутой цепи разное движение электронов создает ток, который можно трактовать как результат возникновения термоэлектродвижущей силы в горячем спае. За счет этой ЭДС появляется выходное напряжение

$$U_{\text{вых}} = E = C(t_1 - t_2),$$

где C – коэффициент пропорциональности, зависящий от материала проводников термопары. Возникновение термоЭДС позволяет термопару (термоэлемент) называть датчиком-генератором.

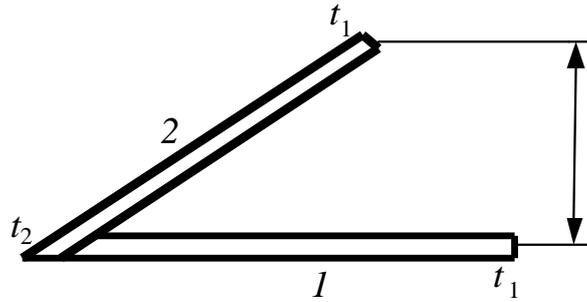


Рис. 3.12. Термоэлектрический датчик

Статические характеристики большинства термопар нелинейные.

Чаще всего используются следующие термопары: хромель – копель (до 600 °С длительный нагрев), хромель – алюмель (до 1000 °С); платина – платинородий (до 1300 °С); вольфрам – молибден (до 2100 °С). ТермоЭДС при максимальной рабочей температуре не превышает 10...50 мВ.

Все термопары обладают инерционностью. Постоянные времени термопар в зависимости от конструкции могут быть от десятых долей секунды до нескольких сотен секунд.

3.11. Пьезоэлектрические датчики

Пьезоэлектрические датчики применяются для получения электрических зарядов, образующихся на поверхности некоторых кристаллов при их сжатии. Эти датчики чаще всего изготавливают из кварца. Такой датчик представляет собой кварцевую пластину, на одной из сторон которой напылены (или приклеены токопроводящим клеем) электроды, к которым припаиваются выводы (рис. 3.13).

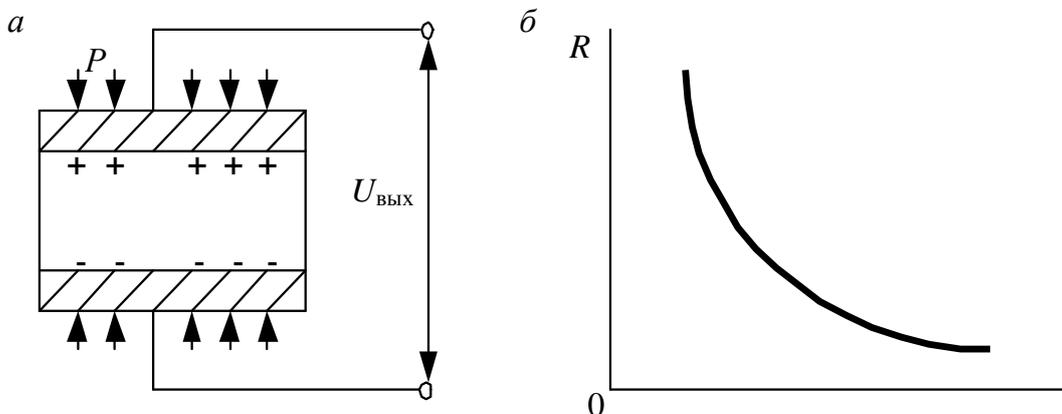


Рис. 3.13. Пьезоэлектрический датчик:
а – схема; б – график работы

При сжатии кварцевой пластины силой P на ее противоположных поверхностях, а следовательно и на электродах в силу прямого пьезоэлектрического эффекта возникают электрические заряды.

Величина заряда пропорциональна сжимающей силе P , т.е. $Q = d \cdot P$, где d – коэффициент пропорциональности, называемый пьезомодулем.

При изменяющейся силе P появляется выходное напряжение

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{Q}{C_{\text{д}} + C_{\text{м}}} = \frac{d}{C_{\text{д}} + C_{\text{м}}} P,$$

где $C_{\text{д}}$ – емкость датчика (конденсатора, образованного электродами и кварцевым диэлектриком); $C_{\text{м}}$ – емкость монтажа.

Из этой формулы видно, что, зная выходное напряжение, можно определить силу P . Если P постоянна, то $U_{\text{ВЫХ}} = 0$. Пьезоэлектрические датчики безынерционны. Они используются для измерения сил, давления, вибрации и для других измерений, в которых прямо или косвенно проявляются силовые воздействия. Выходное напряжение пьезоэлектрических датчиков составляет от единиц милливольт до единиц вольт. Для усиления выходного напряжения пьезоэлектрического датчика необходимо применять усилитель с очень большим входным сопротивлением.

3.12. Фотоэлектрические датчики, фотоэлектрические реле

К фотоэлектрическим датчикам генераторного типа относятся фотоэлементы с внешним фотоэффектом, которые, в отличие от фотоэлементов с внутренним фотоэффектом (фотосопротивлений), под действием света выделяют свободные электроны. Этим создается разность потенциалов, возникает электрический ток, т.е. происходит непосредственное преобразование света в электрическую величину без модуляции энергии от постороннего источника. Конструктивно фотоэлементы генераторного типа бывают двух исполнений – вакуумные и полупроводниковые.

Вакуумные фотоэлементы вырабатывают сигнал (электрический ток) небольшой величины, и он не может непосредственно воздействовать на исполнительный механизм. В этом случае совместно с вакуумным фотоэлементом применяют электронный усилитель.

Полупроводниковые фотоэлементы (фотодиод, фототранзистор) вырабатывают сигнал, величина которого в ряде случаев достаточна для непосредственного воздействия на измерительный прибор.

В настоящее время более широкое применение получили полупроводниковые фотоэлементы, т.к., помимо большего по величине вырабатываемого сигнала, они имеют (сравнительно с вакуумными) меньшие габаритные размеры, больший срок службы, возможность эксплуатации в местах, подверженных вибрации и ударам. Недостатком полупроводникового фотоэлемента является зависимость его характеристик от температуры окружающей среды (в вакуумных фотоэлементах эта зависимость отсутствует).

Принципиальная схема варианта фотодатчика, имеющего релейную характеристику, представлена на рис. 3.14. Если фотодиод D не освещен, его внутреннее сопротивление велико, транзистор T_1 закрыт и реле P_1 выключено. При освещении фотодиода внутреннее сопротивление его резко уменьшается и возникает ток в цепи: $+E_{и}$ – эмиттер – база транзистора – фотодиод D_1 – $E_{к}$. Транзистор открывается, реле P_1 включается. При повторном затемнении фотодиода его внутреннее сопротивление опять резко увеличивается и реле P_1 выключается, диод D_2 предохраняет транзистор T_1 от пробоя.

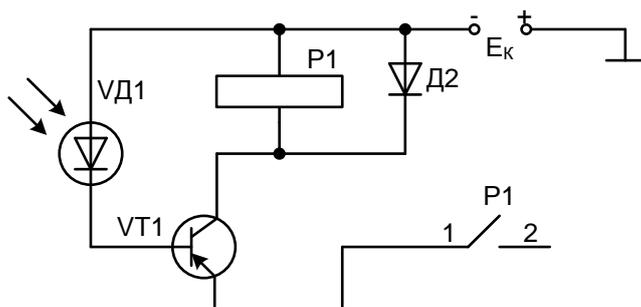


Рис. 3.14. Принципиальная схема фотодатчика

Фотоэлектрические датчики генераторного типа нашли широкое применение в системах автоматического контроля: для измерения силы света различных источников, освещенности, фотометрирования ультрафиолетовой радиации и т.д. Путем фотоэлектрического измерения радиации, яркости или цвета накаливаемого тела можно судить о его температуре. В данном случае имеется последовательное преобразование температуры в лучистую энергию и лучистой энергии в электрическую. Такие фотоэлектрические датчики называются также оптическими датчиками – пирометрами, фактически здесь сосредоточены два датчика:

оптический и электрический. Оптический датчик относится к датчикам генераторного типа, т.к. преобразование теплоты в лучеиспускание происходит непосредственно, без вспомогательного источника энергии.

Фотоэлектрические датчики, имеющие на выходе электрический ток, легко превращаются в фотоэлектрическое реле путем включения в цепь этого тока электрического реле. В качестве реле используются электромагнитные или бесконтактные. Особенно удобны для этой цели тиратроны, выполняющие одновременно функции усилителей и реле. Фотоэлектрические реле получили также широкое применение в различных схемах автоматики – в сигнализации, браковке, сортировке, счете, защите и т.д.

3.13. Датчики линейных ускорений (акселерометры)

Датчики линейных ускорений (акселерометры) преобразуют линейное ускорение в электрическую величину. Один из вариантов акселерометра преобразует ускорение в усилие, измеряемое затем пьезоэлектрическим датчиком (рис. 3.15, где I – корпус датчика).

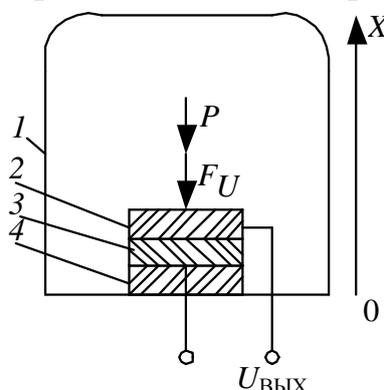


Рис. 3.15. Пьезоэлектрический акселерометр

Кварцевая пластина 3 наклеивается на основание 4 , а сверху к кварцевой пластинке с помощью токопроводящего клея приклеивается пластинка 2 , называемая чувствительным элементом. Ось OX , перпендикулярная плоскости кварцевой пластины, называется осью чувствительности акселерометра. Акселерометр устанавливается на подвижном объекте.

Когда объект движется с ускорением a вдоль оси OX , на чувствительный элемент действует инерционная сила, направленная в сторону, противоположную ускорению, и равная

$$F_{\text{и}} = ma,$$

где m – масса чувствительного элемента.

На чувствительный элемент действует также вес (сила тяжести)

$$P = m \cdot g,$$

где g – ускорение силы тяжести.

Для рассматриваемого варианта акселерометра эти силы совпадают по направлению, поэтому результирующая сила $F = F_{\text{и}} + P = m(a+g)$.

При изменяющейся силе F возникает выходное напряжение

$$U_{\text{вых}} = \frac{d}{C_{\text{д}} + C_{\text{м}}} F = \frac{d_m}{C_{\text{д}} + C_{\text{м}}} (a - g) = K a_{\text{к}},$$

где d – пьезомодуль; $C_{\text{д}}$ – емкость датчика; $C_{\text{м}}$ – емкость монтажа; $K = d_m / (C_{\text{д}} + C_{\text{м}})$ – коэффициент передачи; $a_{\text{к}}$ – кажущееся ускорение.

Кажущимся называют ускорение, равное векторной разности действительного ускорения объекта a и ускорения силы тяжести g , т.е. $a_{\text{к}} = (a - g)$. Из формулы видно, что акселерометр измеряет не действительное, а кажущееся ускорение объекта.

3.14. Вращающиеся трансформаторы

Вращающиеся трансформаторы (ВТ) нашли широкое применение в автоматике как датчики угловых величин, а также как функциональные элементы для вычислительной техники. Они применяются и при автоматизации решений тригонометрических задач, параметров треугольников с преобразованием координат.

Вращающийся трансформатор представляет собой индукционную электрическую машину переменного тока, вырабатывающую напряжения, пропорциональные синусу и косинусу угла поворота или напряжения, пропорциональные углу поворота ротора машины (в зависимости от схемы включения обмоток статора и ротора).

На статоре и роторе ВТ расположены по две обмотки, сдвинутые в пространстве под углом 90° (рис. 3.16).

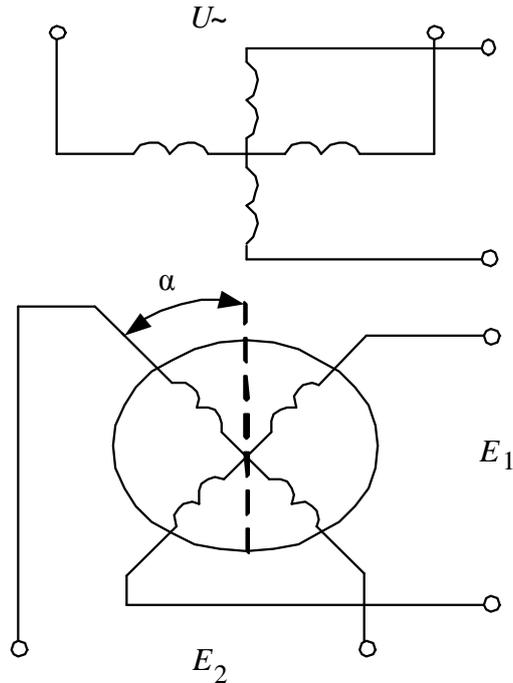


Рис. 3.16. Схема вращающегося трансформатора

Магнитные оси этих обмоток взаимно перпендикулярны. Одна из обмоток статора является обмоткой возбуждения и питается от однофазной сети переменного тока. Если при этом ротор ВТ повернуть на угол α , то ЭДС, наводимые в обмотках ротора, будут пропорциональны синусу и косинусу угла поворота:

$$E_1 = E_{\max} \sin \alpha; \quad E_2 = E_{\max} \cos \alpha,$$

где E_1 , E_2 – действующие значения ЭДС в обмотке ротора; E_{\max} – максимальное значение ЭДС в обмотке ротора (при совпадении осей обмоток ротора и статора).

Максимальное значение ЭДС (без учета потерь) в обмотке ротора

$$E_{\max} = U w_p / w_c = UK,$$

где U – напряжение возбуждения ВТ; w_p – число витков в обмотке ротора; w_c – число витков в обмотке статора; K – коэффициент трансформации ВТ.

Таким образом, напряжение, снимаемое с синусной и косинусной обмоток ВТ, определяется из выражений

$$U_1 = KU \sin \alpha; \quad U_2 = KU \cos \alpha.$$

Конструктивно вращающийся трансформатор выполнен в виде статора и ротора с контактными кольцами.

3.15. Датчики обратной связи в системах управления следящими электроприводами

В настоящее время на рынке сервоприводов существует большой выбор датчиков, характеризующих скорость и положение вала двигателя (рис. 3.17). В каждом конкретном случае выбор того или иного типа датчика зависит от требуемой точности отработки заданий.

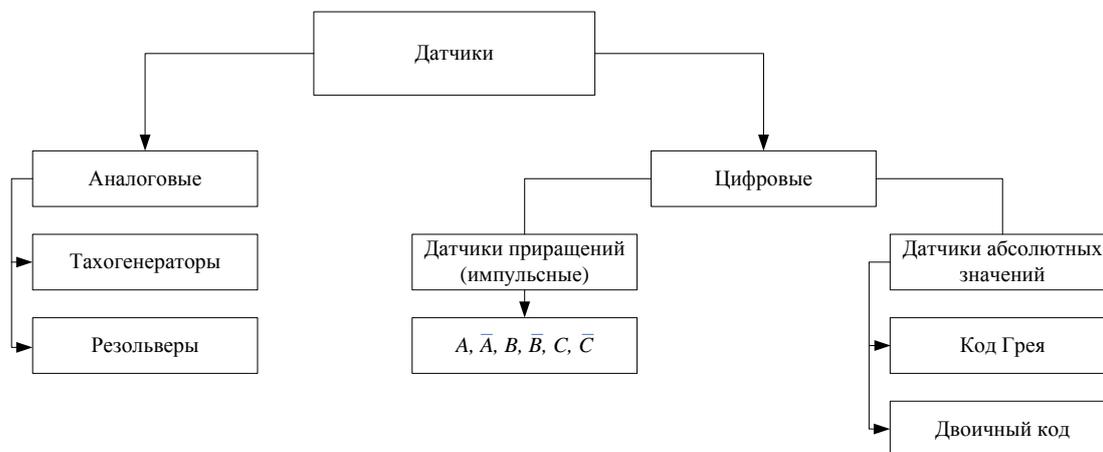


Рис. 3.17. Типы датчиков положения

Одним из важнейших критериев при выборе датчика является грубость системы измерения. Так как датчик устанавливается непосредственно на двигателе, он должен быть нечувствителен к вибрации и изменениям температуры. Другим важным фактором является помехоустойчивость измерительной системы.

В общем случае датчики характеризуются параметрами, приведенными в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Датчик	Измеряемые данные		
	Положение ротора	Положение ИО	Скорость
Датчик абсолютных значений однооборотный	■	□	□
Датчик абсолютных значений многооборотный	■	■	□
Датчик приращений	□	□	□
Резольвер с АЦП	■	□	■
Тахогенератор			■

Примечание: ■ – непосредственное получение данных, □ – используется с дополнительным преобразованием данных.

Достоинства и недостатки различных систем датчиков приведены в сводной табл. 3.3.

Таблица 3.3

Измерительная система	Достоинства	Недостатки
Датчик приращений	относительно грубое исполнение; большое разнообразие по разрешающей способности, конструктивному исполнению, интерфейсу	при потере напряжения исчезает информация о положении
Датчик абсолютных значений	информация о положении сохраняется при исчезновении напряжения; однозначная связь между положением и выходной величиной; возможна очень высокая разрешающая способность	высокая стоимость
Резольвер	грубое исполнение; устойчивость к температуре и вибрациям; может быть встроен в двигатель; экономия других измерительных систем	высокие эксплуатационные расходы

Показанное сравнение отражает тот факт, что наиболее предпочтительными с точки зрения стоимости датчика, его надежности и эксплуатации являются резольверы. Однако на сегодняшний день подавляющее большинство разработчиков сервоприводов и станков с числовым программным управлением укомплектовывают свои системы инкрементными датчиками положения.

3.15.1. Резольвер

Резольвер служит для измерения абсолютного значения положения вала двигателя в пределах одного оборота. Кроме того, из сигнала резольвера может быть получено значение скорости и сигнал импульсного датчика для регулирования положения (позиционирования).

Резольвер работает на принципе вращающегося трансформатора и состоит из ротора с обмоткой и статора с обмотками (рис. 3.18). Обмотки статора образуют с обмотками ротора трансформатор. Отличие от вращающегося трансформатора состоит в наличии на статоре двух сдвинутых друг относительно друга на 90° обмоток.

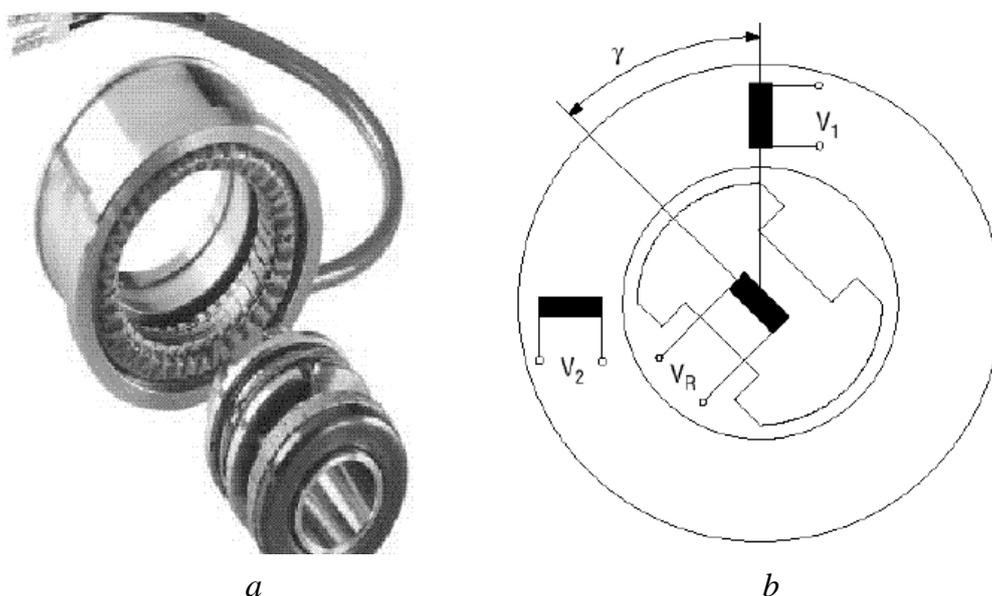


Рис. 3.18. Изображение резольвера – *a*; схематическое устройство – *б*

Ротор резольвера закрепляется на валу двигателя (рис. 3.19). Чтобы иметь возможность передать первичное напряжение на ротор, не используя щеточный контакт, на статоре и роторе предусмотрены дополнительные обмотки, с помощью которых первичное напряжение на роторную обмотку передается по трансформаторному принципу. Дополнительная обмотка и рабочая обмотка на роторе соединены между собой электрически, поэтому напряжение возбуждения, передаваемое со статора на ротор через дополнительную обмотку, будет приложено и к рабочей обмотке (обмотке возбуждения) ротора.

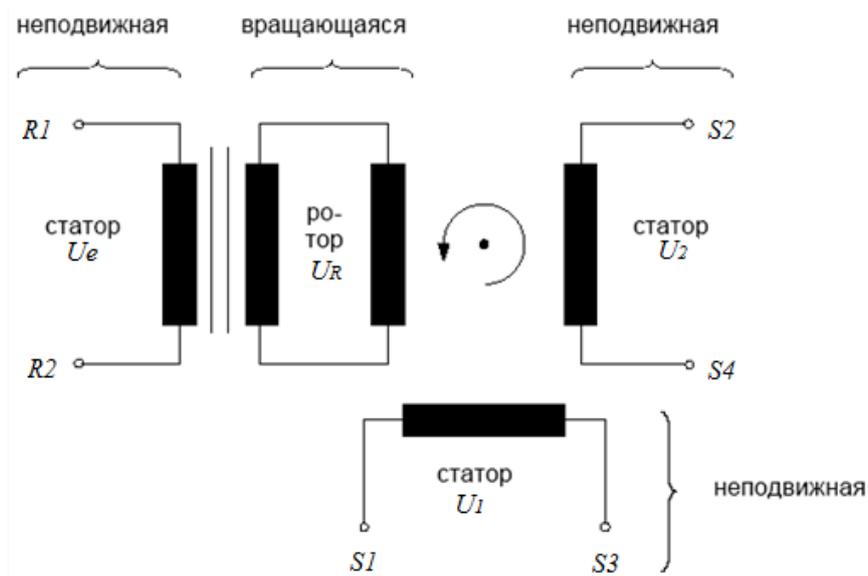


Рис. 3.19. Эквивалентная схема резольвера

В зависимости от положения ротора в рабочих обмотках статора индуцируются напряжения с изменяющейся в функции угла поворота ротора амплитудой. В обмотке статора, через которую проходит полный поток возбуждения ($\gamma = 0^\circ$ см. рис 3.20, б), напряжение U_1 максимально. При повороте ротора на угол $\gamma = 90^\circ$ напряжение U_1 уменьшается до нуля. Затем напряжение U_1 вновь возрастает до максимума с другой фазой (при $\gamma = 180^\circ$). Таким образом, напряжение U_1 имеет огибающую, изменяющуюся по закону косинуса. Напряжение U_2 второй рабочей обмотки сдвинуто относительно U_1 на 90° и имеет при $\gamma = 0^\circ$ нулевое значение. Это напряжение достигает максимума при 90° и затем снова уменьшается до нуля при $\gamma = 180^\circ$. Следовательно, напряжение U_2 изменяет свою амплитуду по закону синуса.

Выходные напряжения U_1 и U_2 в зависимости от входного напряжения U_e меняются следующим образом (рис. 3.20):

$$\begin{aligned} U_e &= U_s \cdot \sin \omega t; \\ U_1 &= U_s \cdot \sin \omega t \cdot \cos \gamma; \\ U_2 &= U_s \cdot \sin \omega t \cdot \sin \gamma \end{aligned}$$

где U_e – опорное напряжение; γ – угловое положение ротора; ω – круговая частота входного напряжения U_e ; U_s – амплитудное значение входного напряжения.

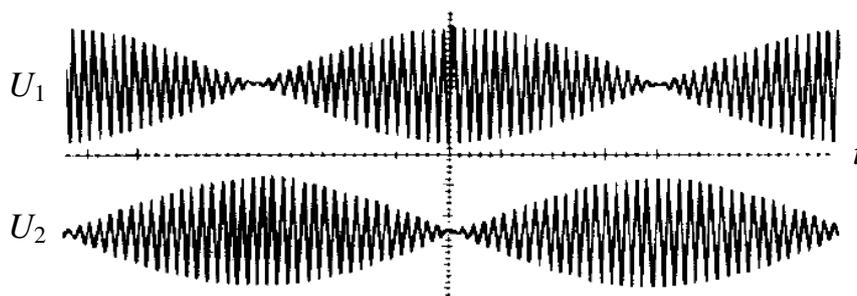


Рис. 3.20. Выходные напряжения резольвера U_1 и U_2

Выходной сигнал резольвера преобразуется в дискретное число в преобразователе «резольвер-код» (РК-преобразователь) серводвигателя (рис. 3.21). Это цифровое значение подвергается дальнейшей обработке, чтобы получить добавочную информацию. Во-первых, РК-преобразователь выдает информацию об угловом положении ротора. Во-вторых, одновременно можно определить скорость двигателя, если считать импульсы в течение определенного времени и затем усреднить

значение скорости. В-третьих, можно два младших разряда использовать:

- для определения направления движения;
- управления позиционированием.

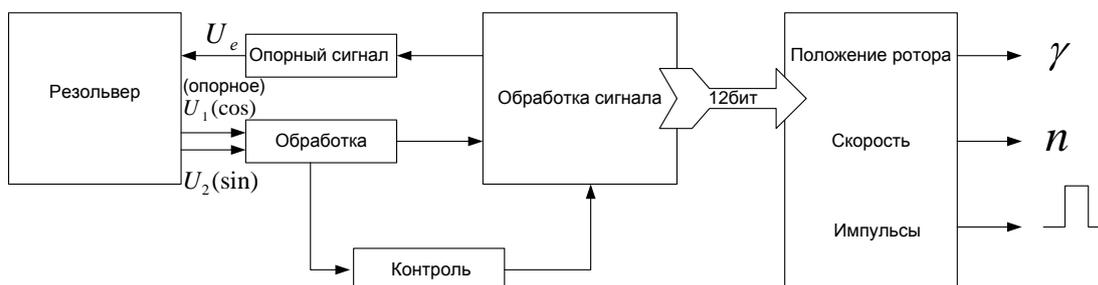


Рис. 3.21. Структура обработки сигнала резольвера

Генератор опорной частоты через статорную обмотку подает на ротор переменное напряжение около 10 В при частоте около 7 кГц. Дискретное значение числа на реверсивном счетчике b преобразуется цифро-аналоговым преобразователем 5. Выходные сигналы U_1 и U_2 статора резольвера умножаются на синус и косинус измеренного значения. Тогда значение на реверсивном счетчике представляет собой угол φ . В результате получаются напряжения:

$$U_{F1} = U_S \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\gamma)$$

$$U_{F2} = U_S \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\gamma)$$

В усилителе 2 оба этих сигнала вычитаются друг из друга. Результат представляет собой разность (ошибку) между углом φ и фактическим углом γ . Ошибка получается в виде

$$U_{FD} = U_S \cdot \sin(\omega t) \cdot (\sin(\varphi) \cdot \cos(\gamma) - \cos(\varphi) \cdot \sin(\gamma))$$

$$= U_S \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\varphi - \gamma)$$

В фазочувствительном выпрямителе 3, который включен за сумматором 2, этот сигнал демодулируется, чтобы исключить несущую частоту. Образовавшийся на выходе выпрямителя сигнал U_F пропорционален $\sin(\gamma - \varphi)$.

Это напряжение действует на одном из входов РК-преобразователя и на вход интегратора 4. Последний интегрирует напряжение ошибки, которое поступает в дальнейшем на вход генератора ГУН 7, управляемый напряжением.

Если между углами γ и φ есть разница, то интегратор 4 образует на своем выходе выпрямленное напряжение, с помощью которого ГУНН 7 вырабатывает импульсы, поступающие в реверсивный счетчик 6.

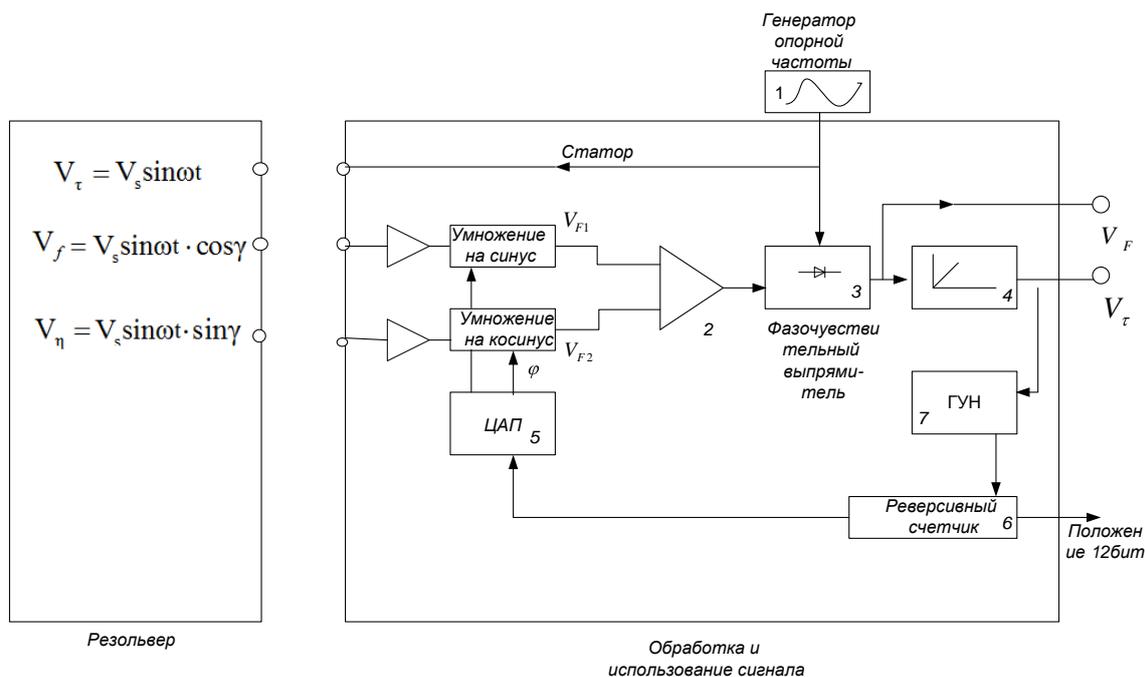


Рис. 3.22. Блок-схема преобразователя «резольвер – код»

Элементы со 2 по 7 образуют замкнутый контур. На входе ГУН 7 сигнал в форме напряжения постоянного тока существует до тех пор, пока разность между γ и φ не сводится к нулю, что означает $\gamma = \varphi$.

При этом дискретный сигнал реверсивного счетчика соответствует аналоговому значению угла резольвера.

При непрерывном вращении резольвера ГУНН 7 вырабатывает импульсы до тех пор, пока цифровое значение на реверсивном счетчике не совпадет с аналоговым значением углового положения ротора на входе, т.е. пока изменение углового положения ротора не будет уравновешено. Частота ГУНН 7 при этом пропорциональна скорости двигателя и резольвера. Из этого следует, что выходное напряжение интегратора также пропорционально скорости. Преобразователь «резольвер – код» на выходе имеет пропорциональное скорости напряжение U_T , а также информацию об оборотах резольвера.

Эта схема реализована как интегрирующий контур, причем опорный генератор 1 подключен извне.

Ошибка сигнала резольвера пренебрежимо мала ($< 0,05\%$).

3.15.2. Инкрементный датчик угловых перемещений

Преобразователи угловых перемещений (фотоэлектрические) осуществляют преобразование измеряемого перемещения в последовательность электрических сигналов, содержащих информацию о величине и направлении этих перемещений для последующей обработки в сервоприводах или системах с ЧПУ.

В частности, преобразователи угловых перемещений могут применяться в измерительных системах, системах программного управления станков и механизмов при определении угловых размеров, перемещений на поворотных рабочих столах, делительных устройствах, антеннах и прочем оборудовании.

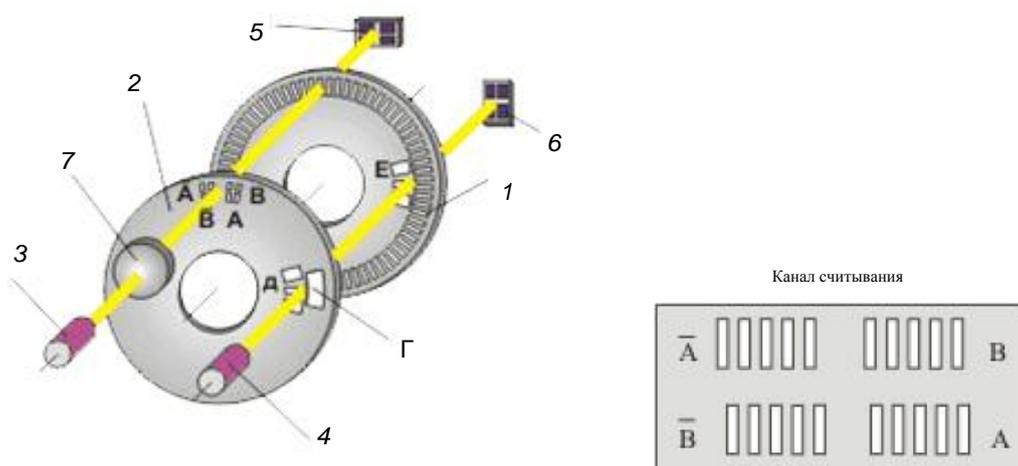


Рис. 3.23. Принцип действия фотоэлектрического датчика

Принцип работы преобразователей основан на фотоэлектрическом считывании растровых и кодовых сопряжений (рис. 3.23). В состав преобразователя входит растровое измерительное звено, состоящее из подвижного измерительного растра 1 и неподвижного индикаторного растрового анализатора 2. В состав растрового анализатора входят 4 поля считывания (A, \bar{A}, B, \bar{B}), каждое из которых имеет пространственный сдвиг относительно предыдущего на $1/4$ периода растра. Параллельный световой поток, сформированный конденсором 7 осветителя 3, проходя через растровое сопряжение, анализируется четырехквadrантным фотоприемником 5. Соединенные соответствующим образом фотоприемники позволяют получить два ортогональных токовых сигнала I_a и I_b , постоянная составляющая которых не зависит от уровня освещенности. Наличие двух ортогональных измерительных сигналов позволяет определить направление перемещения и повысить разрешающую способ-

ность преобразователей при обработке этих сигналов в электронных блоках преобразователей.

Из рис. 3.24 видно, что сигнал I_a опережает сигнал I_b при вращении по часовой стрелке измерительного лимба, жестко связанного с валом преобразователя.

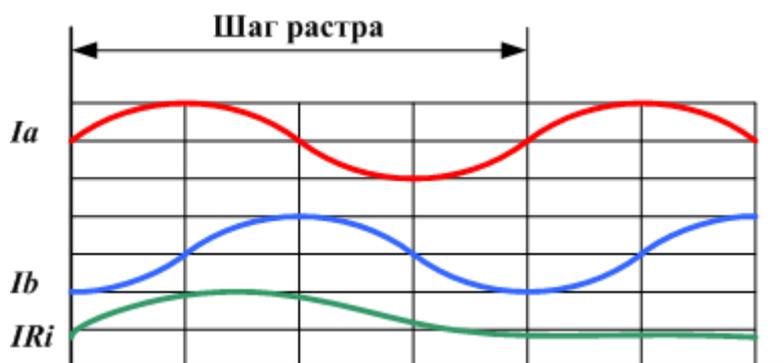


Рис. 3.24. Выходные сигналы датчика

Кроме измерительных сигналов перемещения преобразователь имеет сигнал референтной метки. Этот сигнал, показанный на рис. 3.24 как IR_i , вырабатывается, в общем случае, один раз за оборот вала и позволяет использовать преобразователь как датчик положения. При полном совпадении аналогичных кодовых растров Е и Д световой поток, принимаемый одной из секций фотоприемника б, в 3–4 раза больше, чем при любом другом взаимном положении этих кодовых растров. Ширина сигнала референтной метки по уровню $1/2$ от ее амплитуды не превышает периода одного из сигналов перемещения. Для фиксации этого уровня вне зависимости от интенсивности осветителя 4 организован опорный сигнал: световой поток осветителя 4 через диафрагму Г поступает на вторую секцию фотоприемника б.

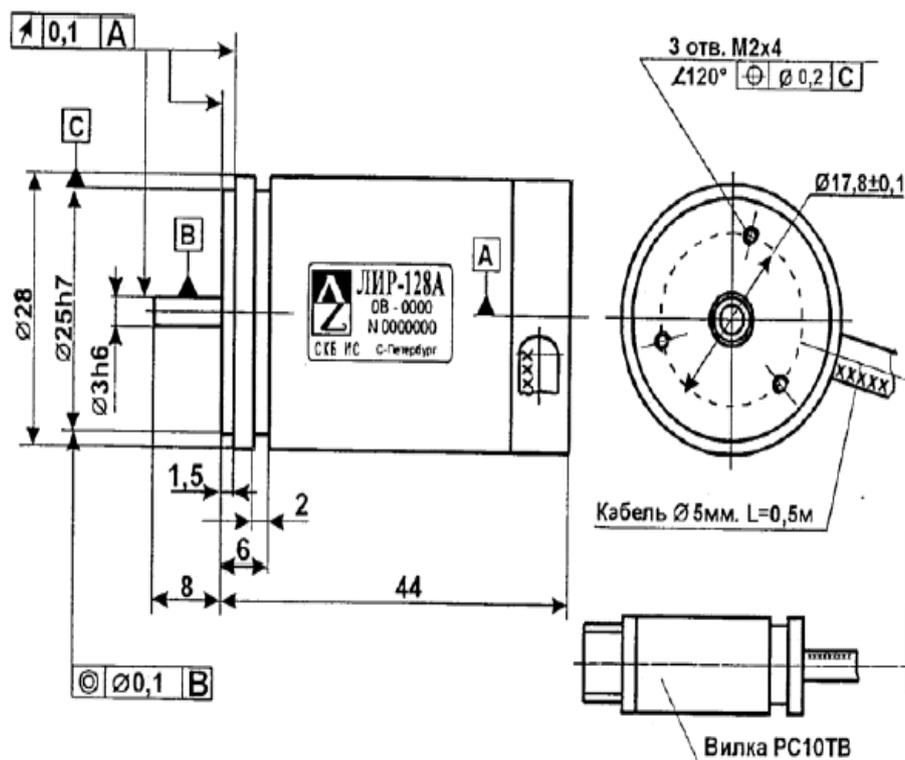


Рис. 3.25. Внешний вид преобразователя ЛИР-128А

Если требуется определить положение вала преобразователя, не производя его полный оборот, используется система пространственно-кодированных референтных меток либо вместо референтных меток наносится специальный однороджечный код положения (квазиабсолютный датчик).

В случае применения пространственно кодированных референтных меток за один оборот вала вырабатывается 20 или 36 сигналов референтных меток, расстояния между которыми в шагах раstra различны. Необходимое перемещение вала преобразователя для определения его положения в наихудшем случае составляет 36° или 20° соответственно. Эти преобразователи изготавливаются по спецзаказу.

Наиболее распространенными отечественными преобразователями являются преобразователи фирмы СКБ ИС. Изображение и паспортные данные преобразователя ЛИР-128А приведены ниже.

Таблица 3.4

Параметр	Значение
Число штрихов измерительного лимба	2500
Точность	300"
Максимальная скорость вращения вала	10000 об/мин
Момент трогания ротора	не более 0,001 Нм
Момент инерции ротора	$6,8 \cdot 10^{-8}$ кг·м ²
Допустимая нагрузка на вал	не более 5 Н
Масса	не более 0,06кг
Степень защиты	IP64
Интервал рабочих температур	0...70 °С
Ударные ускорения	≤ 300 м/сек ²
Напряжение питания	5 В \pm 5 %
Ток потребления	не более 90 мА
Число импульсов	2500
Дискретность отсчета	1296"
Максимальная частота выходного сигнала	160 кГц
Число оборотов вала, соответствующее максимальной выходной частоте	3800 об/мин
Форма импульсов	Прямоугольная

3.15.3. Датчик линейных перемещений

Принцип действия линейных датчиков рассмотрим на примере датчика линейных перемещений серии ЛИР, производимого фирмой СКБ ИС.

Преобразователи линейных перемещений осуществляют преобразование измеряемого перемещения в последовательность электрических сигналов, содержащих информацию о величине и направлении этих перемещений для последующей обработки в системах ЧПУ (рис. 3.26).

При относительном перемещении растровой шкалы и индикаторной пластины ее поля считывания A, \bar{A}, B, \bar{B} с шагом растра, соответствующим шагу растра шкалы, реализуют два идентичных канала приема излучения: $A, -\bar{A}, B, -\bar{B}$. В состав каждого канала входят два поля считывания, растры которых имеют пространственный сдвиг относительно друг друга, равный $1/2$ шага растра, и соответственно по два осветителя (5) и фотоприемника (6). Поля считывания канала A имеют пространственный сдвиг растров относительно растров полей считывания канала B , равный $1/4$ шага растра.

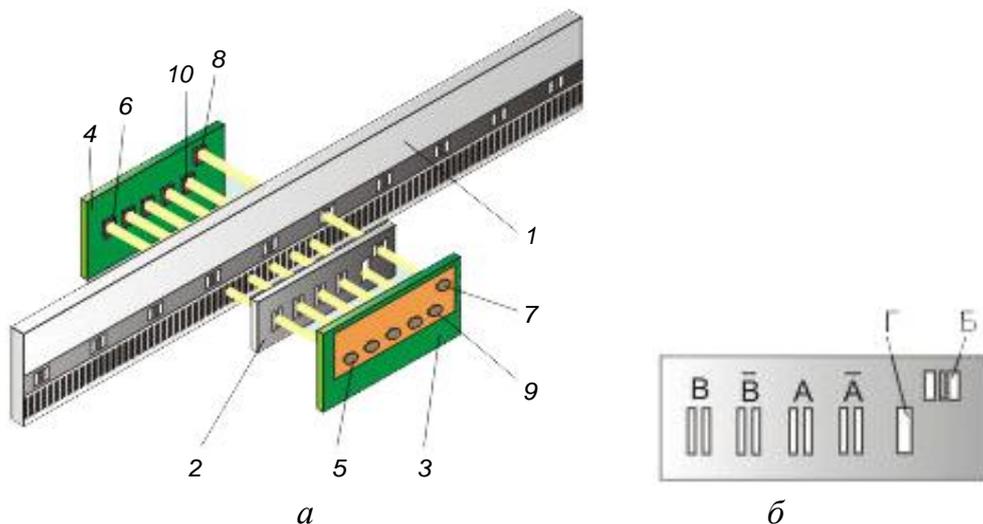


Рис. 3.26. Устройство датчика – *a*, каналы считывания – *б*

Простроенный таким образом канал считывания формирует два ортогональных периодических сигнала Ia и Ib . Диаграмма изменения сигналов аналогична той, что показана на рис. 3.27. Их наличие позволяет определить направление перемещения и повысить разрешающую способность преобразователя. Так, сигнал Ia опережает сигнал Ib при перемещении головки преобразователя от начала отсчета вправо для вариантов 1, 2 и влево – для вариантов 3, 4.

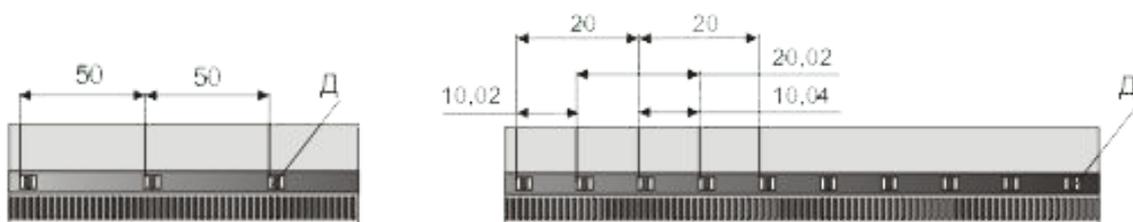


Рис. 3.27. Канал референтной метки

При относительном перемещении растровой шкалы и индикаторной пластины в зоне совмещения полей референтных меток Д и Б происходит модуляция светового потока, излучаемого осветителем 7, и на выходе фотоприемника 8 формируется сигнал референтной метки IRi с явно выраженным максимумом. Поле диафрагмы Г вместе с осветителем 9 и фотоприемником 10 участвует в выработке опорного сигнала в канале референтной метки.

Глава 4 ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

4.1. Автоматические выключатели

Автоматические выключатели – коммутационные аппараты, предназначенные для защиты электрических цепей от перегрузок и токов короткого замыкания (сверхтоков), а также для осуществления оперативного управления участками электрических цепей.

Принцип действия

При перегрузках в защищаемой цепи протекающий ток нагревает биметаллическую пластину. При нагреве пластина изгибается и воздействует на рычаг свободного расцепления (рис.4.1). При коротком замыкании в защищаемой цепи ток, протекающий через катушку электромагнита автоматического выключателя, многократно возрастает, соответственно возрастает магнитное поле, которое перемещает сердечник и воздействует на рычаг свободного расцепления. В обоих случаях подвижный контакт отходит от неподвижного, автомат выключается, происходит разрыв цепи, тем самым электроцепь защищается от перегрузок и токов короткого замыкания.

Внутреннее устройство

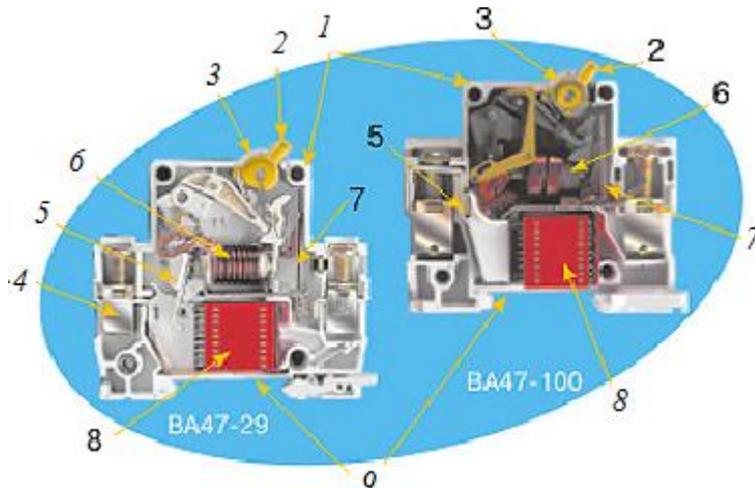


Рис. 4.1. Внутреннее устройство автоматического выключателя:
1 – корпус из термостойкой ABS-пластмассы; 2 – рукоятка управления; 3 – указатель «ВКЛ/ВЫКЛ»; 4 – соединительные зажимы с насечкой для фиксации внешних проводников; 5 – неподвижные и подвижные контакты из серебряного композита; 6 – катушка электромагнитного расцепителя; 7 – биметаллическая пластина теплового расцепителя; 8 – дугогасительная камера; 9 – место на DIN-рейку

4.2. Контакторы

Контакторы – электромагнитные аппараты, предназначенные для коммутации силовых цепей оборудования. Обычно электромагнитные контакторы включают в себя 6 исполнений по коммутируемому току: 9, 12, 18, 25, 40, 65, 95 А и разделены на 4 габарита:

1 габарит – 9, 12, 18 А;

2 габарит – 25 А;

3 габарит – 40, 50 А;

4 габарит – 65, 95 А.

Помимо этого предусмотрены реверсивные исполнения и с переключением *звезда-треугольник*.

Внешний вид электромагнитного контактора представлен на рис. 4.2.



Рис. 4.2. Внешний вид электромагнитного контактора

Контакторы обычно комплектуются электротепловыми реле и содержащей 21 исполнение на токи нагрузки от 0,1 до 93 А.

Для расширения возможности использования контакторов в системах автоматизации технологических процессов имеются приставки контактные на 2 и 4 группы контактов.

Пневматические приставки выдержки времени – необходимый компонент при реализации сложных схем управления технологическим оборудованием. Также как и контактные приставки, они устанавливаются на головку контактора с помощью защелки и позволяют задавать выдержку времени от 0,1 до 180 секунд на включение или отключение цепей управления.

4.3. Кнопки, светосигнальная арматура

Для укомплектования щитов и панелей управления имеется много разновидностей кнопок и переключателей с подсветкой и без. Светосигнальная арматура имеет различные дизайнерские решения со светофильтрами с большой гаммой цветов.

Конструкция контактных узлов кнопок, переключателей и светосигнальной арматуры унифицирована, головки этих аппаратов быстроразъёмные, что весьма удобно при монтаже и ремонте оборудования.

Общий вид кнопки изображен на рис. 4.3.



Рис. 4.3. Общий вид кнопки

4.4. Устройства защитного отключения

Защитное отключение на дифференциальном токе – единственный принятый во всем мире «активный» способ защиты, альтернативы которому не найдено. Эффективность защитного отключения очень высока и уже давно не подвергается сомнению. Помимо основной функции – защиты людей от поражения током, оно контролирует сопротивление изоляции токовыводящих частей, предотвращая возгорание изоляции и возникновение пожаров.

Если бы в России также усердно «насаждалось» защитное отключение, как в странах Западной Европы, то до 30 % пожаров были бы предотвращены.

В промышленно развитых странах Западной Европы защитное отключение узаконено давно. Так, во Франции обязательность использования аппаратуры защитного отключения во вновь строящихся объектах жилого и гражданского назначения была введена «декретом президента» в 1962 г. Аналогично принимались решения в Австрии, Германии, Англии, Италии и других странах.

В России масштабное использование УЗО (устройств защитного отключения – термин, появившийся в начале 60-х гг. и уже устаревший), началось после появления распоряжения премьера Правительства Москвы № 868-РП от 20 мая 1994 г., где было сказано: «В целях снижения пожароопасности электрооборудования и защиты людей от поражения электрическим током...», и далее приводилась программа работ по скорейшему внедрению УЗО. Началась процедура включения УЗО в состав электрооборудования типовых и производственных проектов нового строительства.

Аппаратура защитного отключения представлена как дифференциальными автоматами (рис. 4.5), так и дифференциальными выключателями (рис. 4.4).



Рис. 4.4. Дифференциальный выключатель

При этом дифференциальные автоматы имеют модельную конструкцию с использованием двух- и четырехполюсного автоматического выключателя с защитой от сверхтоков и электронным управлением, а дифференциальные выключатели выполнены в моноблоке с использованием электромеханического расщепителя и не имеют защиты от сверхтоков.

Оба вида УЗО не имеют ограничений по применению в различных климатических зонах страны в составе щитового электрооборудования с классом защиты от поражения током не ниже 1.



Рис. 4.5. Дифференциальный автомат

4.5. Кабель-канал

Кабель-канал предназначен для наружной прокладки электрических, радиотрансляционных, телефонных и компьютерных сетей, а также обеспечения электро- и пожаробезопасности сетей в промышленных, жилых зданиях и сооружениях.

Внешний вид кабель – канала изображен на рис. 4.6.



Рис. 4.6. Кабель-канал

Преимущества прокладки проводов в кабель-канале:

- стабильность геометрии;
- двойной замок – надёжное, прочное соединение;

- безопасность – особая крышка снимается только при помощи инструмента;
- долговечность – стойкость к воздействию ультрафиолетовых лучей;
- эстетичность – компактная форма, однородная гладкая поверхность, точное сопряжение боковых частей;
- экономичность – плотно прилегающая крышка позволяет максимально использовать объём канала;
- удобство, простота и скорость монтажа;
- экологически чистый продукт.

4.6. Источники бесперебойного питания

Усложнение технологических процессов и ужесточение требований к их эффективности обуславливает повсеместное применение прецизионных датчиков и оборудования, ИТ-систем для сбора, обработки и хранения данных о параметрах процесса. Обеспечение качества и непрерывности электропитания становится одним из базовых требований к системам АСУ ТП.

Стабилизаторы

Наиболее простыми устройствами повышения качества электропитания, кроме повсеместно применяемых сетевых фильтров, являются стабилизаторы-регуляторы напряжения. Принцип их работы очень прост: при достижении некоторого порога входного напряжения реле переключает обмотки трансформатора. Напряжение на выходе прибора задаётся пользователем; обычно имеется 2–3 положения переключателя. На рис. 4.7 показаны два графика работы стабилизатора, соответствующих двум разным номиналам выходного напряжения.

Типовые характеристики устройств этого класса для сети 220 В переменного тока:

- выходная мощность – 600...1200 Вт;
- допустимый диапазон входных напряжений – 160...290 В;
- время стабилизации – менее двух периодов входного тока;
- КПД – более 92 %.

Основное применение стабилизаторов в промышленности: обеспечение датчиков, например оптических или индуктивных, на конвейере со стабильным питанием непосредственно от «конвейерного» фидера, для которого изменение напряжения в широких пределах является нормой.

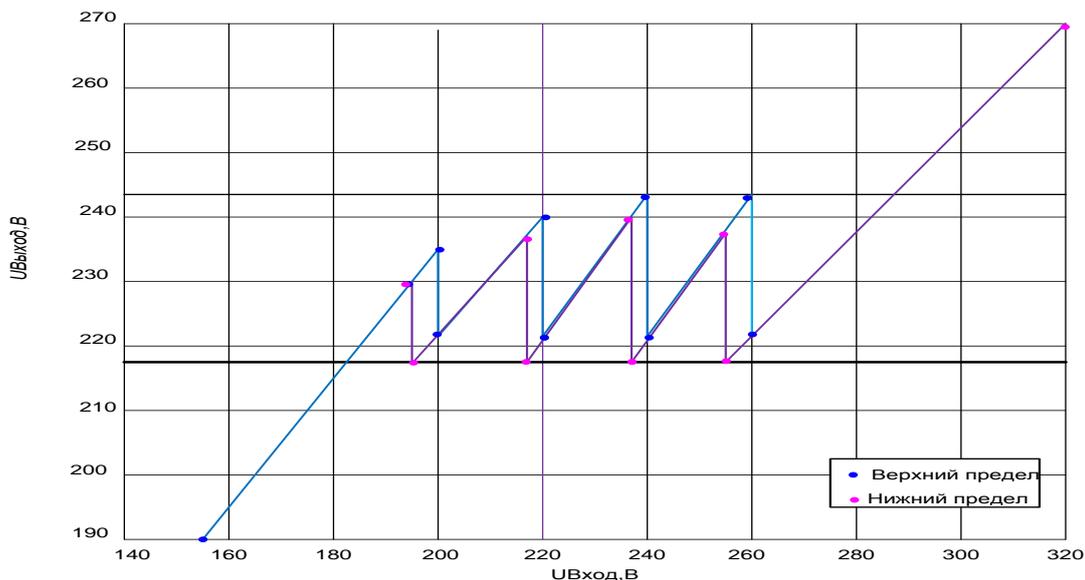


Рис. 4.7. График работы стабилизатора

Новая международная классификация источников бесперебойного питания (ИБП) по стандарту IEC 62040-3 помогает быстро оценить свойства того или иного прибора именно с точки зрения потребительских свойств.

ИБП класса VFD (off-line, back-up, passive stand-by по старым классификациям) в нормальном режиме подают входное питающее напряжение непосредственно на нагрузку, без какого-либо преобразования, через пассивный фильтр. При проблемах в сети – выбросах, провалах, перебоях питания – ИБП переключает нагрузку на питание от аккумулятора (через инвертор). В этом режиме генерируется не синусоидальная, а прямоугольная или трапециевидная форма напряжения, что обусловлено стремлением производителя максимально удешевить конструкцию.

В сетях с нестабильными параметрами применять эти ИБП нельзя: блок будет часто переключаться на аккумулятор, ресурс которого из-за этого будет быстро исчерпан. Время автономной работы нагрузки очень мало: ИБП этого класса редко имеют поддержку дополнительных аккумуляторов.

Уровень защиты, обеспечиваемый ИБП класса VFD, не позволяет применять их в промышленных условиях, для питания оборудования узлов связи.

Основная область их применения – защита некритичных нагрузок (например: персональных компьютеров, других компонентов ИТ-систем, SOHO) от перебоев электроснабжения в электросетях со ста-

бильными параметрами. Основным достоинством ИБП этого класса является низкая стоимость.

Характеристики:

- выходное напряжение и частота не регулируются;
- некоторую степень защиты обеспечивают пассивные фильтры;
- при отключении входа переключение на батарею занимает 4...8 мс;
- защита от 3 из 10 воздействий.

ИБП класса VI (active stand-by, line interactive, quasi-online – по старым классификациям) обычно представляют собой усовершенствование блоков VFD за счёт применения трансформатора с переключаемыми обмотками, аналогичного применяемому в стабилизаторах напряжения. Эту цепь и реализуемую ею функцию иногда называют booster (усилитель).

ИБП класса VI обеспечивают нормальный режим работы (нагрузка питается от сети) при более широком диапазоне входных напряжений по сравнению с устройствами класса VFD; снижается количество переходов на работу от аккумулятора и увеличивается его срок службы. Кроме того, обычно такие ИБП создают квазисинусоидальную форму напряжения на выходе инвертора благодаря его усовершенствованной схеме.

Многие блоки класса VI поддерживают подключение внешних батарейных блоков, позволяя обеспечить значительное время автономной работы нагрузки.

Наличие режима «Booster operation» создаёт интересную возможность использования мощного ИБП без батарей в качестве стабилизатора напряжения. Как правило, в таком режиме могут работать только ИБП с поддержкой внешних батарейных блоков. Например, ИБП Match2200 и Match3000 фирмы GE DE, не имеющие встроенных батарей, могут исполнять роль стабилизаторов напряжения мощностью 2200 В·А и 3000 В·А соответственно.

Мощность ИБП класса VI, представленных на рынке, ограничена величиной 2...3 кВ·А из-за массы и стоимости применяемого трансформатора.

ИБП класса VI обеспечивают уровень защиты выше, чем блоки класса VFD, но он оказывается недостаточным в промышленных условиях, особенно в электросетях, для которых характерны нестабильная частота и мощные помехи.

Основная область их применения – защита серверов в компьютерных сетях.

Характеристики:

- выходное напряжение регулируется в пределах $+20\%$ от входного;
- выходная частота не регулируется;
- нарушения входной сети длительностью менее $5 \dots 8$ мс не регулируются (динамические характеристики на уровне класса 2);
- защита от 5 из 10 воздействий.

Принцип работы ИБП класса VFI (true online, online, continuous operation – по старым классификациям) существенно отличается от описанных ранее: входное переменное напряжение преобразуется в постоянное, которое используется для заряда батареи и питания инвертора. Последний преобразует постоянное напряжение в переменное (220 В или другого заданного номинала) синусоидальной формы со стабильной частотой 50 Гц. Использование такой структуры позволяет отказаться от формирования выходного тока на низкой частоте (50 Гц) в пользу более высокой, например 85 кГц, на которой работают некоторые современные ИБП этого класса. Это даёт существенное снижение размеров и веса трансформатора, используемого в ИБП: для блока 4...5 кВ·А трансформатор 50 Гц весит около 60 кг, тогда как трансформатор 85 кГц – всего 4 кг.

Блок снабжается цепью обхода (bypass), которая автоматически подключает нагрузку к электросети в случае перегрузки, перегрева или неисправности основного канала (выпрямителя и инвертора) ИБП. Ручная активизация обходной цепи позволяет проводить регламентные работы на ИБП, не прекращая работу оборудования.

ИБП класса VFI обеспечивают независимость выходного сигнала от входного, полностью подавляя помехи; это гарантирует достаточный уровень защиты нагрузки по электропитанию в промышленных условиях. Аккумуляторы в этих ИБП используются только при пропадании питания на входном фидере, что обуславливает длительный срок их службы.

Конструктивно ИБП VFI мощностью 600...3000 В·А выполняются как стоечные и настольные, от 3 кВ·А – как стоечные, **настольные**, в виде отдельного шкафа, свыше 10 кВ·А – только в виде отдельного шкафа.

Преимущества:

- ИБП этого класса лучше других приспособлены для работы с внешними батареями;
- только ИБП этого класса могут работать с автономными генераторами.

Недостатки:

- структура VFI применяется только в ИБП мощностью более 500 В·А;

- высокая начальная стоимость.

Позиционирование:

- защита оборудования, требующего очных параметров электропитания: медицинской техники, контрольно-измерительного оборудования;
- защита оборудования в промышленности, в регионах с плохим качеством электропитания.

Характеристики:

- выходной сигнал является синусоидальным, его амплитуда и частота не зависят от входного сигнала;
- защита от всех 10 воздействий.

4.7. Устройства искрозащиты на стабилитронах

На предприятиях химической, угольной, нефтехимической, газовой промышленности для сопряжения контрольно-измерительного оборудования, размещённого во взрывобезопасной зоне, с устройствами и приборами, установленными во взрывоопасных зонах, в качестве разделительных элементов между искробезопасными и искроопасными цепями применяются барьеры искрозащиты на стабилитронах.

Обычно БИС выполнен как единый неразборный блок, залитый компаундом или помещённый в неразборную оболочку, что исключает возможность ремонта или замены элементов его внутреннего монтажа.

БИС состоит из шунтирующих стабилитронов и последовательно включённых резисторов или резисторов и предохранителей. Принцип работы БИС показан на рис. 4.8.

Ток утечки через стабилитроны составляет 10 мкА при условии, что напряжение питания менее 25,5 В. Такой ток является допустимым по величине и не оказывает большого влияния на нагрузку (рис. 4.8, *а*). В случае если напряжение превышает 25,5 В (максимально допустимое значение входного напряжения), стабилитроны начинают проводить ток, который существенно превышает ток утечки и, протекая через стабилитроны, не достигает цепей нагрузки во взрывоопасной зоне (рис. 4.8, *б*). Поэтому рекомендуется применять источник с управляемым напряжением, который поддерживает значение напряжения ниже значения, при котором стабилитроны начинают проводить ток.

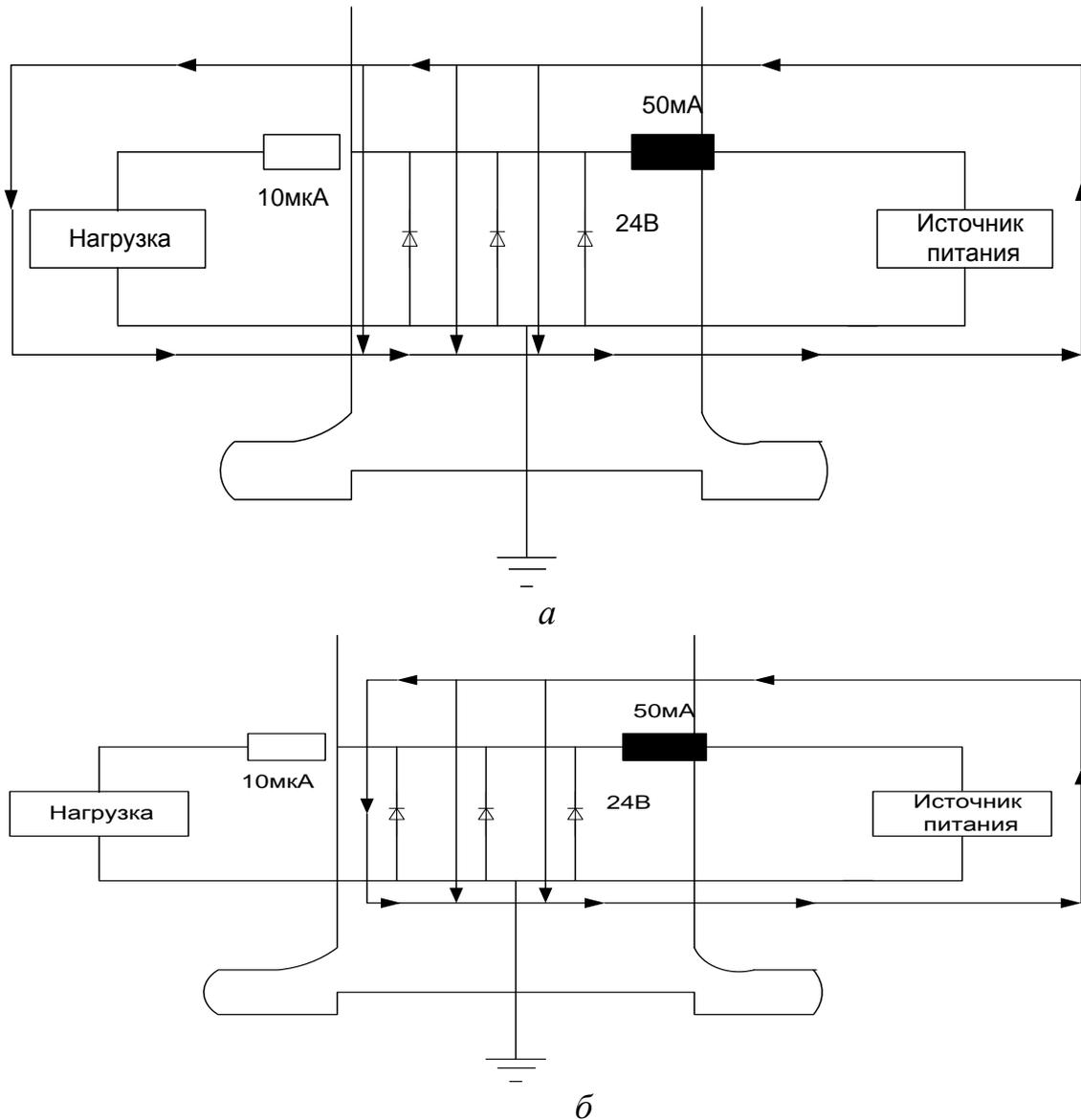


Рис. 4.8. Принцип работы БИС:

а – напряжение питания не превышает допустимый максимум;

б – напряжение питания превысило допустимый максимум

4.8. Электротехнические корпуса и шкафы

Электротехнический корпус – это корпус, предназначенный для защиты от внешних воздействий оборудования произвольной конструкции, в том числе находящегося под электрическим током. Крепление электротехнических шкафов, как правило, осуществляется со стороны задней глухой стенки либо замуровыванием в стену, либо креплением к стене или панели. Возможно закрепление на столбе, а корпуса большого размера могут устанавливаться на горизонтальную поверхность.

Основные отличия электротехнических корпусов от электронных заключаются прежде всего в том, что если корпус для электронного оборудования, как правило, имеет стандартизованные посадочные размеры в соответствии с одним из стандартов, например МЭК/297, и выполняет прежде всего роль несущей конструкции, то в электротехническом корпусе монтаж в основном произвольный (хотя зачастую допускается и стандартный монтаж по МЭК/297 или на **DIN/рельс**), а главное его назначение – это прежде всего защита содержимого от внешних воздействий. Именно поэтому, если степень защиты большинства корпусов электронного оборудования, кроме специального назначения и промышленного, составляет IP20...IP43, степень защиты для электротехнических корпусов составляет от IP55 до IP68. Система IP/кодов описана в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Степень защиты	Защита от твердых тел	Защита от влаги
0	Защита отсутствует	Защита отсутствует
1	Защита от тел диаметром более 50 мм	Защита от вертикально падающих капель воды
2	Защита от тел диаметром более 12 мм	Защита от капель воды, падающих под углом до 15° от вертикали
3	Защита от тел диаметром более 2,5 мм	Защита от дождя, падающего под углом до 60° от вертикали
4	Защита от тел диаметром более 1 мм	Защита от брызг воды, выбрасываемых с произвольного направления
5	Пыль не способна нарушить работу системы	Защита от струи воды, выбрасываемой с произвольного направления
6	Проникновение пыли полностью исключается	Защита от сильной струи воды, выбрасываемой с произвольного направления
7	Не предусмотрено	Защита от воды при погружении на глубину порядка 150 мм
8	Не предусмотрено	Защита от воды при погружении на глубину, определяемую изготовителем

Кроме собственно степени защиты, важным для электротехнических шкафов является применение соответствующих материалов, обеспечивающих им стойкость к различным типам внешних сред, а также требуемую степень изоляции или экранирования.

Пластиковые корпуса серии QLINE

Все корпуса QLINE (рис. 4.9) имеют степень защиты IP66/IP67. Каждый типоразмер корпусов имеет четыре исполнения:

- непрозрачный корпус из поликарбоната;
- корпус из поликарбоната с прозрачной крышкой;
- непрозрачный корпус из ABS;
- корпус из ABS с прозрачной крышкой.

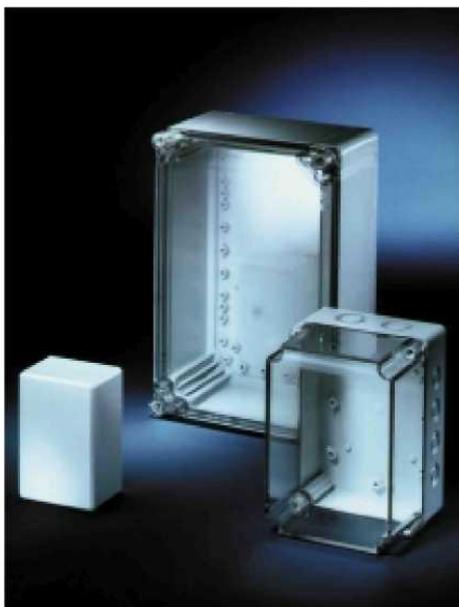


Рис. 4.9. Корпуса серии QLINE

Настенные корпуса из фибerglassа

Широко используются в системах автоматизации настенные корпуса из фибerglassа с шарнирной крышкой серий A/48 и ULTRX (рис. 4.10).



Рис. 4.10. Корпуса из фибerglassа ULTRX и AD48

Фиброгласс (армированное оргстекло) по своим эксплуатационным качествам превосходит уже известный нам поликарбонат, особенно в части стойкости к агрессивным средам. Поэтому корпуса из фиброгласса обычно применяют вне помещений, а также там, где требуется электроизолирующий корпус.

Корпуса серии INLINE из нержавеющей стали

Большой популярностью у инженеров пользуются шкафы серии **INLINE** из нержавеющей стали (рис. 4.11) с крашенными монтажными платами и DIN/ рельсом, доступны также оцинкованные монтажные платы, что бывает необходимо во многих приложениях.



Рис. 4.11. Шкафы серии **INLINE** из нержавеющей стали

Конечно, нержавеющая сталь в 2–3 раза дороже, чем крашеная, но при применении корпусов вне помещений, в химической и пищевой промышленности – это зачастую один из немногих допустимых конструкционных материалов. Следует отметить, что для корпусов **INLINE** из нержавеющей стали доступен тот же набор аксессуаров, что и для стандартной версии.

Шкафы с повышенной электромагнитной защитой

Низковольтное оборудование систем автоматизации (контроллеры, датчики, цифровые средства релейной коммутации) сильно подвержены влиянию помех со стороны силовых цепей. Поэтому актуально использование специальной версии шкафа с повышенной степенью защиты от электромагнитных помех и соответственно излучений (рис. 4.12). Особенностью таких шкафов является применение специального оцинко-

ванного каркаса, а также наличие контактных лепестков на внешних панелях. Это в сочетании со специальной базовой панелью для ввода кабелей обеспечивает сплошное экранирование размещенного внутри оборудования (на уровне 75...55 дБ в диапазоне частот от 30 до 600 МГц).



Рис. 4.12. Шкафы с повышенной степенью защиты от электромагнитных помех и излучений

4.9. Заземление в системах промышленной автоматизации

Неправильное заземление в 40 % случаев является причиной дорогостоящих простоев и порчи чувствительного оборудования. Следствием неправильного заземления могут быть изредка появляющиеся сбои в работе систем, повышенная погрешность измерений, выход из строя чувствительных элементов, замедление работы системы вследствие появления потока ошибок в каналах обмена, нестабильность регулируемых параметров, ошибки в собираемых данных. Вопросы заземления тесно связаны с проблемами экранирования и методами борьбы с помехами в электронных системах.

Под *защитным* заземлением понимают электрическое соединение проводящих частей оборудования с грунтом Земли через заземляющее устройство с целью защиты персонала от поражения электрическим током.

Заземляющим устройством называют совокупность заземлителя (т.е. проводника, соприкасающегося с землёй) и заземляющих проводников.

Общим проводом (проводником) называют проводник в системе, относительно которого отсчитываются потенциалы. Обычно он является общим для источника питания и подключенных к нему электронных устройств. Примером может быть провод, общий для всех 8 входов 8-канального модуля аналогового ввода с одиночными (недифференци-

альными) входами. Общий провод во многих случаях является синонимом земли, но он может быть вообще не соединён с грунтом Земли.

Сигнальным заземлением называют соединение с землёй общего провода цепей передачи сигнала.

Сигнальная земля делится на *цифровую* землю и *аналоговую*. Сигнальную аналоговую землю иногда делят на *землю аналоговых входов* и *землю аналоговых выходов*.

Силовой землей будем называть общий провод в системе, соединённый с защитной землей, по которому протекает большой ток (большой по сравнению с током для передачи сигнала).

Виды заземлений

Одним из путей ослабления вредного влияния цепей заземления на системы автоматизации является раздельное выполнение систем заземлений для устройств, имеющих разную чувствительность к помехам или являющихся источниками помех разной мощности. Раздельное исполнение заземляющих проводников позволяет выполнить их соединение с защитной землёй в одной точке. При этом разные системы земель представляют собой лучи звезды, центром которой является контакт к шине защитного заземления здания.

Силовое заземление

В системах автоматизации могут использоваться электромагнитные реле, микромощные серводвигатели, электромагнитные клапаны и другие устройства, ток потребления которых существенно превышает ток потребления модулей ввода/вывода и контроллеров. Цепи питания таких устройств выполняют отдельной парой свитых проводов (для уменьшения излучаемых помех), один из которых соединяется с шиной защитного заземления. Общий провод такой системы (обычно провод, подключенный к отрицательному выводу источника питания) является силовой землёй.

Аналоговая и цифровая земля

Системы промышленной автоматизации являются аналого-цифровыми. Поэтому одним из источников погрешностей аналоговой части является помеха, создаваемая цифровой частью системы. Для исключения прохождения помех через цепи заземления цифровую и аналоговую землю выполняют в виде несвязанных проводников, соединённых вместе только в одной общей точке. Для этого модули ввода/вывода и промышленные контроллеры имеют отдельные выводы аналоговой (*AGND*) и цифровой земли (*DGND*).

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев Э. Автоматизированная система управления движением в городе // Современные технологии автоматизации. – 2000. – № 2. – С. 14–17.
2. Архангельский А.Я. Приемы программирования в Delphi. Версии 5–7. – М.: Бинном, 2003. – 784 с.
3. А.с. 2003611201 РФ: программа построения кубического сплайна дефекта 1 / В.Г. Букреев, Н.В. Гусев // Роспатент. Опубл. 23.05.03.
4. http://www.computerinform.ru/inform15_97/f1.htm
5. Хухлаев Е. Операционные системы реального времени и Windows NT // Открытые системы. – 1997. – № 5. – С. 48–51.
6. <http://ncsystems.ru>
7. http://www.fizmat.vspu.ru/citforum/operating_systems/rtx/index.html
8. Жданов А. NT – реально ли реальное время? // Открытые системы. – 1998. – №1. – С. 25–29.
9. Макарьев К. Разрешите представить: RTWin // СТА. – 1998. – № 3. – С. 48–53.
10. Bollinger J.G., Duffie N.A. Computer Control of Machines and Processes. – Addison-Wesley, 1989.
11. Демидов С.В., Авдушев С.А., Дубников А.М. и др. Электромеханические системы управления тяжелыми металлорежущими станками. – Л.: Машиностроение, 1986. – 236 с.
12. Дробышев В.И., Дымников В.П., Ривин Г.С. Задачи по вычислительной математике. – М.: Наука, 1980. – 440 с.
13. Калиткин Н.Н., Кузьмина Л.В. Об естественных интерполяционных сплайнах // Математическое моделирование. – 1994. – № 4. – С. 75–110.
14. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. – М.: Наука, 1980. – 376 с.
15. Карманов В.Г. Математическое программирование. – М.: Наука, 1986. – 440 с.
16. Букреев В.Г., Гусев Н.В., Макеев Е.В. Моделирование многосвязных исполнительных следящих электроприводов в среде Matlab 6 // IV Всероссийская научно-техническая конференция «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях». – Бийск: АлтГТУ, 2003. – С. 16–20.
17. Калиткин Н.Н., Кузьмина Л.В. Среднеквадратичная аппроксимация сплайнами // Математическое моделирование. – 1997. – №9. – С. 107–117.
18. Гусев Н.В. Разработка цифроаналогового следящего электропривода на базе процессорного модуля Fastwel CPU686E // Международная научно-техническая конференция «Измерение, контроль, информатизация». – Барнаул: АлтГТУ, 2005. – С. 124–126.
19. Иванов В.А., Ющенко А.С. Теория дискретных систем автоматического управления: учебное пособие. – М.: Наука, 1983. – 335 с.
20. Корытин А.М., Петров Н.К., Радимов С.Н., Шапарев Н.К. Автоматизация типовых технологических процессов и установок: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 432 с.

Учебное издание

ГУСЕВ Николай Владимирович
ЛЯПУШКИН Сергей Викторович
КОВАЛЕНКО Михаил Васильевич

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ
И СИСТЕМ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Учебное пособие

Научный редактор *А.С. Каракулов*

Редактор

Верстка

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати Формат 60×84/16.

Бумага «Снегурочка». Печать Хероx.

Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 13,48.

Заказ . Тираж экз.



Национальный исследовательский
Томский политехнический университет
Система менеджмента качества

Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru