

А. Е. Медведев А. В. Чупин

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Учебное пособие

Кемерово 2009

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Кузбасский государственный технический университет»

А. Е. Медведев А. В. Чупин

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Учебное пособие

Кемерово 2009

УДК 681.5

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Кафедра автоматизации производственных процессов института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой автоматизации исследований и технической кибернетики В. Я. Карташов (Кемеровский государственный университет)

Медведев, А. Е. Автоматизация производственных процессов : учеб. пособие / А. Е. Медведев, А. В. Чупин ; Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2009. – 325 с.

ISBN 978-5-89070-696-6

Учебное пособие подготовлено в соответствии с рабочей программой дисциплины «Автоматизация производственных процессов» для студентов специальности 140604 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов».

Рассмотрены основы компьютерной автоматизации промышленного производства, включающие в себя структуры АСУ ТП и интегрированных систем управления производством, принципы организации связи программируемых средств автоматизации и программного обеспечения контроллерного и диспетчерского уровней управления в АСУ ТП.

Изложены задачи и системы автоматизации основных технологических процессов и установок в горном, строительном, химическом и машиностроительном производствах, а также вспомогательных процессов – производства пара и сжатого воздуха.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Кузбасского государственного технического университета.

УДК 681.5

© Кузбасский государственный
технический университет, 2009

ISBN 978-5-89070-696-6

© Медведев А. Е., Чупин А. В., 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
ЧАСТЬ 1. ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	9
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОД- СТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ	9
1.1. Тенденции развития систем промышленной автоматиза- ции.....	9
1.2. Интегрированные системы управления производством	13
1.3. Характеристика объектов автоматизации и методы их иден- тификации.....	15
1.4. Автоматизированные системы управления технологически- ми процессами (АСУ ТП)	30
1.4.1. Структура и технические средства АСУ ТП	30
1.4.2. Технология обмена данными в АСУ ТП.....	36
1.4.3. Пример АСУ ТП.....	40
2. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СВЯЗИ ПРОГРАММИРУЕ- МЫХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ.....	51
2.1. Цифровой канал передачи информации	51
2.2. Линии связи	56
2.3. Интерфейсы проводных каналов связи.....	62
2.4. Промышленные сети	68
2.4.1. Общие положения	68
2.4.2. Структура и активные элементы промышленной сети.....	74
2.4.3. Краткая характеристика протоколов промышленных се- тей	77
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АСУ ТП.....	84
3.1. Первичная обработка измерительной информации.....	84
3.1.1. Схема преобразования измерительной информации в контроллере	84
3.1.2. Перекалибровка каналов АЦП.....	88
3.1.3. Определение периода опроса каналов.....	89
3.1.4. Определение зоны возврата для исключения «дребезга» и формирование событий для аналоговых переменных	90
3.1.5. Фильтрация сигналов измерительной информации.....	92
3.1.6. Масштабирование и линеаризация	93
3.1.7. Алгоритмический контроль достоверности сигналов из- мерительной информации	97

3.1.8. Обработка дискретной информации.....	100
3.1.9. Определение апертуры	101
3.2. Состав программного обеспечения современных систем автоматизации.....	101
3.3. Программное обеспечение нижнего (контроллерного) уровня в АСУ ТП.....	103
3.3.1. Характеристика языков программирования стандарта IEC 61131-3	104
3.3.2. Краткая характеристика инструментальной системы ISaGRAF	117
3.3.3. Последовательность разработки программного обеспечения контроллера.....	119
3.4. Программное обеспечение верхнего (диспетчерского) уровня в системе управления	120
3.4.1. Состав программного обеспечения верхнего уровня.....	120
3.4.2. Общая характеристика SCADA-систем	122
3.4.3. SCADA-система <i>Trace Mode</i>	130
3.4.4. SCADA-система <i>Genie 3.0</i>	137
ЧАСТЬ 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТИПОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И УСТАНОВОК В ПРОМЫШЛЕННОСТИ.	141
1. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ БУРЕНИЯ И ЭКСКАВАЦИИ.....	141
1.1. Автоматизация процессов бурения	141
1.1.1. Основные направления и эффективность автоматизации процессов бурения	141
1.1.2. Буровой процесс как объект автоматизации.....	142
1.1.3. Критерии оптимального управления бурением.....	143
1.1.4. Системы автоматизации процесса бурения карьерных шарошечных станков	145
1.2. Автоматизация процессов экскавации.....	155
1.2.1. Основные направления автоматизации карьерных экскаваторов	155
1.2.2. Автоматическое управление процессом копания мехлопатой с неповоротным ковшом	156
1.2.3. САУ копанием механической лопатой с поворотным ковшом	160
1.2.4. Компьютерная система управления процессом экскавации мехлопатой.....	163

1.2.5. Программное управление прямым переносом ковша драглайна	175
1.2.6. Автоматизация роторных экскаваторов	179
2. АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА	194
2.1. Основные направления и эффективность автоматизации конвейерного транспорта	194
2.2. Автоматическое регулирование загрузки ленточных конвейеров	195
2.3. Автоматическое регулирование натяжения лент конвейеров	200
2.4. Системы дистанционно-автоматического управления конвейерными линиями	202
3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ДРОБЛЕНИЯ И СОРТИРОВКИ	216
3.1. Задачи автоматизации процессов дробления и сортировки	216
3.2. Автоматическое регулирование процесса дробления	217
3.3. Автоматизация процесса сортировки	222
3.4. Автоматическая оптимизация дробильно-сортировочного процесса	228
4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СЫРЬЕВЫХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ	231
4.1. Автоматизация процессов приготовления сырьевой смеси в производстве цемента	231
4.1.1. Технологические основы и задачи автоматизации	231
4.1.2. Технологический контроль работы сырьевой мельницы	233
4.1.3. Автоматическое управление процессом приготовления смеси	234
4.2. Автоматизация процессов приготовления бетонных смесей	240
4.2.1. Автоматическое управление бетоносмесительной установкой циклического действия	240
4.2.2. АСУ бетоносмесительным узлом	243
5. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ДОЗИРОВАНИЯ И ВЗВЕШИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ	247
5.1. Автоматическое управление дозаторами непрерывного действия	247
5.1.1. Дозаторы с управлением по массе	247
5.1.2. Дозаторы с управлением по производительности	249

5.2. Автоматическое управление дозаторами дискретного действия	251
5.3. Автоматические конвейерные весы	255
5.4. Автоматические вагонные весы	258
6. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	260
6.1. Автоматизация процессов обжига и охлаждения клинкера.	260
6.2. Автоматизация процесса сушки добавок к цементу в сушильном агрегате с прямоточным сушильным барабаном	264
6.3. Автоматизация процесса сушки материала в ленточной конвейерной сушилке	268
6.4. Автоматизация пропарочных камер	270
7. АВТОМАТИЗАЦИЯ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	278
7.1. Автоматизация процесса ректификации	278
7.2. Автоматизация процесса абсорбции	281
8. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ.	286
8.1. Общие положения	286
8.2. Автоматическое управление режимами металлообработки.	287
8.3. Следящие копировальные системы металлорежущих станков	290
8.4. Системы ЧПУ в металлообработке	292
9. АВТОМАТИЗАЦИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ	297
9.1. Автоматизация парокотельных установок	297
9.1.1. Общие положения	297
9.1.2. Автоматизация питания котлов	298
9.1.3. Автоматизация процесса горения	302
9.2. Микропроцессорная система автоматизации водогрейной угольной котельной	307
9.3. Автоматизация процесса производства сжатого воздуха	311
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	323

ПРЕДИСЛОВИЕ

Переход к микропроцессорному управлению технологическими процессами и оборудованием кардинально изменил представление и содержание принципов и основ автоматизации промышленного производства. Современные автоматизированные системы управления технологическими процессами носят характер распределенных (территориально и функционально) систем управления, в которых в качестве узловых станций используются промышленные ПЭВМ или рабочие станции, операторские терминалы, программируемые контроллеры, серверы и др., а датчики и исполнительные устройства все чаще являются интеллектуальными устройствами, осуществляющими получение, обработку и преобразование информации в цифровой сигнал в месте их установки. Цифровая передача данных (цифровая связь) между отдельными устройствами автоматики сделала вычислительную сеть основой построения систем управления.

Усложнение законов управления высокотехнологичными процессами (развитие ситуационных и экспертных способов управления, нечеткое и нейросетевое регулирование, адаптивное управление) привело к использованию современных компьютерных технологий в системах автоматизации промышленного производства.

В соответствии с вышеизложенным авторы попытались дать в учебном пособии представление об основах компьютерной автоматизации производства и более детально рассмотреть принципы и системы автоматизации типовых технологических процессов и установок применительно к таким отраслям промышленности, как горная, строительная, химическая и машиностроительная.

Учебное пособие включает материал, составленный на основе лекций, читаемых авторами в Кузбасском государственном техническом университете по курсу «Автоматизация производственных процессов».

Учебное пособие состоит из двух частей. В первой части пособия рассматриваются основные компоненты компьютерной автоматизации промышленного производства, в частности:

а) общие положения по автоматизации производственных процессов (тенденции развития систем промышленной автоматизации, интегрированные системы управления производством, характеристика объектов автоматизации и методы их идентификации, автоматизированные системы управления технологическими процессами); б) техническое обеспечение связи программируемых средств автоматизации (цифровые каналы и линии связи, интерфейсы проводных каналов, промышленные сети); в) математическое и программное обеспечение АСУ ТП (первичная обработка измерительной информации, состав программного обеспечения систем автоматизации, краткая характеристика языков и систем программирования, программное обеспечение нижнего (контроллерного) и верхнего (диспетчерского) уровней управления в АСУ ТП).

Во второй части пособия рассматриваются основные направления, принципы и системы автоматизации как основных производственных процессов в различных отраслях промышленности, в частности: а) процессов бурения, экскавации и транспортирования в горном производстве; б) процессов дробления, сортировки, приготовления смеси, дозирования, взвешивания, тепловой обработки материалов и изделий в строительной индустрии; в) массообменных процессов в химической промышленности; г) процессов металлообработки в машиностроении, так и вспомогательных процессов в промышленном производстве, в частности процессов получения пара и производства сжатого воздуха, а также описываются компьютерные системы управления экскаватором-мехлопатой, карьерным буровым станком, конвейерной линией, бетоносмесительным цехом, угольной котельной, компрессорной станцией и системы ЧПУ металлорежущими станками.

Авторы выражают благодарность студентам группы ЭА-051 ГУ КузГТУ М. С. Судакову и В. А. Деменкову за помощь в оформлении учебного пособия.

ЧАСТЬ 1. ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

1.1. Тенденции развития систем промышленной автоматизации

Развитие отечественных компьютерных систем промышленной автоматизации (автоматизированных систем управления технологическими процессами – АСУ ТП) можно разделить на три крупных этапа. Первый этап создания АСУ ТП связан с использованием ЭВМ первого поколения, таких как «Урал», «УМ-Г», «Минск». На втором этапе применялись аналоги мэйнфреймов *IBM* (*ЕС ЭВМ*), клоны мини-компьютеров фирмы *DEC* (*СМ ЭВМ*). Системы управления на этих этапах имели централизованную структуру и в большинстве случаев не обеспечивали достаточного быстродействия, т.е. работы системы в режиме реального времени. Компьютеры того времени из-за несовершенства элементной базы и программного обеспечения характеризовались низкой надежностью, что приводило к их частым сбоям. Успехи

в микроэлектронике, появление микропроцессоров революционизировали в начале 80-х гг. технику построения систем управления и открыли третий этап компьютеризации промышленного производства. Микропроцессоры стали входить в состав отдельных средств автоматики и контроля. Цифровая передача данных между отдельными устройствами сделала вычислительную сеть основой построения систем управления. Системы управления технологическим процессом новой структуры, предусматривающей цифровую связь между отдельными устройствами обработки данных, получили название децентрализованных или распределенных АСУ ТП.

С начала 80-х гг. ведущие мировые производители средств автоматизации начали выпускать наборы программно-

аппаратных средств для построения АСУ ТП. Основными признаками таких наборов является их совместимость, способность функционировать в единой системе, стандартизация интерфейсов, функциональная полнота, позволяющая строить целиком АСУ ТП из средств только данного набора. Такие наборы средств получили название программно-технических комплексов (ПТК).

Начало 90-х гг. характеризуется следующим этапом в развитии систем управления. Для России этот период связан с открытием межгосударственных и экономических границ, что дало возможность отечественным специалистам активно использовать в области автоматизации самые передовые компьютерные индустриальные технологии и средства автоматизации.

Современные высокотехнологичные процессы, направленные на получение конкурентоспособной продукции, отличаются большой сложностью, с одной стороны, и малоизученностью – с другой. Степень неопределенности знаний о процессе зачастую не позволяет в полной мере использовать классические методы и законы управления. В связи с этим получили развитие ситуационные и экспертные системы управления, нечеткие и нейросетевые регуляторы и системы, робастные и адаптивные методы управления. Все это привело к усложнению законов управления и, как следствие, использованию современных компьютерных технологий в автоматизированных системах управления. Создание таких систем невозможно без современной микропроцессорной и компьютерной техники. Поэтому в последние годы появились десятки-сотни типов контроллеров, специальных ПК, интеллектуальных терминалов и рабочих станций для жестких условий эксплуатации в промышленности.

Дальнейшей интеграции средств вычислительной техники для совместного использования в структуре систем управления способствовала выработка Международных стандартов на протоколы передачи данных, способы кодирования информации, техническое и программное обеспечение систем управления под эгидой *ISO (International Organization for Standardization)* – Международной организации по стандартизации.

Для решения всего комплекса задач управления предприятием важнейшую роль играют локальные вычислительные сети (ЛВС) верхнего и нижнего уровней. В современном производстве

промышленные сети объединяют датчики, исполнительные механизмы, контроллеры и рабочие станции, обеспечивая широкие возможности сбора, обработки, визуализации и хранения информации, а также диагностики оборудования. В свете последних рекомендаций в качестве промышленной сети для связи рабочих станций операторов, инженеров, технологов предлагается использовать сеть *Industrial Ethernet*. Для связи контроллеров в настоящее время широко используются сети *Modbus +*, *Profibus DP*, *CAN*, *Interbus*, *DeviceNet* и др. Дальнейшая интеграция промышленных сетевых технологий с сетью *Ethernet* делает эту сеть доминирующей в структуре систем управления.

В части программного обеспечения операторских рабочих станций для создания операторского интерфейса используются различные SCADA-системы (*Supervisory Control And Data Acquisition*). К ним относятся *InTouch* (фирма *Wonderware*), *iFIX* (*Intellution*), *Genesis32* (*Iconics*), *Trace Mode* (*AdAstra Research Group, Ltd*) и др. Совершенствование SCADA-систем идет в направлении развития технологии *OPC* (*OLE for Process Control*), признанной в качестве стандартного механизма взаимодействия программного обеспечения АСУ ТП, основанного на объектной модели *COM/DCOM* фирмы *Microsoft*, поддержки *Internet* и беспроводных телекоммуникаций.

Таким образом, среди основных тенденций развития систем и средств промышленной автоматизации можно выделить следующие.

Повсеместное распространение промышленных сетей для «полевых» устройств. В качестве «полевых» устройств выступают цифровые датчики и преобразователи, исполнительные механизмы, устройства частотно-регулируемого привода и другое оборудование. По этим устройствам основной тенденцией является постоянное повышение встроенного «интеллекта». Первые цифровые устройства обеспечивали обычное преобразование аналогового сигнала в цифровой для передачи в сеть. Сейчас функции таких устройств все более усложняются, начиная от решения задач сложной обработки нескольких сигналов одновременно (многопараметрические датчики), встроенной калибровки, самодиагностики и заканчивая решением все более актуальной задачи технического обслуживания по фактическому состоянию,

например, путем вычисления износа движущихся частей (для исполнительных механизмов).

В ближайшее время в области цифровых «полевых» устройств следует ожидать принципиально важного скачка – создания «полевых» регуляторов, т.е. цепочка «датчик – преобразователь – регулятор – преобразователь – исполнительный механизм» будет замкнута непосредственно на самом объекте, не выходя за территорию технологического агрегата, установки. Такое решение позволит осуществить достаточно революционный переход

к созданию подлинно распределенных систем управления (в настоящее время распределенность, как правило, означает географическое распределение компонентов системы, в то время как функции регулирования все равно реализуются – вычисляются в центральном процессорном модуле ПЛК). Появление систем управления подобной архитектуры обеспечит существенное увеличение надежности и живучести АСУ ТП, снизит стоимость контроллерной части системы за счет уменьшения потребности в модулях ввода/вывода, а также резко сократит потребность во все более дорожающей кабельной продукции.

Важной и обнадеживающей тенденцией является появление новейших моделей цифровых датчиков с радиовыходом. Это решение несет в себе много преимуществ, начиная от экономии кабеля и заканчивая кардинальным сокращением капитальных затрат на создание систем управления. Однако разработчикам еще предстоит решить ряд проблем, связанных с помехоустойчивостью, защищенностью информации от несанкционированного доступа, выработкой международных стандартов.

Важной тенденцией, настоятельно диктуемой пользователями систем автоматизации, является необходимость интеграции в масштабах одного предприятия в единую информационную систему АСУ ТП и разнообразных систем учета энергоресурсов, создание автоматизированных систем управления электротехническим оборудованием.

1.2. Интегрированные системы управления производством

Современная АСУ ТП обязательно должна предусматривать связь с корпоративными автоматизированными системами управления предприятием (АСУП), которые в современной терминологии называются как *ERP*-системы (*Enterprise Resource Planning*) – планирование ресурсов предприятия или как *MRP*-системы (*Manufacturing Resource Planning*) – планирование ресурсов производства. Системы *ERP* ориентированы на предприятие в целом, а *MRP* – на его технологические подразделения. Основу программного обеспечения диспетчерского уровня управления АСУ ТП составляет *SCADA*-система, реализующая все основные функции визуализации контролируемой информации, передачи данных и команд системе контроля и управления технологическим объектом. Система контроля и управления представляет собой совокупность программируемых логических контроллеров (*PLC*), связанных между собой и диспетчерским уровнем управления цифровыми каналами связи. Нижний уровень данной системы включает в себя датчики, исполнительные устройства (*I/O*). Между *SCADA* и *ERP* присутствует промежуточная группа систем, называемая *MES*-системами (*Manufacturing Execution Systems*). Одна из причин возникновения таких систем – попытка выделить задачи управления производством на уровне технологического подразделения, т.е. отделение тактических задач оперативного управления технологическими процессами от стратегических задач ведения процесса в целом.

Таким образом, современные интегрированные системы управления (рис. 1.1) строятся по принципу пирамиды и охватывают весь цикл работы предприятия от систем управления нижнего уровня до систем управления предприятия в целом.

Опыт показал, что информационная база задач бизнес уровня (*ERP*), административного (*MES*) и диспетчерского уровня (*SCADA*) должна быть единой. Все большее число фирм (*OSI Soft*, *Siemens*, *Iconics* и ряд др.) поставляет на рынок промышленной автоматизации законченные решения по автоматизации техноло-

гических процессов и предприятия в целом, обеспечивая как горизонтальную, так и вертикальную интеграцию вычислительных ресурсов с использованием единой базы данных (сервера) для решения всего комплекса задач управления предприятием. Клиент-серверная технология позволяет разделить клиентские части задач управления и планирования производства на два уровня: предприятия и цеха. Теперь можно использовать общие серверы базы данных и приложений, а клиентские места распределить по цехам и заводууправлению.

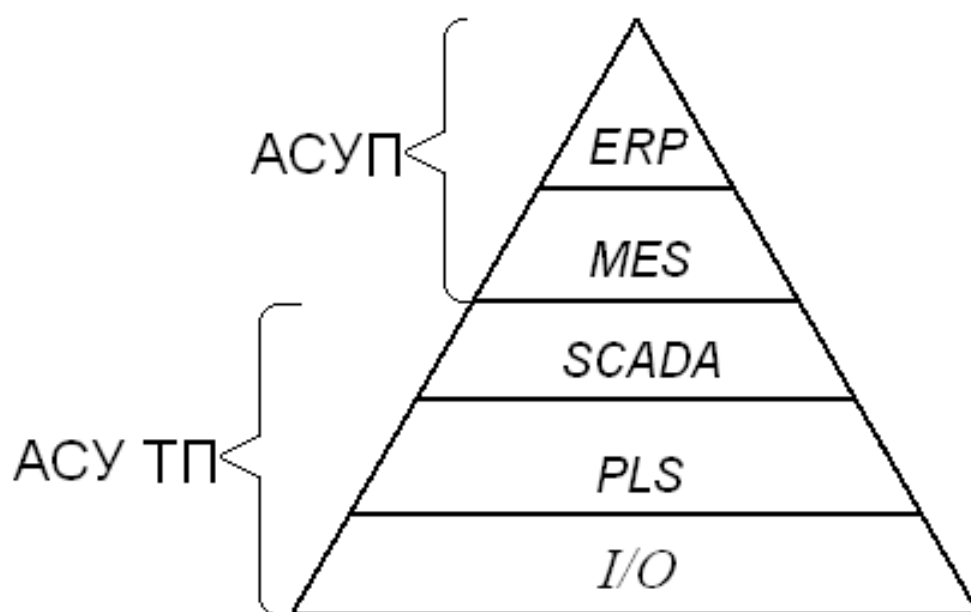


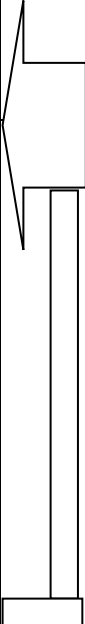
Рис. 1.1. Упрощенная структура интегрированных систем управления

Таким образом, сервер единой базы данных становится ядром интегрированной системы управления предприятием в целом. Данное положение показано в табл. 1.1. В современных интегрированных системах, в большинстве случаев, на бизнес уровне выделяется подсистема *СРМ* – планирование бюджета, контроль и учет финансовых потоков, расчет себестоимости, а на административном уровне подсистема *ЕАМ* – управление основными фондами, предназначенные для комплексной автоматизации процессов эксплуатации, технического обслуживания, ремонта оборудования в режиме реального времени. *DCS* – распределенная система, обеспечивающая автоматический контроль,

управление и регулирование на нижнем уровне управления технологическим объектом.

Таблица 1.1

Иерархия систем управления производственными процессами

Тип системы		Название системы	Уровни иерархии
<i>ERP</i> (<i>MRP</i>) <i>CPM</i>		• Планирование ресурсов предприятия • Планирование бюджета, контроль и учет финансовых потоков, расчет себестоимости	Бизнес уровень
<i>MES</i> <i>EAM</i>		Сервер реального времени	Административный уровень
<i>SCADA</i>			Диспетчерский уровень
<i>DCS</i>			Уровень управления технологическим объектом

1.3. Характеристика объектов автоматизации и методов их идентификации

Структура систем управления, перечень решаемых задач во многом определяется особенностями объекта автоматизации. В зависимости от характера протекающих в них технологических процессов все объекты автоматизации можно разбить на непрерывные и дискретные. К непрерывным объектам относятся тех-

нологические процессы и производства, в которых материальные и энергетические потоки, выходящие, поступающие и циркулирующие в самой производственной системе, не прерываются во времени. Непрерывные процессы могут протекать как длительные промежутки времени (до года и более), так и короткие (смена, сутки). Основной задачей управления данными объектами является поддержание работы технологического оборудования и хода протекания процесса в определенных (оптимальных) режимах, регламентированных технологическими документами. К дискретным объектам относятся процессы с конечным числом состояний механизмов, устройств, машин. Наиболее характерным примером дискретного объекта автоматизации является машиностроительное производство, в котором производственный процесс представляет собой совокупность последовательных технологических операций, смена которых производится по командам человека-оператора или автоматического устройства. При создании автоматизированных систем управления непрерывными производственными процессами достаточно часто необходимо решать задачи дискретного характера, например: задачи пуска-останова оборудования, перевода в другой режим работы и т.д. В периодических процессах, которые можно отнести к дискретным объектам, в определенные периоды времени необходимо решать задачи непрерывного характера.

Обобщенная модель управления непрерывным производственным процессом показана на рис. 1.2. Она включает в себя объект управления ($ОУ_{нп}$) и устройство управления ($УУ$). На вход объекта управления поступают три группы воздействий: контролируемые возмущающие воздействия (вектор $\bar{X}$), неконтролируемые возмущающие воздействия (вектор $\bar{f}$), управляющие воздействия, формируемые устройством управления (вектор $\bar{U}$). Состояние объекта управления характеризуется вектором параметров состояния ($\bar{Y}$). В его состав могут входить как технологические переменные (температура, давление и т.д.), так и объемы выпуска продукции, ее показатели качества, экономические критерии функционирования объекта. На вектор параметров состояния объекта оказывают влияние все перечисленные группы воздействий. При этом управляющие воздействия формируются

исходя из величины и характера отклонения параметров состояния объекта от вектора задающих воздействий ($\bar{Q}$) с учетом величины вектора контролируемых возмущающих воздействий.

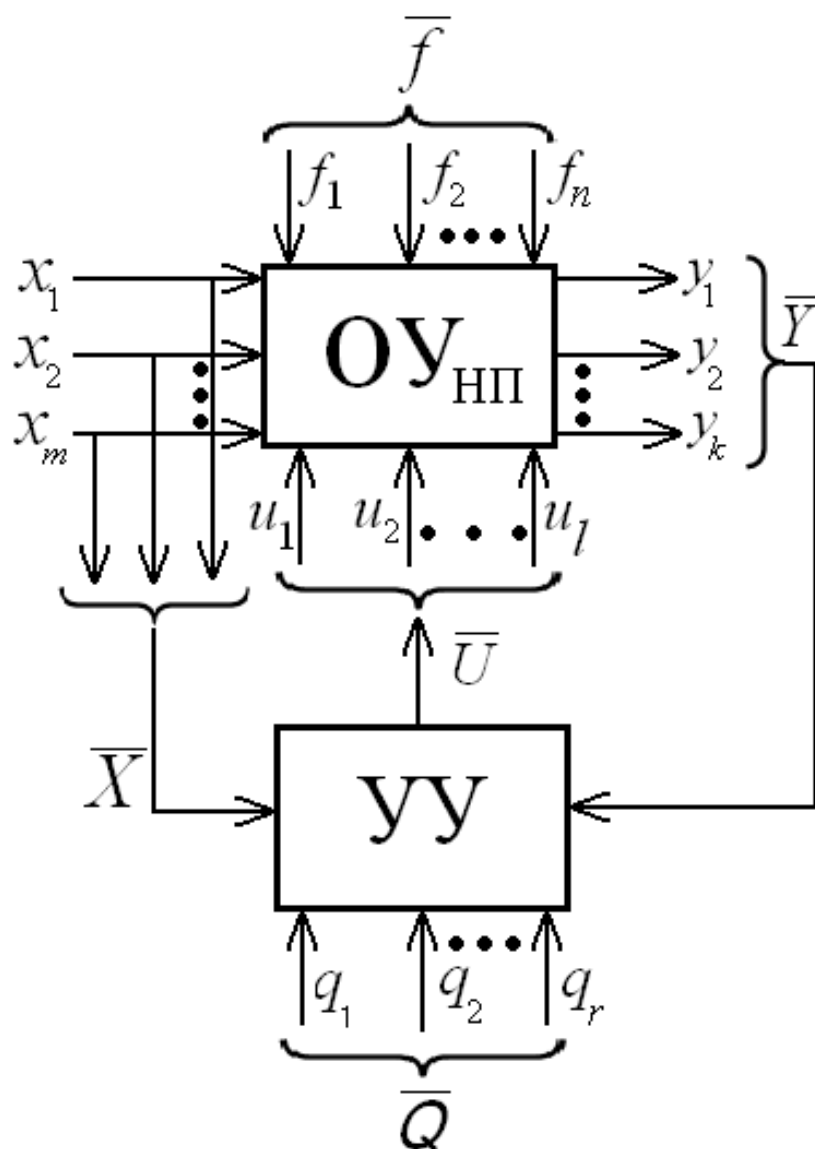


Рис. 1.2. Структура обобщенной модели управления непрерывным производственным объектом

Достаточно часто задача управления объектом с непрерывным технологическим процессом формулируется как задача оптимального управления этим объектом. В этом случае необходимо сформулировать критерий оптимальности, характеризующий эффективность протекающего в объекте процесса (1.1), задать ограничения на параметры состояния объекта и вектор управля-

ющих воздействий (1.2) и разработать математическую модель объекта управления (1.3), позволяющую вычислять параметры состояния объекта при определенных значениях управляющих и контролируемых возмущающих воздействий:

$$J = F(\bar{Y}, \bar{U}) \rightarrow \min(\max); \quad (1.1)$$

$$\left. \begin{array}{l} \bar{y}_i \leq y_{iM} \\ \bar{u}_j \leq u_{jM} \end{array} \right\}, \quad (1.2)$$

где $i = 1, 2, \dots, k$; $j = 1, 2, \dots, l$;

$$Y(t) = \Phi(\bar{U}, \bar{X}, \bar{Y}_0), \quad (1.3)$$

где y_{iM} , u_{jM} – предельно допустимые значения соответствующих переменных;

$\bar{Y}_0$ – начальные значения параметров вектора состояния.

После формирования выражений (1.1)–(1.3) задача оптимального управления непрерывным технологическим процессом формулируется следующим образом: необходимо найти такой вектор управляющих воздействий, который позволит получить экстремальное значение критерия оптимальности (1.1) без нарушения ограничений (1.2).

Одной из основных задач, решаемых при создании систем автоматического управления, является задача идентификации объекта управления, т.е. задача определения структуры и параметров математической модели, обеспечивающих наилучшую близость значений выходных переменных модели и объекта при одних и тех же входных воздействиях. Характер и вид математической модели определяется целями и задачами управления, в которых она будет использоваться. При решении задач управления несложными объектами (при регулировании технологических переменных) обычно используются линейные стационарные модели, хотя все объекты в той или иной мере обладают свойствами нелинейности, нестационарности, распределенности, стохастичности. Использование простых операторов преобразования входных переменных в выходные позволяет существенно упростить

решение последующих задач анализа и синтеза систем управления.

Для решения задач идентификации разработано большое число методов, учитывающих особенность объектов, условия их функционирования, математическую основу анализа данных, вид модели и т.д. С практической точки зрения привлекательны экспериментальные методы, позволяющие находить модели объектов управления по результатам измерения входных и выходных переменных объекта. Эти методы предполагают наличие априорных сведений об изучаемом объекте, однако их характер и объем могут быть не столь обстоятельными, как при аналитических методах построения моделей. Как правило, уровень априорных сведений должен быть достаточным для выбора структуры модели и условий проведения эксперимента.

Последовательность решения задачи идентификации при использовании данных методов можно разбить на три этапа:

- 1) выбор структуры модели по результатам изучения объекта или по имеющимся априорным сведениям;
- 2) выбор критерия близости (подобия) модели и объекта;
- 3) определение параметров модели по экспериментальным данным исходя из выбранного критерия близости.

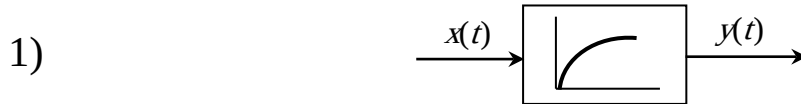
Первые два этапа решения задачи являются плохо формализуемыми процессами, и на выбор структуры модели оказывает влияние субъективный фактор. Очевидно, что в этом случае эффективность последующей параметрической идентификации во многом будет определяться тем, насколько удачно была выбрана структура модели и критерий близости. Следует заметить, что первые два этапа также могут быть формализованы, если для получения удовлетворительного решения использовать итеративную процедуру, в которой на каждом шаге итерации будет производиться корректировка структуры модели и/или изменяться критерий.

При создании систем автоматического регулирования выбор структуры модели можно осуществлять из четырех типов моделей для статических объектов и четырех – для астатических объектов. Дальнейшее повышение порядка дифференциальных уравнений, как отмечается в источнике, не дает значительного повышения точности получаемых результатов, что связано прежде

всего с накоплением погрешности вычислений при определении постоянных величин производных высокого порядка.

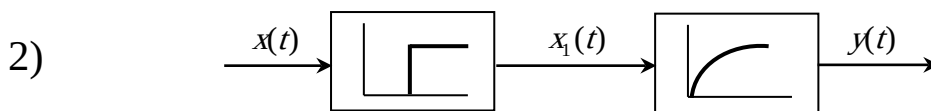
Рекомендуемые типы моделей имеют следующую структуру и математическое описание:

Статические объекты



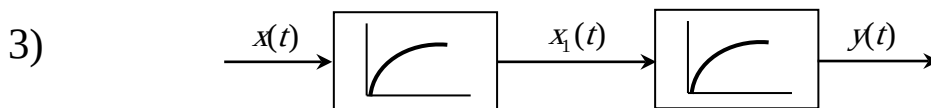
$$T \frac{dy}{dt} + y(t) = K \cdot x(t);$$

$$W(P) = \frac{K}{T \cdot P + 1};$$



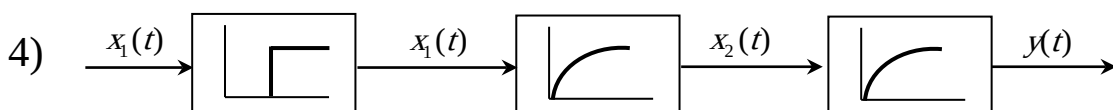
$$T \frac{dy}{dt} + y(t) = K \cdot x(t - \tau);$$

$$W(P) = \frac{K}{T \cdot P + 1} \cdot e^{-\tau P};$$



$$T_1 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_2 \frac{dy}{dt} + y(t) = K \cdot x(t);$$

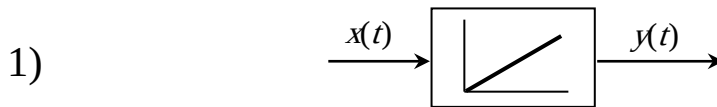
$$W(P) = \frac{K}{T_1 \cdot P^2 + T_2 \cdot P + 1};$$



$$T_1 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_2 \frac{dy}{dt} + y(t) = K \cdot x(t - \tau);$$

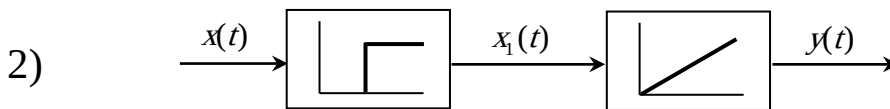
$$W(P) = \frac{K}{T_1 \cdot P^2 + T_2 \cdot P + 1} \cdot e^{-\tau P}.$$

Астатические объекты



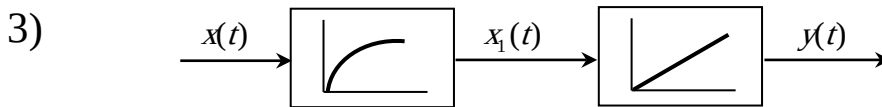
$$y(t) = \frac{1}{T_\varepsilon} \cdot \int_0^t x(t) dt \quad \text{или} \quad \frac{dy(t)}{dt} = K_a \cdot x(t), \quad \text{где} \quad K_a = \frac{1}{T_\varepsilon};$$

$$W(S) = \frac{K_a}{P};$$



$$\frac{dy(t)}{dt} = K_a \cdot x(t - \tau);$$

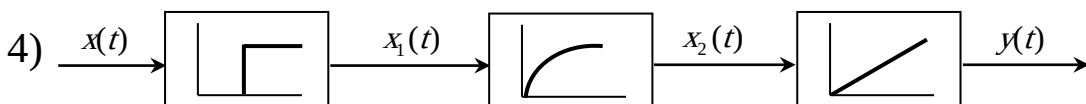
$$W(P) = \frac{K_a}{P} \cdot e^{-\tau P};$$



$$T_0 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = \frac{1}{T_\varepsilon} \cdot \int_0^t x(t) dt;$$

$$T_0 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{dy(t)}{dt} = K_a \cdot x(t);$$

$$W(P) = \frac{K_a}{P \cdot (T_0 \cdot P + 1)};$$



$$T_0 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{dy(t)}{dt} = K_a \cdot x(t - \tau);$$

$$W(P) = \frac{K_a}{P \cdot (T_0 \cdot P + 1)} \cdot e^{-\tau P}.$$

Критерий близости (в ряде источников функция невязки) должен удовлетворять следующим требованиям:

- он не должен принимать отрицательных значений;
- его минимум должен соответствовать решению поставленной задачи.

Этот минимум должен быть близок к нулю (в идеале равен нулю) при совпадении экспериментальных результатов с результатами, полученными с помощью модели.

Наиболее простым критерием, удовлетворяющим этим требованиям, является критерий:

$$q_1(t) = |y(t) - y^m(t)| = \sum_{i=1}^n |y_i - y_i^m|, \quad (1.4)$$

где y_i – значение выходной переменной объекта в i -й точке;

y_i^m – значение выходной переменной модели в i -й точке;

n – размерность массива экспериментальных данных.

Однако чаще используется квадратичная запись критерия:

$$q_2(t) = [y(t) - y^m(t)]^2 = \sum [y_i - y_i^m]^2. \quad (1.5)$$

Если необходимо выделить значимость некоторых точек в массиве экспериментальных результатов, используется критерий:

$$q_3(t) = \sum_{i=1}^n d_i \cdot [y_i - y_i^m]^2, \quad (1.6)$$

где d_i – весовой коэффициент, определяющий значимость i -го результата; обычно сумма значений этого коэффициента должна удовлетворять следующему условию:

$$\sum_{i=1}^n d_i = 1. \quad (1.7)$$

Вышеперечисленные критерии (1.4)–(1.6) отражают качественную сторону близости модели и объекта. Для количественной оценки близости результатов модели и объекта используют

их модификацию, где близость модели и объекта представляется в относительных единицах:

$$G_1(t) = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - y_i^m| / (y_n \cdot \Delta x)}{n} \cdot 100 \% ; \quad (1.8)$$

$$G_2(t) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n [y_i - y_i^m]^2} / (y_n \cdot \Delta x)}{n} \cdot 100 \% ; \quad (1.9)$$

$$G_3(t) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_i \cdot [y_i - y_i^m]^2} / (y_n \cdot \Delta x)}{n} \cdot 100 \% , \quad (1.10)$$

где Δx – величина ступенчатого воздействия.

Третий этап решения задачи идентификации – определение параметров модели – можно трактовать как задачу нахождения экстремума функции многих переменных, имеющих определенные ограничения. Здесь в качестве функции выступает одно из выражений (1.8)–(1.10), а переменными величинами будут параметры выбранной модели (коэффициент передачи, постоянные времени, время запаздывания). Для нахождения экстремума функции используются различные методы поиска: сканирования, градиентный, случайный и др.

При управлении технологическим циклом в дискретных производствах надо сформировать дискретную последовательность команд используемым элементом технологического объекта управления (электро- и гидропривод). Формирование команд осуществляется управляющим устройством (дискретным автоматом) на основании логического анализа ситуации, о которых сообщают датчики положения детали, качества протекания технологической операции по командным и оповестительным каналам.

Сложность управления дискретных ПП зависит от полноты перечисления технологических ситуаций, необходимых для выработки управляющих решений. Каждая ситуация характеризуется набором значений признаков, характеризующих состояний ОУ и внешней среды. Значения признаков могут быть непрерывными и бинарными, причем при изменении значения одного признака меняется ситуация технологической среды. Для реальных ОУ

число признаков может достигать нескольких десятков и даже сотен. Исходя из этого, число ситуаций возрастает до неприемлемой, для практической реализации величины. Например, при 3 признаках необходимо рассматривать 8 ситуаций ($2^3=8$), при 10 признаках – 10 ситуаций ($2^{10}=1024$).

Обобщенная модель управления объектом с дискретным технологическим процессом показана на рис. 1.3. Она включает в себя объект управления ОУ_{дп} и устройство управления – дискретный автомат ДА. На вход объекта управления поступают две группы воздействий: неконтролируемые возмущающие воздействия (вектор $\bar{f}$), управляющие воздействия, формируемые устройством управления (вектор $\bar{X}$). Состояние объекта управления характеризуется вектором дискретных выходов датчиков положения элементов объекта ($\bar{Y}$). Алгоритм работы дискретного автомата может меняться дискретным воздействием оператора (вектор $\bar{Q}$).

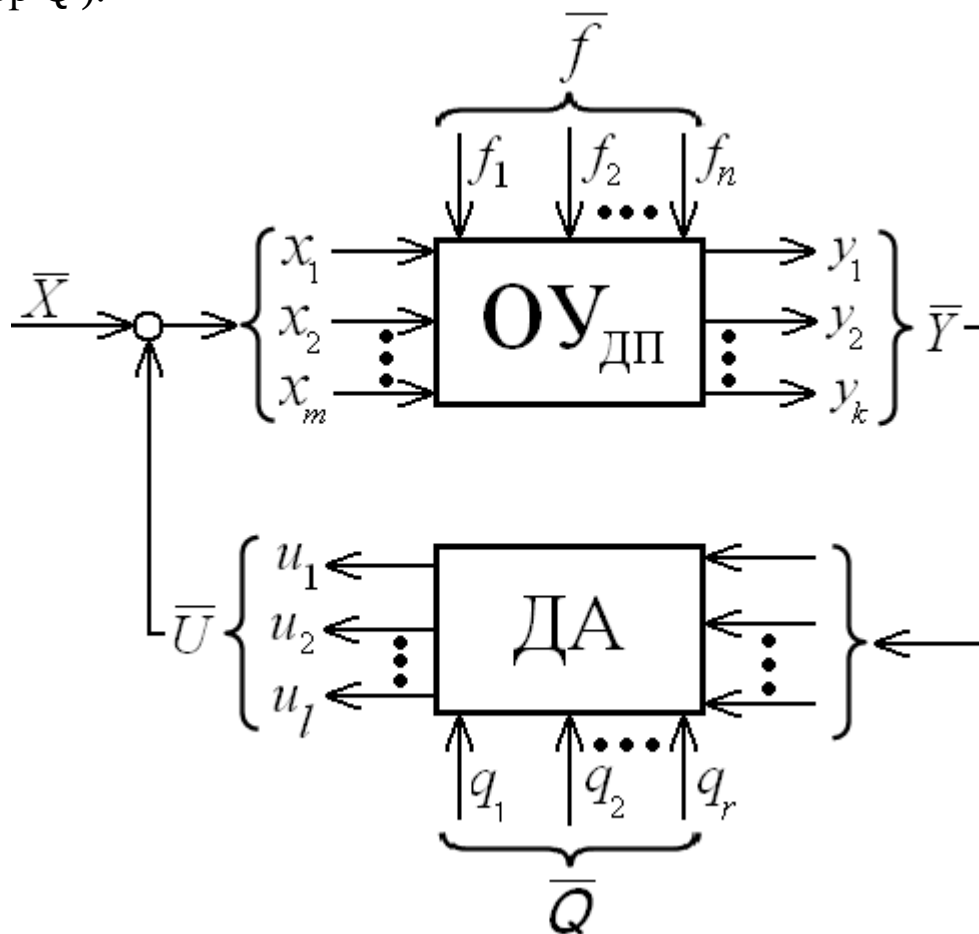


Рис. 1.3. Обобщенная модель управления дискретным объектом

В качестве модели дискретных объектов автоматизации могут использоваться таблицы истинности, логические выражения, графы и т.д.

Обычно сигналы датчиков и команды УУ в дискретных системах носят бинарный характер. В этом случае дискретный автомат является логическим устройством, и для его синтеза применяют теорию конечных автоматов.

Если выходы ДА зависят только от комбинации входных сигналов, то ДА называется комбинационным. Если выходы зависят не только от комбинации входных сигналов, но и от текущего состояния устройства, то автомат называется последовательностным. Данный автомат должен иметь элементы памяти. Для синтеза ДА используются автоматные таблицы (таблицы истинности).

Полный технологический цикл изготовления штучной продукции дискретных объектов представляет собой совокупность отдельных технологических операций, сменяющих друг друга в определенной последовательности. Так как все технологические последовательности представляют собой повторяющиеся циклы, то выделяют два вида модели объекта: комбинационную и последовательностную.

Для удобства деления цикла на отдельные элементы вводится понятие технологического такта или состояния, т.е. интервала времени, в котором дискретный объект работает с неизменной комбинацией включений и выключений командных и оповестительных элементов.

Общая последовательность формализации технологического цикла состоит из следующих этапов:

- составления содержательного описания при нормальном и аварийном режимах работы объекта;
- разбиения цикла на такты;
- анализа переходов от одного такта к другому, т.е. выявления причин изменения состояния элементов, вызывающих переход;
- установления причинно-следственных и логических, ситуационных связей между входами и выходами дискретного объекта автоматизации;

- разработки формализованного алгоритма функционирования в виде таблицы истинности, графов состояния, логических функций и т.д.

Математические модели управления объектами дискретного действия могут быть двух видов: комбинационные и последовательностные. В качестве примера составления комбинационной модели управления объектом рассматривается синтез дискретного автомата ДА для отбраковки листов упаковочного материала (рис. 1.4). Условие срабатывания толкателя Т – поступление дискретного сигнала от двух и более датчиков Д1, Д2, Д3, измеряющих толщину листа. Путьевые выключатели ПВ1, ПВ2 используются для подачи дискретных сигналов о появлении листа в зоне контроля и зоне действия толкателя.

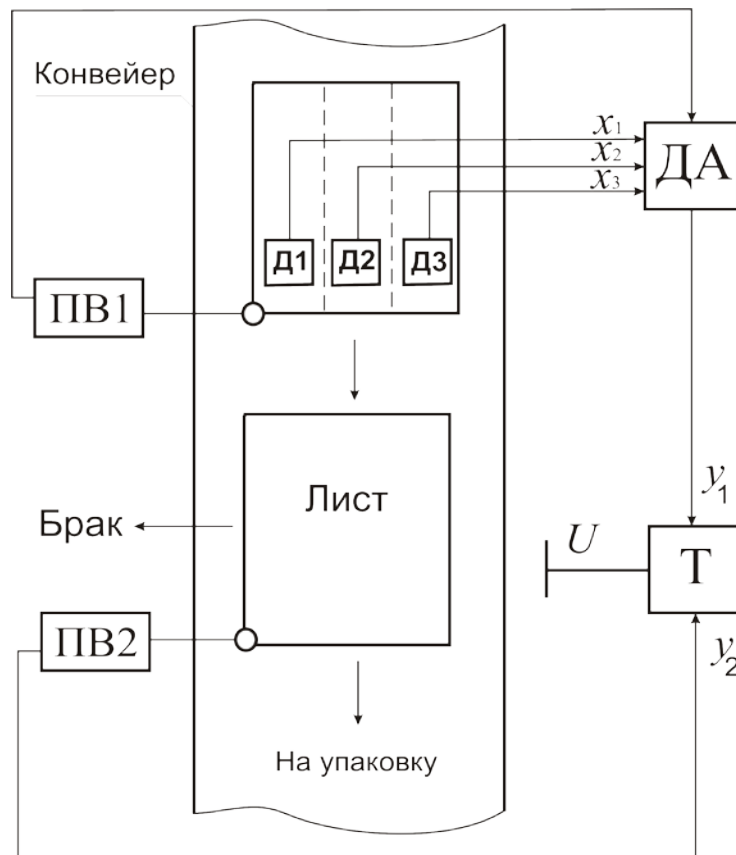


Рис. 1.4. Структура дискретной системы управления

Таблицы истинности комбинационного дискретного автомата и толкателя приведены на рис. 1.5 и 1.6.

ДА			
x_1	x_2	x_3	y_1
0	0	0	0
1	0	0	0
0	0	1	0
0	0	1	0
1	1	0	1
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	1	1

Т		
y_1	y_2	U
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Рис. 1.6. Таблица истинности толкателя

Рис. 1.5. Таблица истинности дискретного автомата

В выражениях (1.11) показаны логические функции, описывающие работу дискретного автомата (до и после процедуры упрощения):

$$\left. \begin{aligned} y_1 = 1 &= x_1 \cdot x_2 \cdot \overline{x_3} + \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot x_3 + x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \\ y_1 = 1 &= x_1 \cdot x_2 + x_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_3 \end{aligned} \right\}. \quad (1.11)$$

Реализация дискретного автомата на логических элементах «И» и «ИЛИ» показана на рис. 1.7.

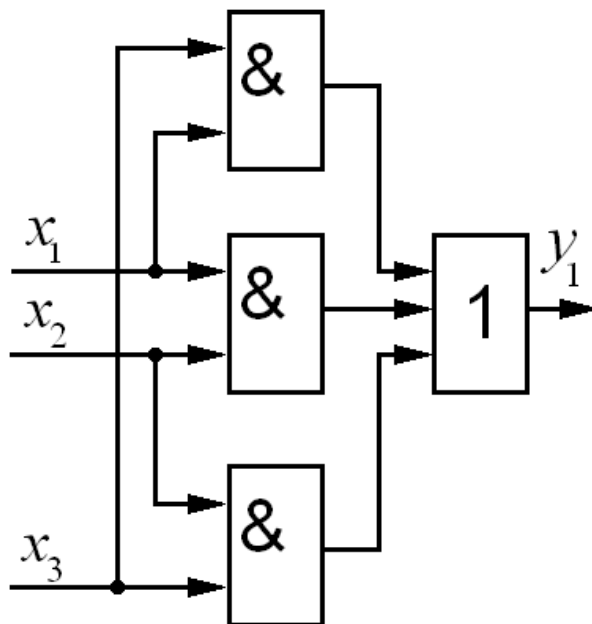
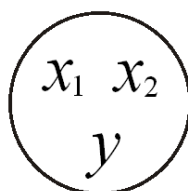


Рис. 1.7. Реализация дискретного автомата на логических элементах

Идентификация последовательностного дискретного автомата, представляющего собой последовательностное логическое устройство ПЛУ, показана на примере синтеза системы автоматической сигнализации (рис. 1.8), в которой зажигание сигнальной лампы *HL* происходит при превышении допустимого значения одновременно в точках 1 и 2. Выключение сигнальной лампы происходит при уменьшении температуры ниже предельных значений в этих двух точках. Для построения модели ПЛУ вначале строится граф состояний системы (рис. 1.9), затем определяется логическая функция, описывающая его работу.

В вершинах графа значения переменных записывают по следующей схеме:



При этом запись x_1 (или x_2) означает «1», а $\bar{x}_1$ (или $\bar{x}_2$) – «0». Выходной сигнал вершины y может быть равен как «1», так и «0».

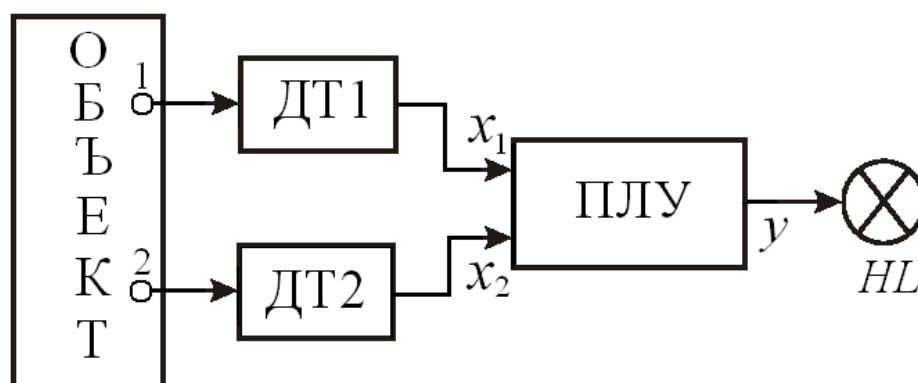


Рис. 1.8. Структура системы автоматической сигнализации:
 ДТ1, ДТ2 – дискретные датчики температуры;
 ПЛУ – последовательностное логическое устройство

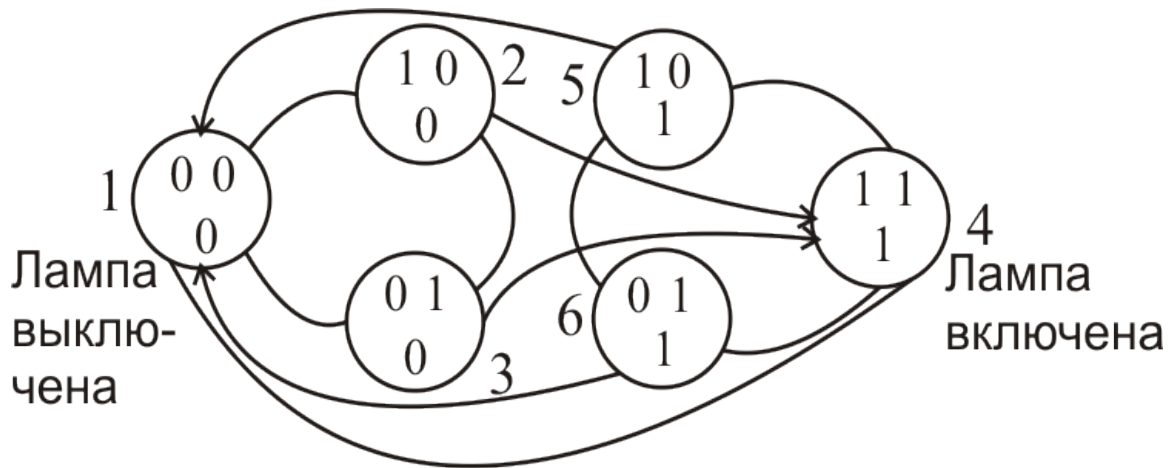


Рис. 1.9. Граф состояний системы автоматической сигнализации

Для вывода логической функции используется выражение

$$y = Vx_1x_2k, \quad (1.12)$$

где V – логическое суммирование по всем вершинам;

k – коэффициент, принимающий значения «0», «1» или « y » в соответствующей вершине графа в зависимости от следующих условий: $k = 0$ при $y = 0$; $k = 1$ при $y = 1$; $k = y$ – для неоднозначно различимых вершин. Неоднозначно различимыми называются вершины, у которых значения входных дискретных переменных x_1, x_2 совпадают (одинаковы), а значения выходного сигнала y отличаются. Неоднозначными вершинами графа (см. рис. 1.9) являются вершины 2 и 5, 3 и 6. Исходя из указанных условий, логическая функция ПЛУ будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} y &= \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot 0 + x_1 \cdot x_2 \cdot 1 + x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot y + \\ &+ \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot y + x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot y + \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot y = \\ &= x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot y + \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot y = \\ &= x_1 \cdot x_2 + y(x_1 \cdot \bar{x}_2 + \bar{x}_1 \cdot x_2). \end{aligned} \quad (1.13)$$

1.4. Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП)

1.4.1. Структура и технические средства АСУ ТП

Типовая структура современной АСУ ТП (рис. 1.10) включает четыре уровня.

На уровне 0 аналоговый интерфейс 4-20 мА (0-5 мА) заменяется коммуникационной технологией, объединяющей датчики, исполнительные механизмы и контроллеры в единую цифровую сеть – *Fieldbus* (полевая шина или промышленная сеть). Это позволяет большое количество 2-, 3-, 4-проводных линий связи, идущих от множества датчиков и исполнительных механизмов к каналам ввода-вывода контроллеров, заменить на один «мало-проводной» кабель.

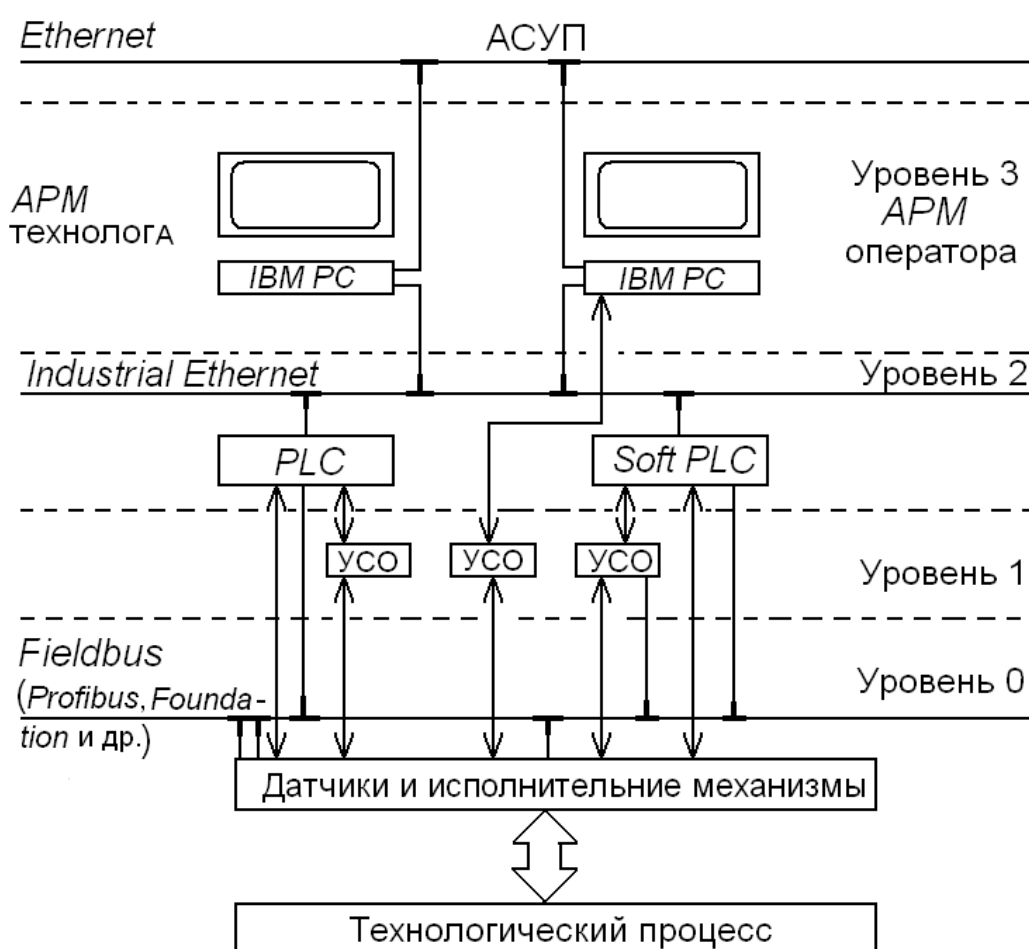


Рис. 1.10. Структура современной АСУ ТП

К приборам уровня 0 по этому кабелю передается также электропитание. Все это дает серьезный ценовой выигрыш. Кроме того, каждое устройство уровня 0 оснащается самостоятельным вычислительным ресурсом и может выполнять функции управления, самонастройки и самодиагностики, что упрощает обслуживание контрольно-измерительных приборов (КИП) и снижает нагрузку на управляющие вычислительные устройства верхних уровней, делает систему более распределенной. В настоящее время отсутствует единый международный стандарт для сетей *Fieldbus*. Наиболее популярными являются два протокола обмена: в Европе – протокол, разработанный фирмой *Siemens* – *Profibus* в различных его модификациях, в США – *Foundation Fieldbus*. В качестве протокола для сетей на основе простого последовательного порта общепризнан *Modbus*, разработанный американской фирмой *MODICON*.

На уровне 1 находятся устройства связи с объектом, которые принимают, выдают на объект группу аналоговых и дискретных сигналов, а также имеют связь через различные адаптеры с *Fieldbus*, контроллерами и компьютерами. Устройства уровня 1 являются безынициативными, работают под управлением контроллеров или компьютеров и располагаются вблизи с объектом управления. Использование этих УСО снижает затраты на монтаж и кабельную продукцию.

На уровне 2 находятся контроллеры *PLC* (*Programmable Logic Controllers*) и *SoftPLC*. Контроллеры типа *SoftPLC* (свободно программируемые контроллеры) имеют *IBM PC* совместимую архитектуру. Программа в виде *EXE*-файла загружается в *SoftPLC* компьютера. Для программирования *PLC* и *SoftPLC* Международный электротехнический комитет (МЭК) принял стандарт *IEC 1131-3*, который описывает пять языков программирования – графических: релейных диаграмм (*Ladder Diagrams* – *LD*), функциональных блочных диаграмм (*Function Block Diagram* – *FBD*), последовательных функциональных схем (*Sequential Function Chart* – *SPC*); текстовых: список инструкций (*Instruction List* – *IL*), структурированный текст (*Structured Text* – *ST*). Связь между контроллерами и станциями управления верхнего уровня осуществляется по сети *Ethernet*, выполненной в промышленном варианте (*Industrial Ethernet*).

На рынке промышленной автоматизации все большим спросом пользуются встраиваемые в персональные компьютеры модули, позволяющие непосредственно к компьютеру подключать датчики и исполнительные механизмы. Это направление получило название «автоматизация» на базе промышленных компьютеров *PC-based Control*. Индустриальные компьютеры представляют собой, как правило, программно совместимые с обычными *PC* машины, но адаптированные для жестких условий эксплуатации на производстве, в цехах, газокompрессорных станциях и т.д. В качестве устройств сопряжения с объектом управления данные системы комплектуются дополнительными платами (адаптерами) расширения. Для объектов управления, имеющих небольшое число входов-выходов, невысокие требования по надежности и по обеспечению режима реального времени, подход *PC-based Control* с экономической точки зрения предпочтителен, так как уменьшаются затраты на аппаратные средства.

На уровне 3 располагаются станции в виде *IBM PC* совместимых промышленных компьютеров, которые обеспечивают диспетчеризацию технологического процесса и реализуют принцип бесщитовой автоматики. Доминирующей операционной системой для АСУ ТП верхнего уровня является *Windows NT*. Стандартным механизмом взаимодействия программного обеспечения АСУ ТП признан стандарт *OPC (OLE for Process Control)*, который основан на объектной модели *COM/DCOM* фирмы *Microsoft*.

При создании современных АСУ ТП наблюдается мировая интеграция и унификация технических решений. Фирмы-разработчики сосредотачивают свои ресурсы на том, что они умеют делать лучше других, заимствуя лучшие мировые достижения в остальных областях, становясь тем самым системными интеграторами. Основное требование современных систем управления – это открытость системы. Система считается открытой, если для нее определены и описаны используемые форматы данных и процедурный интерфейс, что позволяет подключить к ней «внешние» независимо разработанные компоненты. Архитектура *IBM PC* занимает ведущее место в области автоматизации.

Наметившийся в последнее время подъем отечественной промышленности дает шанс оснащать российские предприятия

самыми современными компьютерными индустриальными технологиями, перешагнув этапы, которые проходило и на которых остановилось большинство западных предприятий.

Вне зависимости от характеристик объекта управления, будь то отдельные агрегаты или многопрофильные производства, структура комплекса технических средств системы управления предполагает наличие: первичных средств автоматизации (интеллектуальных датчиков и исполнительных устройств – так называемый нулевой или полевой уровень системы); устройств первого уровня (преобразователей аналоговых и дискретных сигналов ввода-вывода); устройств второго уровня (контроллеров и промышленных компьютеров); устройств третьего уровня АСУ ТП (рабочие станции, серверы и др.) и устройств четвертого уровня системы управления (локальные вычислительные сети с персональными компьютерами).

Полевой уровень АСУ ТП включает в себя первичные преобразователи или датчики сигналов измерительной информации, исполнительные устройства различных типов и назначений. На отечественных предприятиях большинство датчиков и исполнительных устройств для передачи и приема данных используют аналоговые или дискретные унифицированные сигналы. Однако они постепенно вытесняются интеллектуальными устройствами, в которых, наряду с основными функциями, осуществляется преобразование сигналов из аналоговой (дискретной, импульсной) в цифровую форму и для исполнительных устройств обратное преобразование. Для передачи измерительной и командной информации на этом уровне используются *HART*-протокол (токовая петля 4...20 мА), *AS*-интерфейс, *RS-232*, *RS-485*. Многие интеллектуальные датчики и исполнительные механизмы для передачи и приема информации в цифровом виде используют полевую шину (*Fieldbus*), представляющую, как правило, двухпроводную линию связи (витая пара, оптоволокно) с одновременной передачей по шине питания и информационного сигнала. К числу таких промышленных сетей, объединяющих датчики, исполнительные механизмы, контроллеры и рабочие станции, относятся *Foundation Fieldbus*, *Profibus DP* и *Interbus* (по стандарту *RS-485*), *DeviceNet* (физическая среда 4-проводный кабель), *Profibus PA* и

др. На верхнем уровне используются сети *Ethernet*, *ArcNet*, *Token Ring* и др.

В тех случаях, когда на полевом уровне используются датчики и исполнительные механизмы с аналоговым входом или выходом, для их сопряжения с контроллерным или диспетчерским уровнем используются устройства связи с объектом (УСО) – устройства первого уровня АСУ ТП. УСО осуществляют преобразование сигналов, их первичную обработку и выдачу управляющих воздействий на исполнительные устройства. Каждый модуль УСО представляет собой функционально законченное устройство, имеющее унифицированную конструкцию, интерфейс и питание. В тех случаях, когда промышленные контроллеры включают в себя модули УСО, в АСУ ТП первый уровень управления не выделяется.

На втором уровне АСУ ТП располагаются программируемые логические контроллеры (ПЛК). Выбор типа контроллера для системы управления, с помощью критерия цена/производительность, определяется их особенностями. Это могут быть моноблочные, модульные или встраиваемые контроллеры. Среди основных характеристик – производительность, максимальное число каналов ввода-вывода переменных, коммуникационные возможности (наличие требуемых пользователю портов), надежность, удобство интерфейса, цена, область распространения и др. При оценке контроллеров немаловажное значение имеют отдельные его компоненты. Прежде всего в процессорном модуле оцениваются характеристики процессора, объем памяти, поддержка ОС, стандарт шины расширения, наличие сторожевого таймера, портов, поддержка определенных сетей, гальваническая изоляция, индикация состояния, рабочая температура, напряжение питания и др.

Иногда на втором уровне управления могут использоваться промышленные компьютеры (ПК). Они позволяют сосредоточить функции управления и визуализации в одном месте, используя встраиваемые системы – платы УСО, памяти, коммуникационные модули и т.д. Промышленные компьютеры, выпускаемые рядом фирм (*Advantech*, *Axiom*, *Portwell* и др.), удовлетворяют самым жестким условиям эксплуатации: со степенью защиты лицевой панели *IP65*, диапазон рабочих температур от 0 до 50 °С. Стан-

дартные операционные системы (ОС) позволяют использовать инструментальные средства разработки прикладного программного обеспечения (ПО) различных фирм. Наличие коммуникационных портов ввода-вывода, механизма взаимодействия OPC позволяет ПК взаимодействовать с любым оборудованием – от ПЛК до любых рабочих станций.

В то же время программируемые логические контроллеры по сетевым возможностям приближаются к ПК, их память *Flash memory* обладает достаточной емкостью для размещения небольших SCADA-систем. Примером может служить SCADA-система *Trace Mode*, размещенная в виде *SoftPLC* в памяти контроллеров «Лагуна», Ломиконт, Теконик и АДЭМ. ПЛК обладают повышенной надежностью, высоким быстродействием (0,9 мкс и менее на базовую команду), малыми габаритами, возможностью «горячей» замены модулей (замена модулей без выключения питания) и т.д. К их дополнительным возможностям относятся: наличие сторожевого таймера, самодиагностика, режим автонастройки параметров регулятора. Программирование контроллеров осуществляется в зависимости от задачи и типа контроллера на различных языках программирования по стандарту IEC 61131-3. Широко применяется программный пакет *ISaGRAF*, как интегрированный пакет разработки и отладки приложений для ПЛК и связи с ПО верхнего уровня, а также система *Otralogic* для программирования контроллеров на языке *FBD* по стандарту IEC 61131-3.

На третьем (диспетчерском) уровне управления располагаются рабочие станции, серверы и другое оборудование. По сравнению с традиционными операторскими пультами, рабочие станции, безусловно, являются шагом вперед по мощности, производительности и разрешающей способности. Рабочие станции являются сбалансированным решением для создания автоматизированного рабочего места оператора или диспетчера. Они обеспечивают компромисс между производительностью и устойчивостью к воздействиям внешней среды. В тех случаях, когда внешние воздействия находятся в пределах, позволяющих использовать обычные персональные компьютеры, автоматизированные рабочие места операторов (диспетчеров) создаются на базе ПК. Зачастую роль сервера в АСУ ТП достается одному из ПК, одна-

ко в большинстве случаев такое решение неверно. Стандартный промышленный компьютер не может полностью выполнить функцию промышленного сервера, так как у него для этих целей не хватит ни вычислительной мощности, ни надежности, ни функциональности. Главное назначение сервера – обеспечение работы ресурсоемких приложений, сбои в работе которых могут привести к тяжелым последствиям. Существует достаточно много различных типов серверов: начального уровня, с повышенной функциональностью, отказоустойчивых и т.д. В тех случаях, когда внешние условия эксплуатации лежат в допустимых пределах, в качестве сервера используют обычные ПК.

На четвертом (бизнес) уровне используются локальные вычислительные сети с обычными персональными компьютерами и стандартным коммуникационным оборудованием.

1.4.2. Технология обмена данными в АСУ ТП

Технологию обмена данными можно условно разделить на две части: внешний интерфейс, отвечающий за взаимодействие с пользователем, и внутренний компонент, отвечающий за управление данными. Такое разделение обеспечило информационным системам большую гибкость. Внутренний компонент, развиваясь во времени, превратился в систему управления базами данных (СУБД). Внешний интерфейс в процессе развития средств вычислительной техники и распространения их на предприятии прошел многоэтапный путь развития, начиная от централизации всех операций на больших ЭВМ, использования персональных компьютеров и вычислительных сетей.

Проблемы совместного использования данных в вычислительных сетях персональных компьютеров и рабочих станций привели к созданию модели вычислительной сети с файловым сервером. Файловый сервер – это центральный узел (компьютер в сети), который хранит файлы данных, доступные всем пользователям. Обычно файловый сервер в локальной сети является также центральным концентратором для совместного использования периферийных устройств, таких как принтеры, модемы и т.д.

В локальной сети функционирующее на рабочей станции приложение (программа) считывает и записывает файлы, обмениваясь ими с сетевым файловым сервером. При этом файлы по сети передаются целиком на рабочую станцию, а после их использования возвращаются обратно на файловый сервер. Для других пользователей в этот период времени данный файл становится недоступным (блокируется). Это является недостатком данной технологии использования данных. Кроме этого, если множество файлов запрашивают и передают по сети сразу много рабочих станций, то сеть быстро насыщается, и трафик (процесс передачи информации по сети) становится узким местом, ухудшая производительность системы. Данные проблемы привели к созданию модели клиент/сервер.

Модель клиент/сервер имеет три различных компонента, каждый из которых выполняет конкретную работу:

- Сервер базы данных;
- Клиентское приложение;
- Сеть.

Сервер («внутренний компонент») эффективно управляет ресурсом (таким как информационная база данных). Основной функцией сервера является оптимальное управление ресурсом для множества клиентов, которые одновременно у него этот ресурс запрашивают. Помимо этого серверы баз данных выполняют такие задачи, как: управление информационной базой данных, с которой работают множество пользователей, управление доступом к базе данных, защитой информации в базе данных с помощью средств архивирования/восстановления и создания резервных копий, а также централизованное задание для всех приложений правил глобальной целостности данных.

Клиентское приложение («внешний интерфейс») – это часть системы, которую пользователь использует для взаимодействия с данными. Клиентные приложения в СУБД выполняют такие задачи, как: представление интерфейса, с помощью которого пользователь может выполнять свою работу; управление логикой приложения, например, всплывающими списками в форме ввода данных или столбчатыми диаграммами в графическом представлении данных; выполнение логики приложения, например вы-

числение полей в форме ввода данных; проверка допустимости данных, запрос и получение информации о сервере базы данных.

Средствами передачи данных между клиентом и сервером в системе являются сеть и коммуникационное программное обеспечение, работающее на клиенте и сервере и позволяющее им взаимодействовать через сеть. Структура информационной системы с клиент-серверной технологией показана на рис. 1.11.

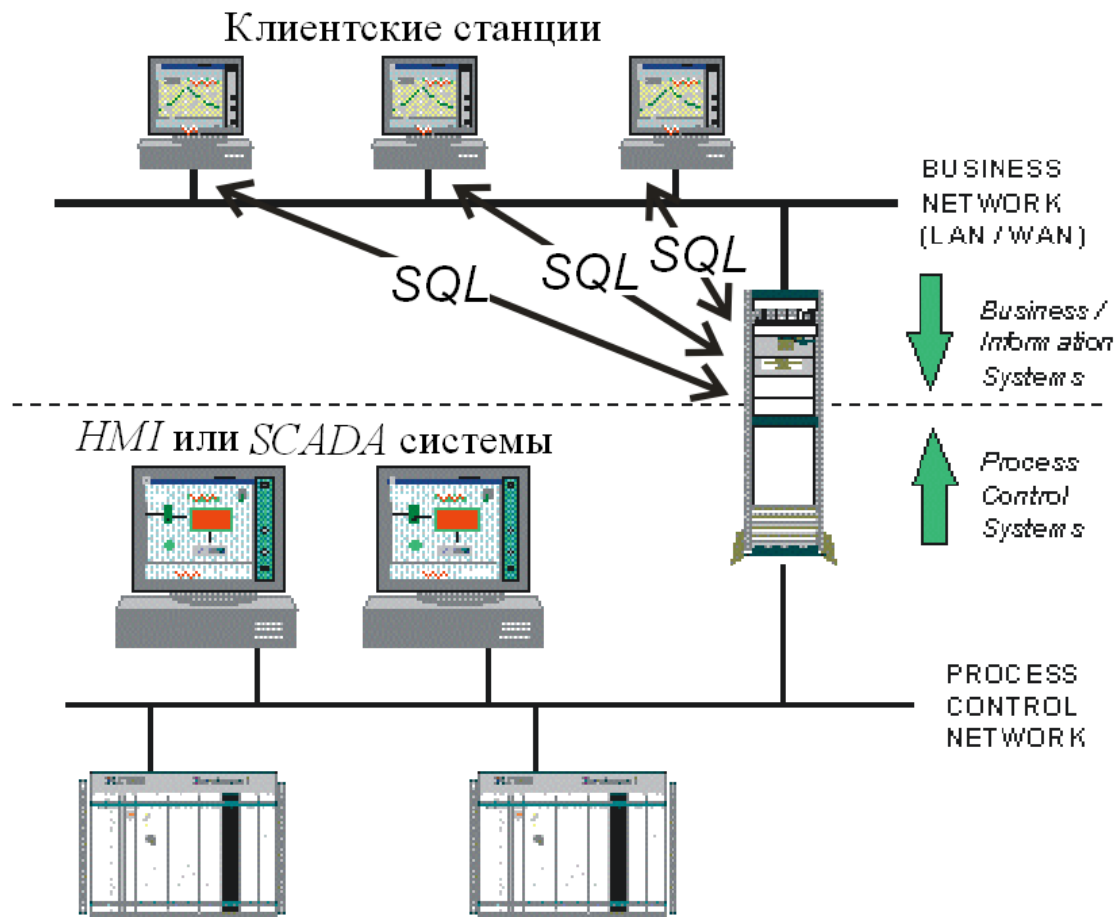


Рис. 1.11. Структурная схема системы с технологией «клиент-сервер»

В модели клиент/сервер клиентное приложение работает с небольшими специальными наборами данных, например строками таблицы, записями, а не с целыми файлами, как в системе с файловым сервером. Сервер базы данных здесь является интеллектуальным. Он блокирует и возвращает строки по запросам клиентов, что обеспечивает параллельность, минимальный сете-

вой трафик и, как следствие, улучшенную производительность системы.

В информационных системах, в которых реализована технология клиент/сервер, общие корпоративные данные распределены между более мелкими группами пользователей в виде компьютеров-серверов.

Поскольку количество серверов можно сделать любым (из-за постоянно снижающейся стоимости компьютеров), то проблема свободного доступа к данным таким способом решается практически полностью. Но при этом остается проблема обработки данных, требующих больших ресурсов компьютера. Поэтому наряду с серверами, используемыми для хранения корпоративных данных (файл-серверами), появились серверы, занимающиеся обработкой данных для приложений, – серверы приложений.

Сервер, в общем случае, реализует следующие функции:

- Распределение обработки;
- Графический интерфейс пользователя.

Сервер дает возможность распределять данные между многими компьютерами и другими серверами так, чтобы отдельные пользователи и коллективы могли выдавать любое количество запросов.

Сервер позволяет также переместить обработку данных от большого компьютера в коллективы, на рабочие места, но при условии, что приложения, удовлетворяя свои потребности в общих данных, подчиняются общим правилам и протоколам централизованной системы управления всего предприятия. Без сервера эти формы работы, обеспечивающие большую свободу и гибкость системы обработки данных, были бы невозможны.

Для интерфейса в клиент-серверных системах используется *SQL* – язык структурированных запросов (*Structured Query Language*). Он представляет собой средство организации, управления и поиска информации в РБД. Широкое признание *SQL* приобрел благодаря таким своим характеристикам, как:

- Независимость от поставщика;
- Переносимость на разные компьютерные платформы;
- Опора на реляционные принципы хранения информации;

- Высокоуровневая англоязычная структура;
- Интерактивное выполнение запросов;
- Полнофункциональный язык БД;
- Поддержка со стороны *IBM, Oracle, Sybase, Microsoft* и др.

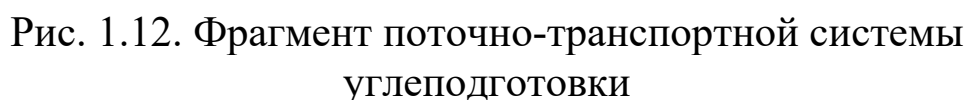
Примером использования языка *SQL* в клиент-серверных системах является система «*IndustrialSQL Server*» – внутризаводской хранитель архивной информации. *IndustrialSQL Server* представляет собой РБД, в которой учтена скорость поступления и объемы производственной информации.

1.4.3. Пример АСУ ТП

В качестве примера реализации системы рассматривается АСУ ТП углеприемного цеха обогатительной фабрики.

Цех углеприема – это комплекс, состоящий из участков и собственно цеха аккумулирующих бункеров, который предназначен для приема рядового угля из железнодорожных вагонов с целью последующей равномерной подачи по системе конвейеров в основные цеха фабрики. Главными технологическими объектами цеха являются аккумулирующие бункеры. В них накапливается рядовой уголь, имеющий определенный качественный состав, соответствующий различным маркам угля, таким как Ж, ГЖ, Г, ОС и К.

Всего в цехе имеется 52 бункера, расположенных в четыре ряда по 13, разделенных на две поточно-транспортные технологические секции. В секцию входят два соседних ряда бункеров, и каждый ряд имеет свой сборочный конвейер. На два ряда бункеров приходится один входной загрузочный конвейер секции. Со сборочных конвейеров подготовленная шихта из угля различных марок поступает на выходные конвейеры, которые транспортируют ее в основной технологический цех непосредственно для производства концентрата. Функционально выделенными являются два основных технологических процесса – процесс загрузки и процесс выгрузки угля из бункеров. Оба процесса требуют автоматизации и протекают независимо друг от друга. Первый процесс заключается в приеме угля из накопительных питателей вагоноопрокидывателя с помощью входных конвейеров,



Процесс выгрузки угля из бункеров происходит с помощью управляемых электромеханических вибрационных питателей (вибропитателей) и ленточных питателей, оснащенных электроприводами, обеспечивающих дозированную подачу угольной шихты на выходные конвейеры цеха. Фрагмент технологической схемы для одного ряда бункеров (одной технологической нитки) показан на рис. 1.13.

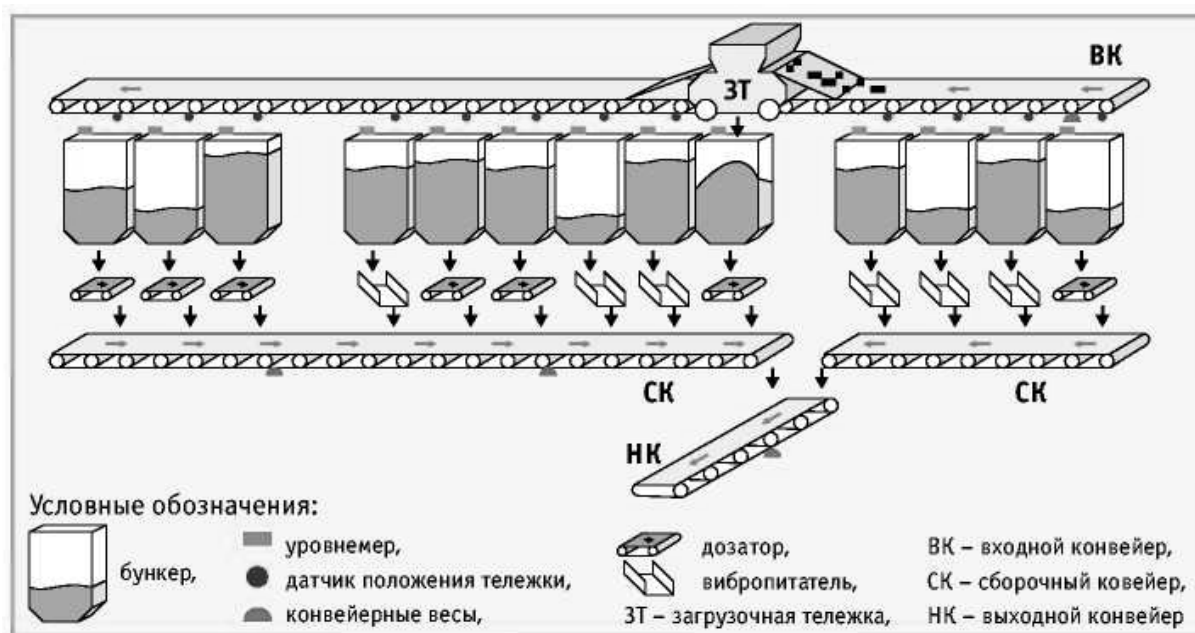


Рис. 1.13. Фрагмент технологической схемы аккумулирующих бункеров

АСУ ТП цеха углеприема (рис. 1.14) включает в себя несколько уровней управления. Нижний уровень образуют контроллеры с процессорными платами 5025A и 5066 фирмы *Octagon Systems*, которые установлены в герметичные шкафы и смонтированы непосредственно в помещениях РП вблизи коммутационной аппаратуры. Для размещения 6 контроллеров и плат МРВ с устройствами УСО фирмы *Grayhill* потребовалось изготовить 3 двусторонних шкафа. В соответствии с функциональной нагрузкой контроллеры разделяются на две группы.

Процессом загрузки управляют контроллеры К1–К4. Контроллеры К1 и К2 управляют работой загрузочных тележек и конвейеров подачи угля от участка углеподготовки. Контроллеры К3 и К4 управляют работой оборудования участка углеподготовки, к которому относятся входные конвейеры подачи угля от вагоноопрокидывателей, а также механизмы питателей, грохотов и дробилок. Процессом выгрузки управляют контроллеры К5–К6. Выгрузка производится с помощью питателей двух типов: вибропитателей с управлением через магнитные усилители и ленточных питателей, оснащенных современными электроприводами.

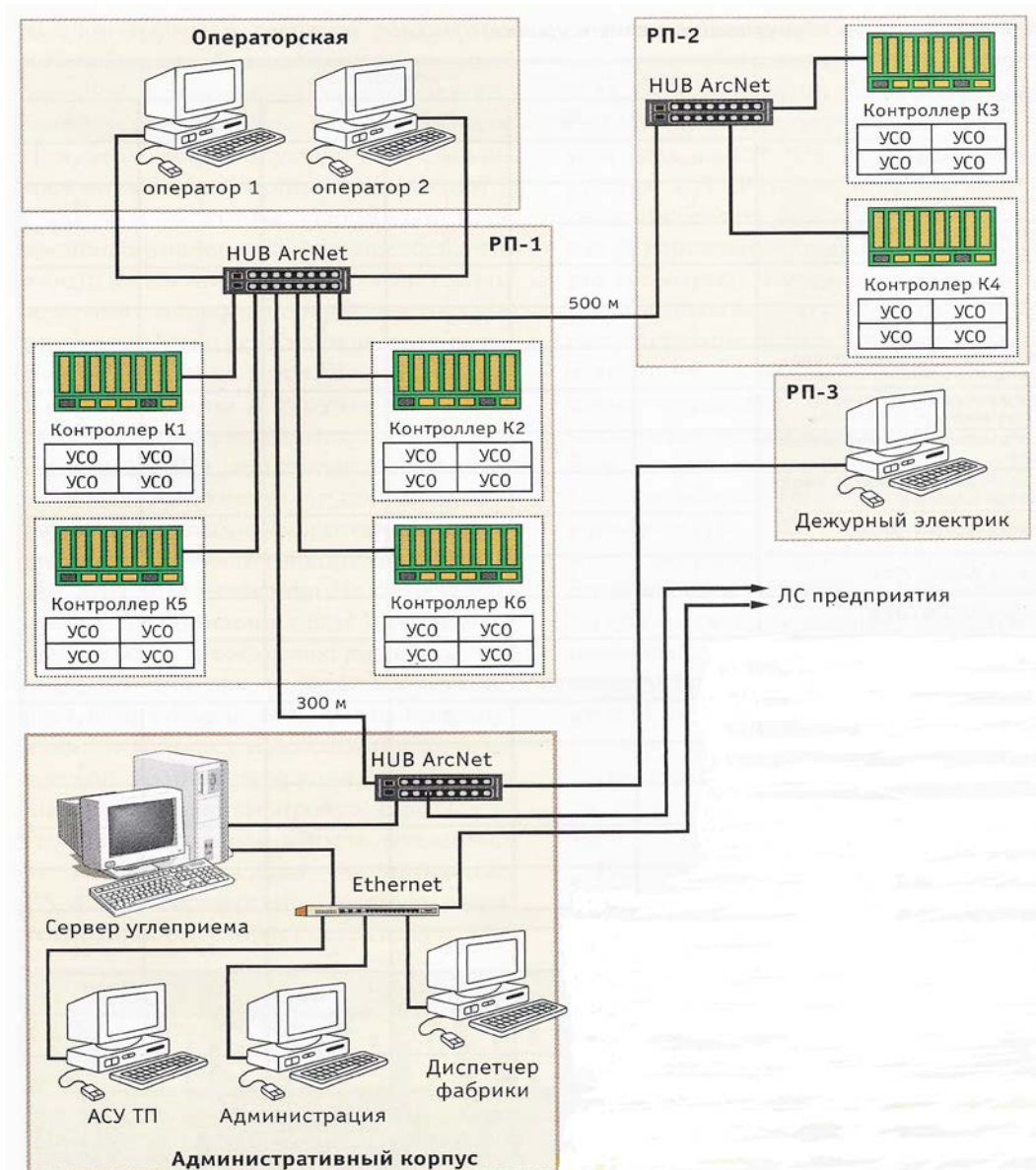


Рис. 1.14. Структурная схема АСУ ТП цеха углеприема

Для управления вибропитателем требуется один цифровой модуль 70C-OAC5A и один аналоговый 73C-OV10. Ленточные питатели управляются по последовательной магистрали *ModBus*, которую поддерживает модуль 5554. После получения задания с верхнего уровня контроллеры нижнего уровня работают полностью автономно с использованием системного таймера. При этом время реакции контроллеров на любые изменения цифровых входных сигналов не превышает 55 мс.

В табл. 1.2 представлен состав устройств управления нижнего (контроллерного) уровня АСУ ТП цеха углеприема.

Таблица 1.2

Перечень устройств нижнего уровня АСУ ТП

Наименование	Контроллер					
	К1	К2	К3	К4	К5	К6
Крейт 5208- <i>RMH</i>	1	1	1	1	1	1
Блок питания 5101	1	1	1	1	1	1
Процессорный модуль 5025-386	–	–	1	1	1	1
Процессорная плата 5066	1	1	–	–	–	–
Сетевая карта 5560	1	1	1	1	1	1
Плата параллельного ввода-вывода 5600-96	2	2	2	2	2	2
Плата последовательного ввода-вывода 5558/5554	–	–	–	–	1	1
Плата изолированных каналов 5624	2	2	–	–	–	–
Универсальный модуль ввода-вывода <i>UNIO-96</i>	1	1	–	–	–	–
Модуль <i>ADAM-4520</i>	1	1	–	2	–	–
Модуль <i>ADAM-4011</i>	1	1	–	–	8	8
Модуль <i>ADAM-4017</i>	–	–	–	1	2	2
Модуль <i>ADAM-4052</i>	–	–	–	–	3	4
Клеммные платы: <i>MPB-24</i>	4	4	6	6	2	3
<i>MPB-16</i>	2	2	–	–	4	4
<i>MPB-8</i>	–	–	1	1	–	–
<i>STB-26</i>	4	5	–	–	–	–
<i>TBI-24</i>	2	2	–	–	–	–
Модули УСО: <i>70C-0AC5A</i>	20	22	29	29	22	30
<i>70C-1AC5A</i>	98	96	118	117	56	71
<i>70G-ODC5</i>	–	–	–	–	4	6
<i>73G-OV10</i>	–	–	–	–	10	12

Структурная схема управления процессом загрузки бункеров (рис. 1.15) показывает способ подключения основного оборудования к контроллеру К1 первой технологической секции. Обо-

рудование второй секции подключается к контроллеру К2 аналогично. Исполнительными устройствами в системе загрузки являются маршевые электродвигатели загрузочной тележки (вперед и назад), а также электродвигатели шибера тележки (вправо и влево). С помощью первых двигателей загрузочная тележка (ЗТ) перемещается по направляющим рельсам между двумя рядами бункеров. С помощью вторых производятся переключения потока угля для загрузки в правые и левые бункеры. Датчиками положения тележки являются устройства бесконтактного типа (ДПМГ), в основе которых используются маломощные герконовые выключатели. Линейные размеры датчика позволяют обеспечить надежное срабатывание геркона при прохождении мимо него загрузочной тележки (ЗТ) со скоростью 0,5 м/с.

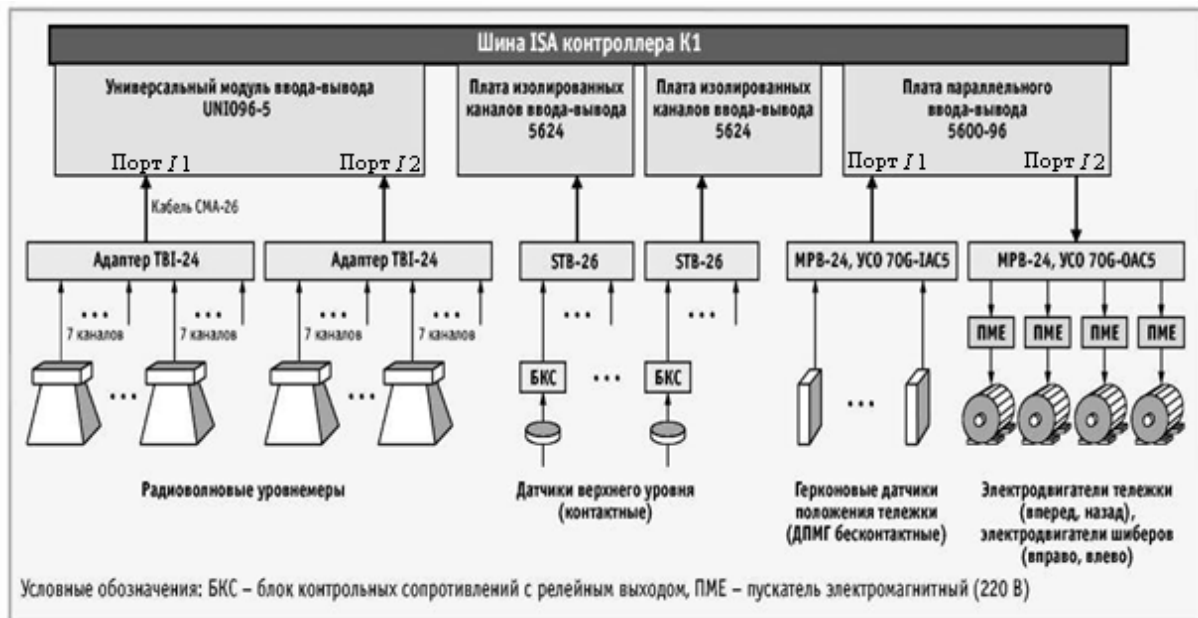


Рис. 1.15. Структурная схема управления процессом загрузки

В этот момент контроллер успевает многократно считать состояние датчиков положения через порт I1 модуля 5600 и выключить маршевые двигатели. Электродвигатели шибера ЗТ включаются, исходя из заданного маршрута, в тех случаях, когда требуется загрузить оба соседних бункера в данном положении ЗТ. Время включения этих двигателей задается таймером. В автоматическом режиме моментом окончания загрузки является срабатывание реле датчика верхнего уровня, подключенного через низко-

вольтные изолированные каналы модуля 5624. После этого опять включаются маршевые двигатели ЗТ или двигатели шибера, если маршрут ЗТ еще не пройден.

Еще одним средством для контроля уровня в бункерах являются радиоволновые уровнемеры (РУ), установленные над каждым из бункеров. По показаниям уровнемеров работают, в частности, система дозирования и система измерения веса и учета остатков угля в бункерах. Сигналы с выходов РУ подключаются через оптронные развязки двух стандартных адаптеров *TBI-24* к 4-м многоканальным частотомерам универсального модуля *UNIO96*. Общее число датчиков уровня бункеров секции составляет

26 штук. Поэтому на каждый частотомер приходится по 6 или 7 каналов. Полученный таким образом матричный способ подключения РУ (с размером матрицы 4–7) позволяет максимально увеличить число измерений в единицу времени, так как 4 частотомера запускаются одновременно. В общем случае модуль *UNIO96* позволяет еще, как минимум, вдвое увеличить число измерений, если организовать матрицу размером 8×4 , так как модуль содержит 8 программируемых частотомеров. Однако для этого потребовалось бы еще два адаптера *TBI-24* с неполным использованием каналов.

Управление процессами на участках углеподготовки и вагонопрокидывателя осуществляется контроллерами КЗ–К4. Контроллер КЗ управляет оборудованием первой технологической секции (оборудованием второй секции управляет контроллер К4 аналогично). Контроллер КЗ обеспечивает включение цепочки механизмов ПТС. Основным механизмом цепочки, безусловно, является конвейер КУП1, длина которого составляет более 100 м. Для того чтобы привести в движение конвейер такой длины с углем, используется двигатель мощностью 500 кВт. Он имеет высоковольтную статорную обмотку, рассчитанную на напряжение 6000 В, которое коммутируется с помощью ячейки вакуумного выключателя. Для плавного пуска двигателя используется тиристорная роторная станция, которая ступенчато переключает пусковые сопротивления в цепи ротора, постепенно уменьшая и полностью закорачивая их в конце пуска. Поскольку конвейер расположен в наклонной галерее, то при его пуске и останове су-

существует опасность обратного хода. Для исключения таких случаев на валу двигателя установлена электромагнитная тормозная система, а на выходном валу редуктора – краповый механизм. Эти и все остальные механизмы (питатели, шиберы, грохот и др.) включаются через электромагнитные пускатели. Блок-контакты всех пускателей опрашиваются через модули 70G-1AC5A для контроля нормального пуска. Кроме этих сигналов, контроллер считывает множество других электрических сигналов: сигналы от концевых выключателей схода ленты, контроля напряжения цепей управления, от местных кнопок ПУСК и СТОП в каждой позиции, от контактов реле скорости конвейерных лент и т.д. Соотношение числа входных модулей к числу выходных составляет 4:1.

Структурная схема управления процессом дозирования (рис. 1.16) показывает способ подключения основного оборудования первой секции к контроллеру К5 (оборудование второй секции подключается к контроллеру К6 аналогично).

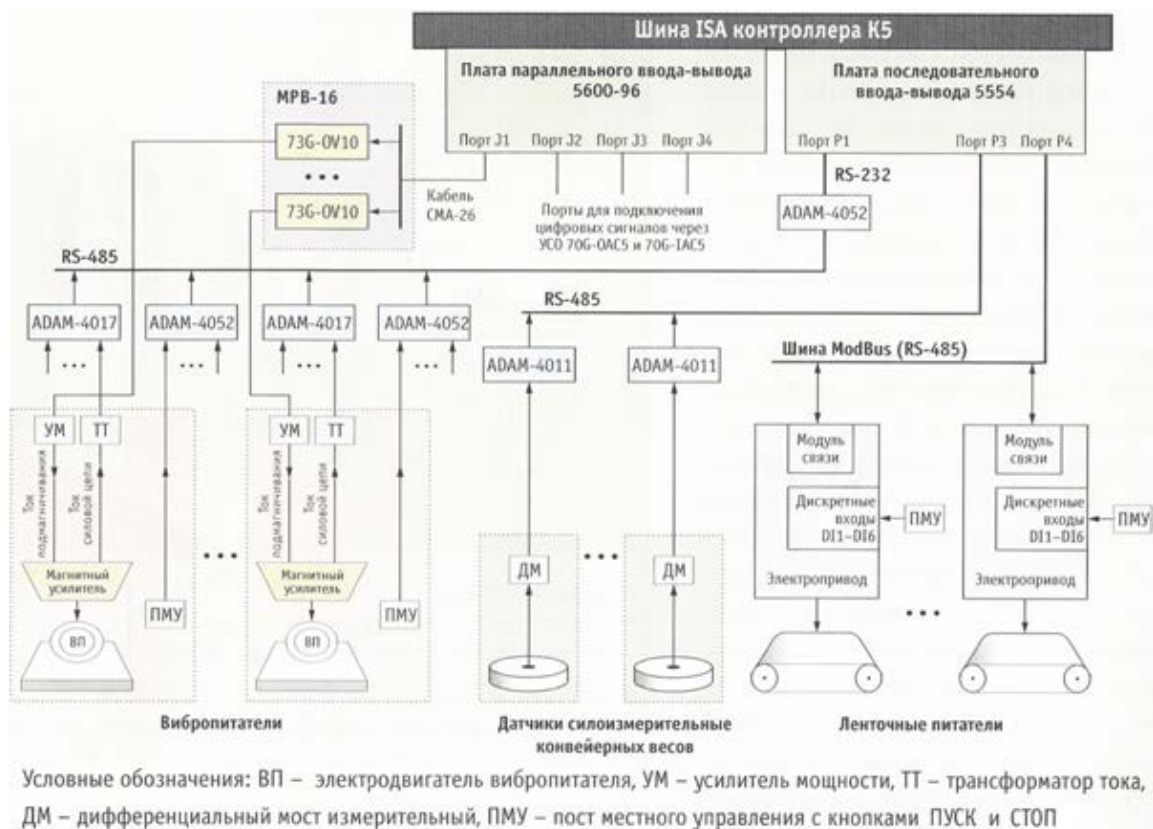


Рис. 1.16. Структурная схема управления процессом дозирования

Перечень механизмов и устройств, управляемых контроллером К5 (К6), представлен в табл. 1.3

Таблица 1.3

Наименование механизмов и устройств	Число модулей или входных каналов					
	Входные модули <i>Grayhill</i> 70G-IAC5	Выходные модули <i>Grayhill</i> 70G-OAC5	Выходные модули <i>Grayhill</i> 70G-ODC5	Выходные модули <i>Grayhill</i> 73G-A-OV10	Входной канал модуля <i>ADAM</i> -4052	Входной канал модуля <i>ADAM</i> -4017
Конвейер сборочный	30	8	—	—	—	—
Вибропитатели	—	10	—	12	24	12
Питатели, оснащенные электроприводами	—	—	4	—	—	—
Аспирация	12	2	—	—	—	—
Конвейерные весы	—	—	—	—	—	8

Параметром управления в системе дозирования является производительность питателей, установленных под бункерами. Процесс дозирования является многомерным объектом управления, имеющим в контурах измерения и управления большие задержки, обусловленные ПТС. В системе дозирования используются питатели двух типов: вибрационные (вибропитатели) и ленточные. В качестве регулирующего элемента вибропитателей используются магнитные усилители типа УМ1П-40. Для их подключения к ЦАП стандартного УСО 73G-OV10 использован транзисторный усилитель мощности (УМ). Для контроля тока в силовой цепи магнитного усилителя изготовлены трансформаторы тока (ТТ), на выходах которых имеются фильтры напряжения. Использование ТТ позволяет не только контролировать работу магнитных усилителей, но и производить линеаризацию их чрезвычайно нелинейных характеристик управления.

Для этого управляющая программа считывает величину тока через 8-канальные АЦП модулей *ADAM*-4017 фирмы *Advantech*, подключенных к выделенной для них шине *RS-485*. К этой же шине подключены цифровые многоканальные устройства

ввода ADAM-4052, входы которых соединены с постами местного управления (ПМУ) вибропитателей. Конструктивно два модуля ADAM-4052 и один ADAM-4017 размещены в отдельном пластиковом корпусе типа ADAM-4950-ENC, который устанавливается непосредственно на монтажной панели магнитных усилителей. Ленточные питатели работают под управлением электроприводов, оснащенных специальным модулем связи, который предназначен для работы с шиной *ModBus*. В комплектацию привода входит модуль цифровых входов D11-D16, к которым можно подключить до 6 сигналов напряжением 24 В. К этим входам подключены ПМУ. В состав привода входит микропроцессорная плата управления, которая обеспечивает плавный пуск электродвигателя и контроль за предельными параметрами. Задания для питателей устанавливает оператор вручную или программа ПИД-регулирования, если оператор включает автоматический режим. В обоих случаях обратная связь с объектом управления производится по конвейерным весам. Сигналы с выходов дифференциальных тензометрических мостов силоизмерительных датчиков веса подключаются к входам высокочувствительного АЦП модуля ADAM-4011. Общее число весов по обеим секциям составляет 18 единиц. АЦП весов смонтированы в отдельном шкафу, им выделена отдельная линия RS-485 в целях повышения скорости считывания информации.

Задача верхнего уровня АСУ ТП является 32-битовым приложением, написанным на языке *Borland C++ 5.02*. Она работает в операционной системе *Windows 95/98*. Для реализации задачи достаточно ресурсов ПЭВМ *Pentium-75* МГц с оперативной памятью 16 Мбайт. Основными требованиями к задаче верхнего уровня являются:

- Минимальное время прорисовки экрана и дисковых операций при архивировании событий с тем, чтобы обеспечить минимальное время реакции на действия оператора;
- Дружественный по отношению к оператору интерфейс и простота управления всем составом оборудования с одного главного экрана;
- Оптимизация процесса поиска и обработки системных и программных ошибок;

- Фоновая синхронизация процессов обмена информацией с контроллерами по локальной сети с помощью специального маркера;
- Удобная контрастная цветовая гамма для объектов экрана;
- Взаимосвязь со стандартными приложениями, включая работу с *SQL*-сервером;
- Защита от некорректных действий пользователя, в том числе от случайного включения оборудования при попадании на клавиатуру посторонних предметов или неосторожного нажатия клавиши;
- Событийно-управляемый принцип программирования;
- Ведение необходимой документации.

Некоторые из этих требований оказалось не так просто выполнить ввиду их несоответствия другим требованиям. Задача осложнялась и тем, что объект управления имеет большое количество разнообразных единиц оборудования, которыми необходимо управлять и каждая из которых должна иметь свой графический образ на экране.

В целом приложение использует всего одну форму, на которую поочередно выводится визуальная информация, состоящая из двух базовых и нескольких дополнительных экранов.

Первый из базовых экранов является главным, и с его помощью удобно управлять оборудованием цеха, которое входит в состав системы дозирования. Также с его помощью включается оборудование дополнительных подсистем, расположенных на участках углеподготовки и вагоноопрокидывателя.

Приложение связывается с контроллерами нижнего уровня по протоколу *IPX* с помощью коаксиальной линии связи *Arc Net*. Задачи верхнего уровня в режиме управления работают на двух компьютерах оператора цеха. Остальные задачи на других компьютерах работают только в режиме мониторинга.

Для рассылки пакетов во внешнюю сеть *Ethernet*, в которой работают компьютеры в административном корпусе на рабочих местах главных специалистов и диспетчера фабрики, используется специальный сервер.

Для подключения наиболее удаленных сегментов в состав локальной сети входят концентраторы *Hub Arc Net*.

2. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СВЯЗИ ПРОГРАММИРУЕМЫХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

2.1. Цифровой канал передачи информации

Современные АСУ ТП содержат десятки взаимодействующих между собой устройств (ПЛК, ПК, рабочие станции), которые разнесены на десятки, сотни и даже тысячи метров. Данные цифровые устройства работают в промышленной среде, характеризующейся высоким уровнем помех, запыленностью, повышенной температурой, агрессивностью окружающей среды, вибрациями. К каналам связи АСУ ТП предъявляют высокие требования по быстродействию и достоверности информации. Канал связи состоит из оконечной аппаратуры и линий передач (рис. 2.1).

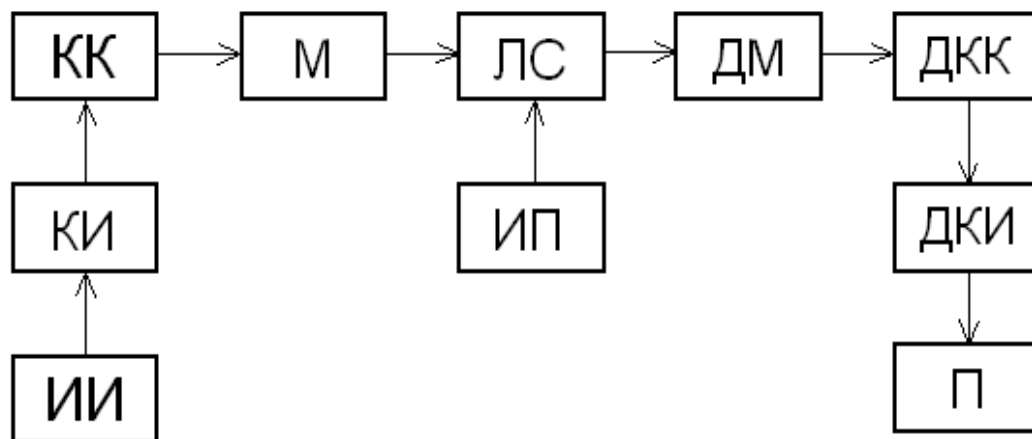


Рис. 2.1. Структура цифрового канала передачи информации:
ИИ – источник информации; КИ – кодер источника; КК – кодер канала; М – модулятор; ЛС – линия связи; ИП – источник помех; ДМ – демодулятор; ДКК – декодер канала; ДКИ – декодер источника; П – приемник информации

КИ имеет целью обеспечить такое кодирование, при котором путем устранения избыточности существенно снижается число символов, требуемых на букву сообщения. С помощью КК обеспечивается заданная достоверность передачи сигнала путем

введения избыточности. М преобразует цифровой сигнал в аналоговый. ДМ преобразует аналоговый сигнал в цифровой. ДКК проверяет достоверность и убирает избыточность.

Выбор состава устройств цифрового канала связи осуществляется исходя из особенностей передачи информации в промышленной среде. При этом возможны следующие варианты:

- Если избыточность источника мала, а помехи в канале отсутствуют, то введение КИ и КК нецелесообразно (а также ДКИ и ДКК);
- Если избыточность высока, а помехи незначительны, то целесообразно включать КИ (ДКИ), а КК (ДКК) исключить;
- Если избыточность мала, а помехи велики, то включается только КК.

На физическом уровне сигналы, как носители информации, могут быть двух видов:

- Аналоговые (непрерывные);
- Цифровые (конечный набор значений).

С точки зрения практической реализации цифровой сигнал проще и дешевле, но имеет существенный недостаток – подвержен искажениям при передаче по линиям связи (рис. 2.2). При передаче же аналогового сигнала изменяется только амплитуда, а форма сигнала сохраняется. Поэтому при передаче информации на большие расстояния используют аналоговые сигналы, вводя в канал связи модуляторы и демодуляторы.

Смысл модуляции заключается в том, что основной сигнал передается с помощью другого сигнала путем изменения его амплитуды, частоты или фазы по определенному закону. В качестве несущего сигнала принимается чаще всего синусоида высокой частоты, обладающая хорошей помехозащищенностью, которая позволяет использовать одну линию связи как многоканальную, в которой каждый источник сигнала использует свою частоту. На рис. 2.3 показана амплитудная модуляция синусоиды импульсным сигналом.

При частотной модуляции изменяется частота несущей синусоиды, например: для передачи «1» используется частота f_1 , а для «0» – $f_2 = 0,5 f_1$. Частотная модуляция применяется в низкочастотных модемах от 300 до 1200 бод (1 бод = 1 бит/с).

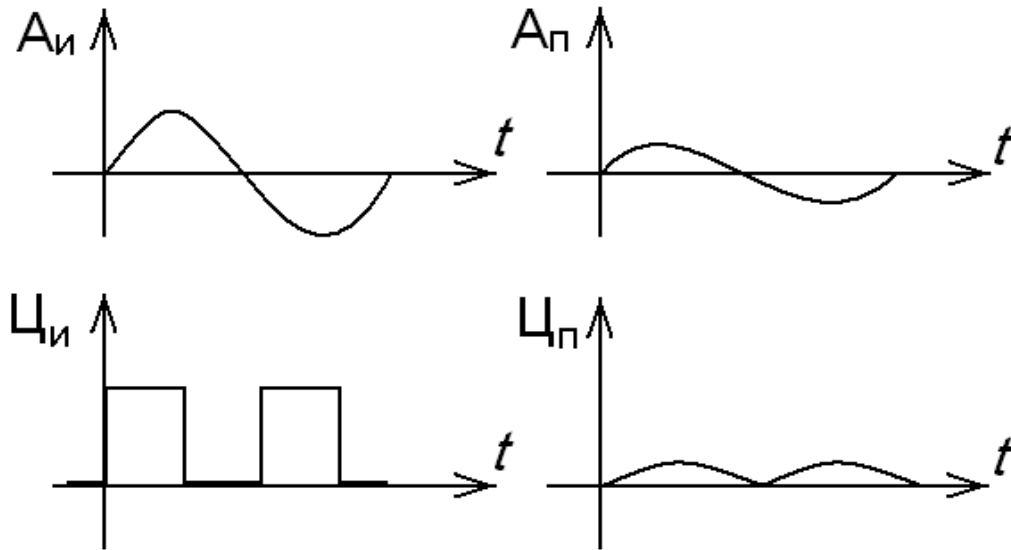


Рис. 2.2. Аналоговый $A_{и}$ и цифровой $Ц_{и}$ сигналы источников и аналоговый $A_{п}$ и цифровой $Ц_{п}$ сигналы на входе приемников

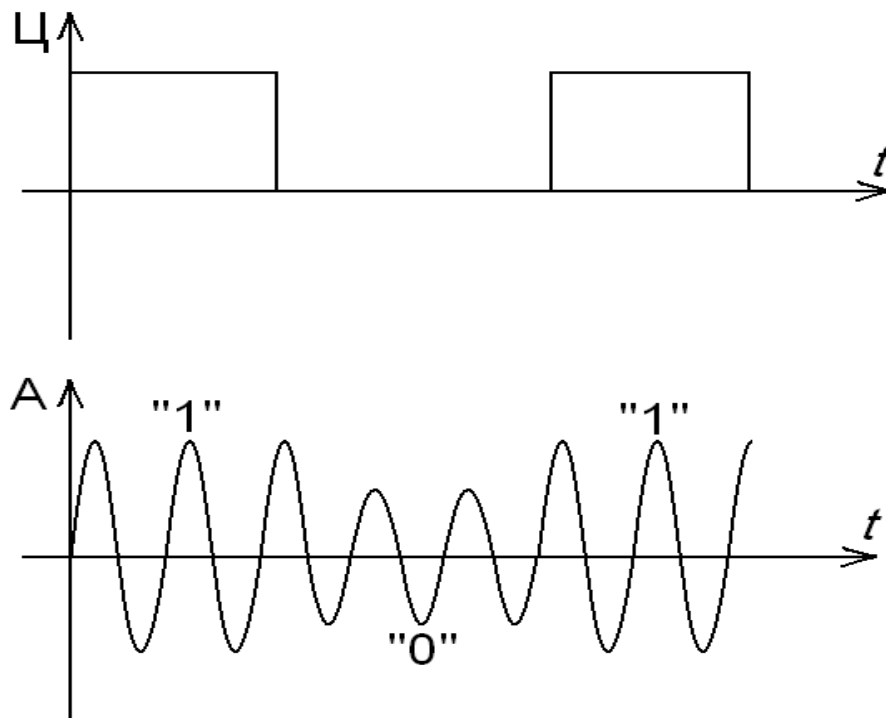


Рис. 2.3. Амплитудная модуляция несущего сигнала A цифровым сигналом $Ц$

При фазовой модуляции используются два постоянных несущих сигнала (для «0» и «1»), сдвинутых по фазе на 180° . Чаще используют другой способ фазовой модуляции, при которой

сдвиг по фазе на 90° по отношению к текущему сигналу указывает на то, что передается «0», а на 270° – «1».

Кодирование информации источника позволяет, используя небольшое число символов в алфавите кода (в частности «0» и «1»), передавать любую информацию. Большинство кодов, применяемых при кодировании информации источника, основаны на системах счисления. Наиболее распространенным является двоично-десятичный код (8-4-2-1).

Недостаток взвешенных кодов заключается в том, что при передаче под действием помех может исказиться любой символ, причем искажение символов в старших разрядах опаснее, чем в младших, поэтому чаще используют невзвешенные коды, у которых ошибки будут одинаковыми для всех разрядов.

Помехоустойчивое кодирование основано на принципе Шеннона: при любой скорости передачи двоичных символов меньшей, чем пропускная способность канала, существует такой код, при котором вероятность ошибочного декодирования сколь угодно мала. Построение такого кода достигается введением избыточностей. Наиболее часто используют блочные коды, когда информация передается в виде кодовых комбинаций (блоков равной длины), при этом к каждому блоку добавляется n символов, например, код на четность, когда каждому блоку добавляется в КК «0» или «1», чтобы число единиц в кодовой комбинации было всегда четным. В ДКК осуществляется автоматическая проверка на четность. Кроме кода на четность используют коды с постоянным весом, где вес – это число единиц, содержащихся в кодовых комбинациях. Недостаток таких кодов – большая избыточность.

К помехозащищенным кодам относятся также циклические коды, характеризующиеся циклической перестановкой всех символов в кодовой комбинации.

Передача данных от источника к приемнику информации может осуществляться параллельным и последовательным способами. При параллельной передаче все элементы (биты) цифрового слова посылают в линию связи одновременно. При последовательном способе биты цифрового слова передаются от источника к приемнику последовательно по времени (друг за другом). Последний способ позволяет решать задачи по надежной и эко-

номичной передаче данных на большее расстояние, однако, по сравнению с параллельным имеет большее время передачи, которое увеличивается пропорционально длине цифрового слова.

Синхронизация передаваемых данных может быть обеспечена тремя путями:

- Синхронная передача сигнала;
- Асинхронная передача сигнала;
- Передача сигнала с автоподстройкой.

При синхронном способе передачи сигнала между передатчиком ПРД и приемником ПРМ, кроме линии передачи данных, существует отдельная линия передачи сигналов синхронизации от общего тактового генератора ТГ (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Синхронная передача сигнала

Синхронный способ применяется в тех случаях, когда необходимо передавать большие блоки информации, при этом весь блок передается как одно целое. Блоки (кадры) информации отделяются друг от друга одним или несколькими байтами, что необходимо для разделения приемником цепочки бит на блоки.

Асинхронный способ применяется тогда, когда передаваемые данные генерируются в произвольные моменты времени. При данном способе принимающее устройство должно устанавливать синхронизацию в начале каждого передаваемого блока информации, но при этом не требуется отдельная линия синхронизации. Тактовые генераторы имеют и приемник и передатчик. При асинхронном способе с последовательным типом передачи информации поток передаваемых бит делится на кадры, при этом каждый кадр содержит стартовый бит, который включает процесс синхронизации, и стоповый бит (рис. 2.5). Так как частоты на приемной и передающей стороне могут отличаться друг от друга

(до 3 %), стоповый бит может иметь длину от 1,5 до 2 бит. Бит паритета P добавляется к передаваемому байту для контроля кода на четность (или нечетность) с целью обеспечения достоверности передаваемой информации.

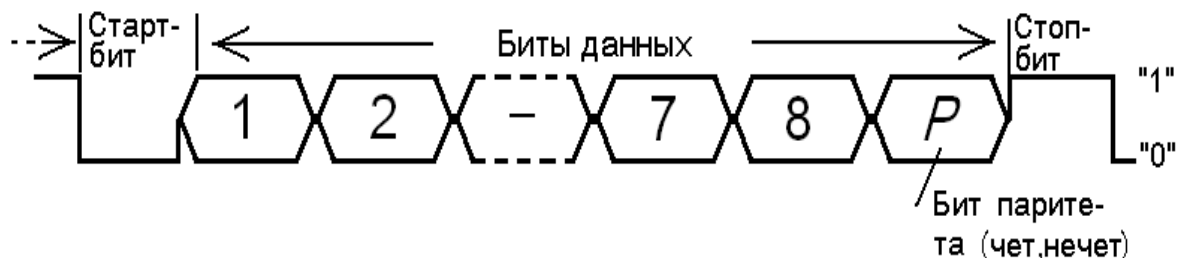


Рис. 2.5. Структура передаваемого кадра (байта) при асинхронном способе передачи данных

Стартовый бит (логический «0») каждого следующего байта посылается в любой момент времени, т.е. между передачей возможны паузы произвольной длины, при этом запускается стартовый генератор приемника, начинается прием информации. Недостатком является то, что скорость передачи очень низкая – 9600–19600 бод. Для повышения скорости в асинхронном режиме иногда используют манчестерский код, в котором синхронизируется передача каждого бита, поэтому последовательность бит в кадре может быть любой длины. После каждого простоя осуществляется предварительная синхронизация тактовым генератором, которая достигается посылкой последовательных битов (преамбула).

2.2. Линии связи

В качестве линии связи в АСУ ТП могут быть использованы:

- Кабели на основе витых пар проводов;
- Коаксиальные кабели (КК);
- Оптоволоконные кабели (ОВК);
- Радиолинии;
- Инфракрасные каналы.

Основные характеристики кабельных линий связи:

- Максимальное затухание сигнала, передаваемого по кабелю, на разных частотах (дБ);
- Полоса пропускания – интервал частот, в пределах которого мощность передаваемого сигнала на выходе из канала не опускается ниже половины мощности сигнала на его входе. Для самых совершенных кабелей на основе витых пар полоса пропускания равна 100 мГц;
- Скорость передачи данных (бит/с);
- Величина перекрестной наводки на ближнем конце кабеля, которая характеризует влияние проводов кабелей друг на друга (дБ);
- Волновое сопротивление кабеля – это отношение напряжения к силе тока в любой точке кабеля. Волновое сопротивление зависит от конструктивных особенностей кабеля (сечения, количества и формы проводников, материала и толщины изоляции и др.) и составляет от 50–100 Ом для коаксиального кабеля и 100–150 Ом для витой пары.

Величина волнового сопротивления R_B может быть измерена с помощью генератора прямоугольных импульсов и осциллографа по отсутствию искажения формы передаваемого по кабелю импульса (рис. 2.6). При подборе $R_H = R_B$ искажение формы передаваемого импульса отсутствует.

Затухание сигналов в линии связи характеризуется интегральными показателями: а) для аналогового сигнала интегральный показатель определяется выражением $\rho = L \Delta f$, где L – длина кабеля, Δf – полоса пропускания; б) для дискретного сигнала интегральный показатель равен $\sigma = BL$, где L – длина кабеля, B – скорость модуляции (бит/с).

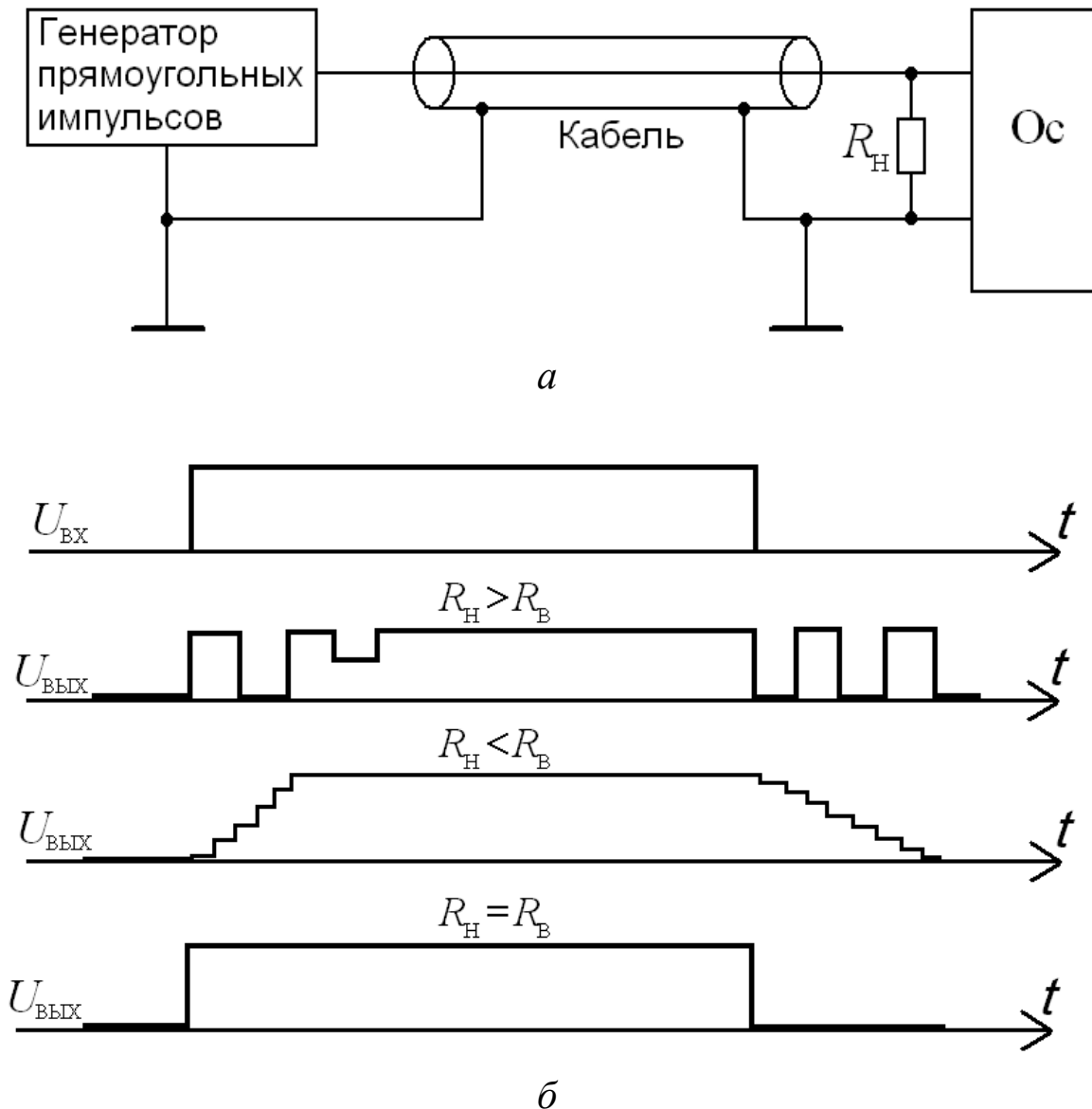


Рис. 2.6. Схема измерения волнового сопротивления кабеля (*a*) и диаграммы напряжения на его входе и выходе (*б*)

Ниже представлена краткая характеристика линий связи.

«Витая пара». Кабель на основе витых пар проводов является популярной физической средой для построения сетей, представляет собой изолированные медные проводники, попарно свитые между собой для уменьшения перекрестных наводок между проводниками. Обычно в оболочке кабеля размещаются 4 витые пары проводников. На рис. 2.7 показано соединение приемника с передатчиком с гальванической развязкой с помощью витой па-

ры. Токи в любой точке пары равны по модулю и противоположны по направлению.

Для относительной оценки мощности полезного сигнала используется показатель в логарифмическом масштабе:

$$E = 10 \lg \frac{U_C^2}{U_{\Pi}^2},$$

где U_C^2 , U_{Π}^2 – мощность полезного сигнала и помехи соответственно.

Относительная мощность полезного сигнала может быть $E = 10 \div 50$ дБ.

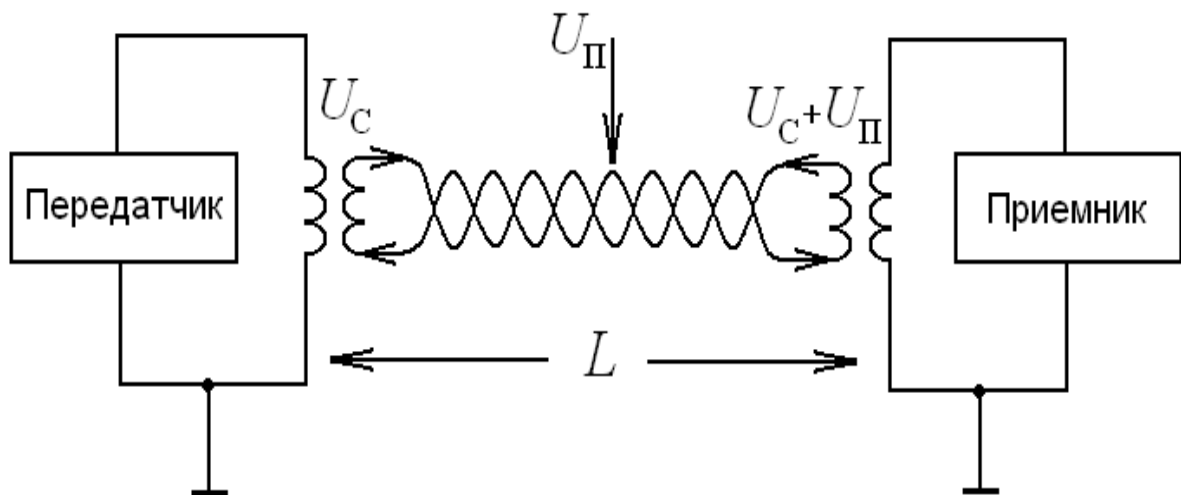


Рис. 2.7. «Витая пара» в качестве линии связи: U_C^2 – мощность полезного сигнала; U_{Π}^2 – мощность сигнала внешней помехи (наводки)

Для снижения наведенных помех кабели экранируют. В зависимости от наличия и вида экрана различают следующие кабели типа «витая пара»:

- *UTR* – неэкранированная «витая пара»;
- *FTR* – «витая пара» с общим для кабеля экраном из фольги;
- *STR* – «витая пара» с индивидуальными экранами из фольги для каждой пары;
- *ScTR* – «витая пара» с экранированием медной оплеткой каждой пары.

Для снижения помех, кроме экранирования кабелей, используют дифференциальную передачу по «витой паре». При этом передатчик ПРД формирует противофазные сигналы (рис. 2.8), а приемник ПРМ реагирует на разность сигналов. Помехи действуют одинаково в обоих проводниках, и поэтому в разностном сигнале на входе приемника будут отсутствовать.

Достоинства кабелей типа «витая пара»:

- невысокая стоимость;
- простота монтажа и демонтажа.

Недостатками «витой пары» является меньшая, чем у других кабелей, полоса пропускания.

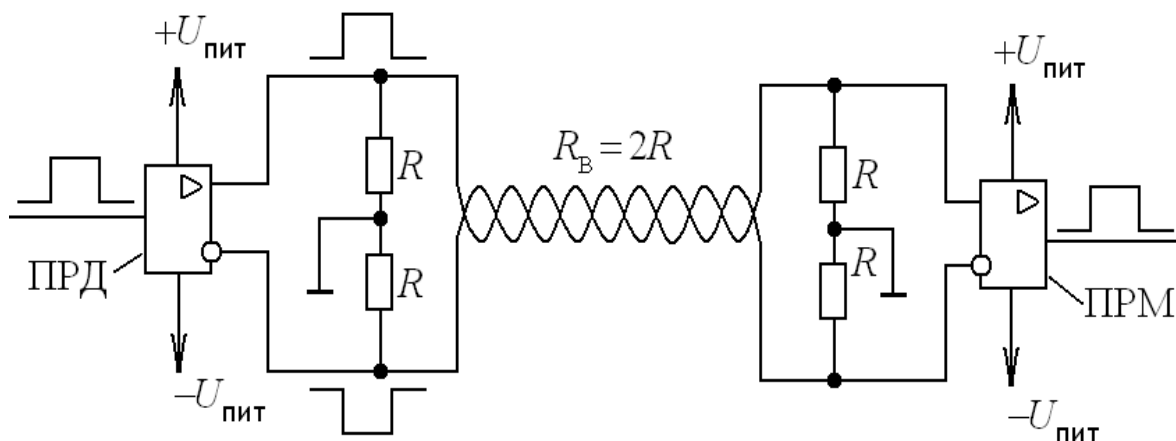


Рис. 2.8. Схема дифференциальной передачи по «витой паре»:

согласующий резистор R выбирается из условия $R = \frac{R_{\text{в}}}{2}$

Коаксиальный кабель. КК представляет собой электрический кабель, состоящий из центрального провода и металлической оплетки, разделенных между собой слоем диэлектрика. Широкое использование данного кабеля обусловлено его высокой помехозащищенностью, сравнительно высокой скоростью передачи данных (до 500 Мбит/с) и большими доступными расстояниями передачи (до километра и выше). Однако монтаж и ремонт кабеля существенно сложнее «витой пары», его стоимость в 1,5–3 раза больше. Основное применение коаксиальный кабель находит в сетях с топологией «шина».

Оптоволоконный кабель. ОВК по структуре похож на коаксиальный электрический кабель, только вместо центрального медного провода здесь используется тонкое (диаметром 1–10 мкм) стекловолокно, а вместо внутренней изоляции – стеклянная или пластиковая оболочка, не позволяющая свету выходить за пределы стекловолокна. Информация по кабелю передается не электрическим сигналом, а световым. Формирование светопотока осуществляется полупроводниковым лазером для больших расстояний и светодиодом – для малых расстояний. Приемником является фотодиод. Кабель включает в себя от 2 до 36 световодов (волокон), помещенных в резино-свинцовую оболочку. Для прочности в кабель вводят металлический трос. Для защиты кабеля от механических повреждений иногда используют металлическую оплетку, и такой кабель называют броневым. Оптоволоконный кабель по сравнению с ранее рассмотренными кабелями обладает исключительно высокими характеристиками по помехозащищенности, полоса пропускания у него может достигать величины 10^{12} Гц, величина затухания сигнала, особенно на высоких частотах, существенно ниже, чем у электрических кабелей. Основные недостатки кабеля: высокая стоимость кабеля и монтажа, невысокая механическая прочность и гибкость, чувствительность к резким перепадам температуры и ионизирующим излучениям. Применяют оптоволоконный кабель в сетях с топологией «звезда» и «кольцо» в производственных помещениях с большими электромагнитными помехами.

Кроме кабельных средств связи в промышленных сетях иногда используют радиоканалы и инфракрасные каналы, которые не требуют соединительных проводов (беспроводные каналы связи).

Радиоканалы: передача организуется с помощью радиомодемов: используются вне предприятия для связи с удаленными сегментами системы управления. Расстояние до 100 и более километров, скорость передачи до десятков Мбит/с, диапазон частот от 2 до 3 ГГц.

Инфракрасные каналы: обеспечивают беспроводную связь на расстояние 10 метров и более. Такие каналы не чувствительны к электромагнитным помехам, скорость передачи – до 5 Мбит/с, в качестве передатчика используется светодиод

с эффективной длиной волны 880 нм, а в качестве приемника используется *PIN*-диод. Для инфракрасных каналов $E = 50$ дБ.

2.3. Интерфейсы проводных каналов связи

Интерфейс – это совокупность унифицированных программных и конструктивных средств, необходимых для реализации взаимодействия различных функциональных элементов в цифровых системах. В зависимости от признака интерфейсы подразделяются:

По функциональному назначению:

- Внутримашинные;
- Интерфейсы периферийных устройств;
- Сетевые интерфейсы.

По типу организации связи (по топологии – способу сетевого соединения различных устройств):

- Радиальные «звезда» – вся информация передается через центральный узел, который должен иметь высокую надежность. Каждое устройство имеет собственную среду соединения, свой порт в центральном узле. Преимуществом такой структуры связи является то, что абоненты не влияют друг на друга;

- «Кольцо» – информация передается от узла к узлу, при этом каждый приемник копирует информацию и регенерирует данные вместе со своей квитанцией подтверждения следующему узлу. Недостатком этой структуры связи является то, что отказ узла приводит к отказу всей сети. Чтобы этого не произошло, в сеть включают автоматические переключатели, которые исключают (закорачивают) неисправный узел из сети;

- Магистраль «шина» – все абоненты (устройства) подсоединены к одной линии связи и, в отличие от «кольца», адресат получает свой пакет без посредников. Однако шинная топология требует жесткой регламентации доступа к среде передачи.

Сравнительные характеристики рассмотренных топологий представлены в табл. 2.1.

По принципу обмена информацией:

- С параллельной передачей информации;

- С последовательной передачей информации.
По режиму обмена информацией:
 - Симплексный (односторонний – передача данных только в одном направлении);
 - Дуплексный (двусторонний – одновременная передача данных в двух противоположных направлениях);
 - Полудуплексный (используется одна и та же «шина» – сначала для передачи информации в одну сторону, потом в другую);
 - Мультиплексный (многоканальный).
- По способу передачи информации:
 - Синхронный;
 - Асинхронный.

Таблица 2.1

Сравнительные характеристики основных топологий

Характеристика	ТОПОЛОГИЯ		
	«ЗВЕЗДА»	«КОЛЬЦО»	«ШИНА»
1. Режим доступа	Доступ и управление через центральный узел	Децентрализованное управление. Доступ от узла к узлу	Возможен централизованный и децентрализованный доступ
2. Надежность	Сбой центрального узла – сбой всей системы	Разрыв линии связи приводит к сбою всей сети	Ошибка одного узла не приводит к сбою всей сети
3. Расширяемость	Ограничена числом физических портов на центральном узле	Возможно расширение числа узлов, но время ответа снижается	Возможно расширение числа узлов, но время работы снижается

Сетевые интерфейсы

В промышленных сетях в основном используются стандартные интерфейсы, регламентирующие передачу информации в последовательном коде. Наиболее распространенные из них: ИРПС, RS-232C, RS-422A, RS-485A.

Интерфейс ИРПС.

ИРПС – интерфейс радиальной последовательной связи. ИРПС предназначен для радиального подключения устройств с последовательной асинхронной передачей информации постоянным током по четырехпроводной дуплексной схеме. ИРПС также называют интерфейсом типа «токовая петля».

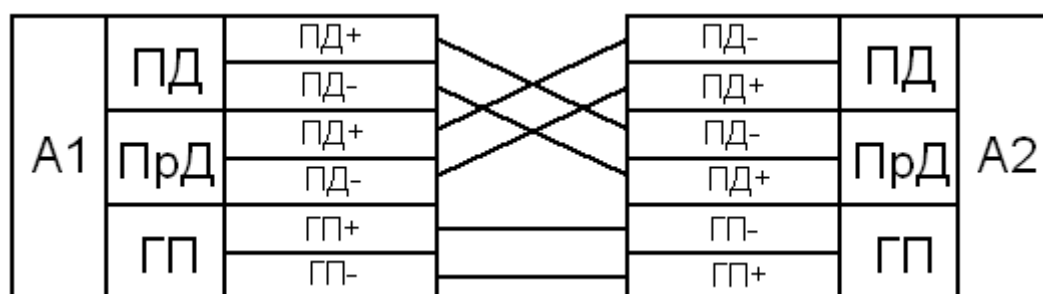


Рис. 2.9. Схема соединения устройств А1 и А2 по типу ИРПС:

ПД – передаваемые данные; ПрД – принимаемые данные;

ГП – готовность приема (необязательная цепь);

+, – – показывают направление тока в токовой петле

ИРПС обеспечивает передачу информации со скоростью 9600 бит/с на расстояние до 500 м по кадровому формату (см. рис. 2.5). При этом «1» соответствует ток 20 мА, а «0» – 5 мА.

Интерфейс RS-232C.

Интерфейс стандарта Ассоциации электронной промышленности США (EIA) RS-232C (европейский аналог – стандарта CCITT V.24) введен в действие в 1969 г. Интерфейс этого типа применим для синхронной и асинхронной связи между устройствами в симплексном, полудуплексном и дуплексном режимах через среду связи, содержащую как выделенные телефонные каналы или физические линии, так и коммутируемые телефонные каналы.

RS-232C регламентирует электрические характеристики сигналов интерфейса, нумерацию цепей, скорость передачи информации, тип используемых разъемов. *RS-232C* используется для передачи данных между модемами, терминалами, компьютерами, контроллерами в симплексном, в дуплексном и полудуплексном режимах. Электрическая система основана на импульсах 12 В, используются 9- и 25-контактные разъемы *DB9*, *DB25*. Скорость передачи информации при $L = 15$ м – 38400 бит/с, а при $L = 900$ м – 1200 бит/с. Все множество цепей интерфейса функционально подразделяется на цепи данных, управления, синхронизации, заземления и контроля. В зависимости от условий его конкретного применения используются не все из возможных 25 цепей, а лишь отдельные их группы. Так, для связи по прямой телефонной линии в режиме асинхронного обмена требуется 8 цепей, а для аналогичной связи по физическим линиям – только 3. На рис. 2.10 в качестве примера приведена простейшая схема соединения контроллера *PLC* с компьютером ПК по интерфейсу *RS-232C* с трехпроводной линией связи.

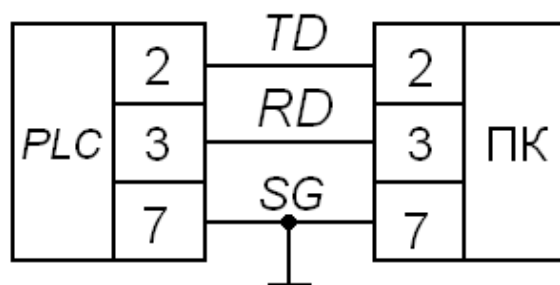


Рис. 2.10. Схема соединения устройств по интерфейсу *RS-232C* с трехпроводной линией связи:

TD – данные передатчика; *RD* – данные приемника;
SG – сигнальная земля

В производственных помещениях *RS-232C* почти не используется ввиду плохой помехозащищенности. В *COM* – портах персональных компьютеров данный стандарт используется для подключения к ним близко расположенных внешних устройств.

Интерфейс RS-422A.

Этот стандарт позволяет улучшить согласование линий, увеличить расстояние и скорость передачи данных, ориентирован на использование дифференциальной балансовой линии передачи с импедансом 50 Ом, что повышает помехоустойчивость интерфейса. Скорость передачи информации до 10 Мбит/с при длине кабеля $L \leq 13$ м и 100 кбит/с при $L = 1300$ м. RS-422A допускает подключение к одному передатчику до 10 приемников. Применяется на низких уровнях АСУ ТП (в производственных помещениях).

Интерфейс RS-485A.

RS-485A наиболее распространен на нижних уровнях АСУ ТП, обладает хорошими параметрами по помехозащищенности. RS-485A обеспечивает работу многоточечной системы, в которую могут входить до 32 узлов. Скорость передачи информации до 10 Мбит/с при $L = 200$ м и до 100 кбит/с при $L = 1300$ м. Подключение генераторов и приемников устройств к двухпроводной линии связи «витые пары» показано на рис. 2.11.

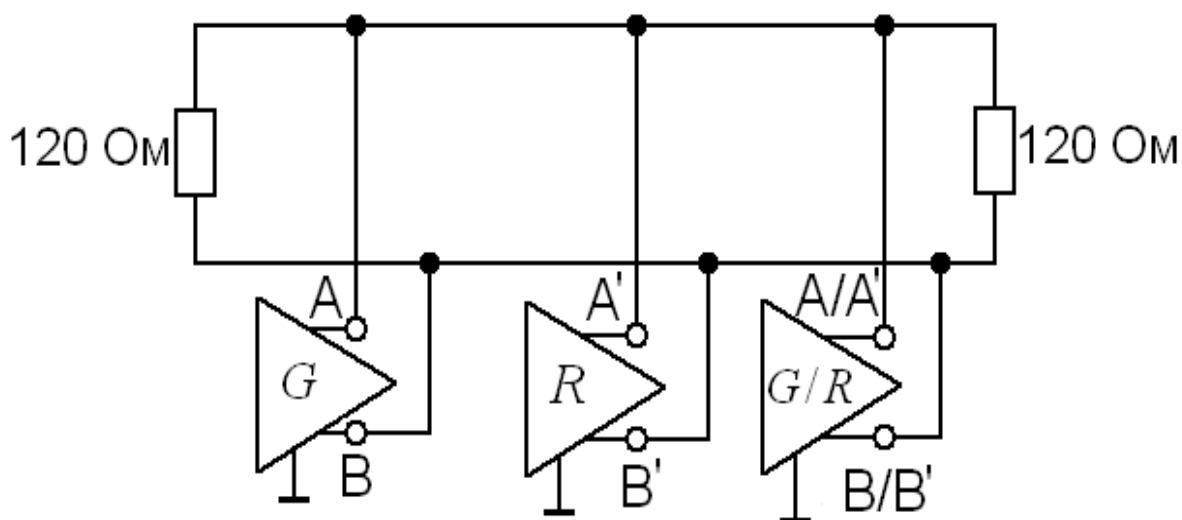


Рис. 2.11. Схема соединения устройств по интерфейсу RS-485A:
 G – передатчик (формирователь) сигнала; R – приемник сигнала;
 120 Ом – согласующие резисторы

Сравнительные характеристики наиболее часто используемых в промышленности проводных интерфейсов представлены в табл. 2.2.

Как видно из табл. 2.2, два первых интерфейса имеют двухстороннюю схему передачи данных, а интерфейс RS-485A поочередную передачу данных в противоположных направлениях. Это обусловлено тем, что двухпроводная линия связи позволяет осуществлять только последовательную передачу сигналов в одну сторону (симплексный режим) или поочередно в обе стороны (полудуплекс).

Таблица 2.2

Характеристики проводных интерфейсов

Тип интерфейса	Тип связи	Скорость (V) и расстояние (L) передачи данных
RS-232C	Дуплексная	$V=20$ кбит/с, $L=15$ м
RS-422A	Дуплексная	$V=10$ Мбит/с, $L=12$ м $V=1$ Мбит/с, $L=120$ м $V=100$ кбит/с, $L=1200$ м
RS-485A	Полудуплексная, до 32 параллельно соединенных приемопередатчиков	$V=10$ Мбит/с, $L=12$ м $V=1$ Мбит/с, $L=120$ м $V=100$ кбит/с, $L=1200$ м

При использовании двух пар проводов можно реализовать дуплексную (одновременно в обе стороны) последовательную передачу. Поскольку при реальном обмене практически всегда одно устройство передает поток информации, а другое – только подтверждение ее приема или сообщения об ошибках, дуплексный канал может быть ассиметричным – иметь значительно различающиеся пропускные способности в противоположных направлениях.

Последние два стандарта (см. табл. 2.2) позволяют объединять приборы в разветвленные сетевые структуры. Трехпроводный интерфейс RS-232C позволяет простым способом подключить к персональному компьютеру удаленные до 900 м устройства (системы), встраивая в ПК стандартный мультиплексор RS-232C на требуемое количество каналов (4, 8 или 16). Структу-

ры АСУ, использующие внутризаводские или городские телефонные линии (коммутируемые линии связи), так же работают с интерфейсом RS-232C, к которому в этом случае подключаются модемы со стороны как устройств (систем), так и ПК (рис. 2.12, а). Современный интерфейс RS-485 позволяет создавать разветвленные АСУ по многоточечной схеме с удалением устройств (систем) до 1200 м от ПК и с минимальными затратами кабеля (используются двух- или четырехпроводные «витые пары», см. рис. 2.12, б).

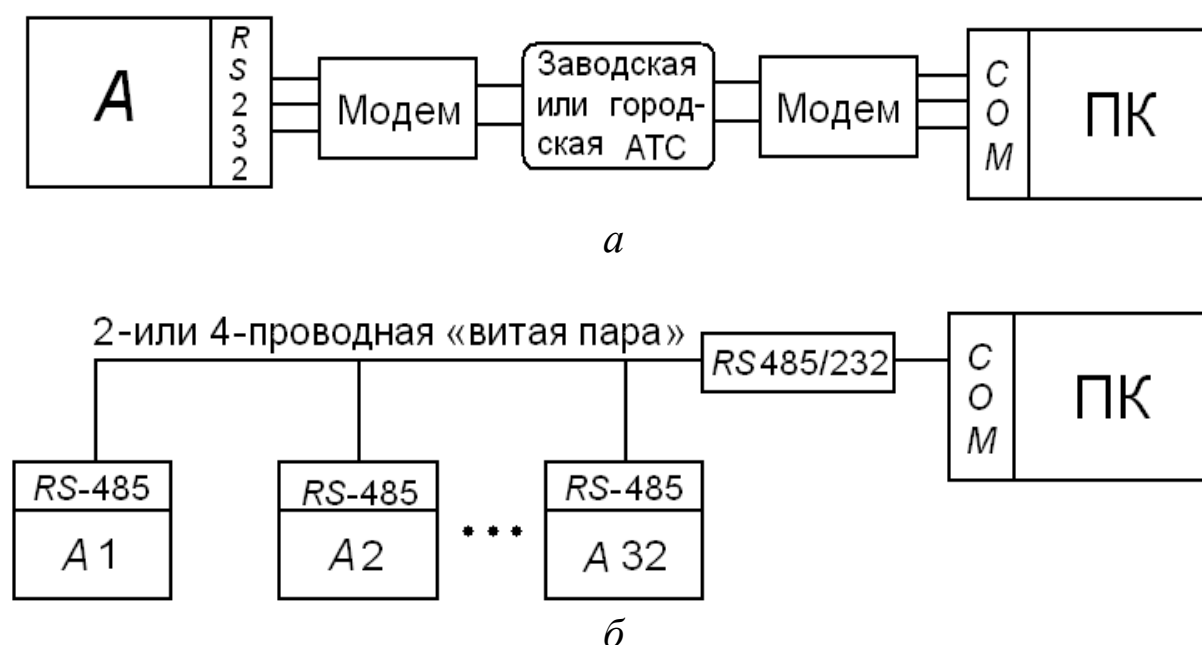


Рис. 2.12. Сетевые структуры АСУ с использованием коммутируемого телефонного канала и интерфейса RS-232 (а) и «витой пары» и интерфейса RS-485 (б): А – устройство (система); ПК – персональный компьютер; RS 485/232 – преобразователь интерфейсов

2.4. Промышленные сети

2.4.1. Общие положения

В 70-х гг. XX века технология аналоговой приборной связи 0(4)...20 мА стала стандартной, в результате чего производители

контрольно-измерительной аппаратуры получили средство коммуникации, на основе которого их продукты можно было интегрировать в единые системы управления. С развитием цифровой технологии ситуация в этой области изменилась. Благодаря таким преимуществам, как экономичность решений, информативность, надежность и безопасность, наблюдается бурный переход от аналоговой технологии к цифровой.

В 80-х гг. цифровая технология проникла на все уровни промышленного производства – начиная с офисов и кончая датчиками.

По назначению различают локальные сети *LAN*, городские сети *MAN* и глобальные сети *WAN*. Промышленные сети относятся к локальным сетям, обеспечивающим информационные потоки между компьютерами, контроллерами, датчиками и исполнительными механизмами.

Промышленная сеть – это среда передачи данных, которая должна отвечать множеству разнообразных, зачастую противоречивых требований, набор стандартных протоколов обмена данными, позволяющий связать воедино оборудование различных производителей, а также обеспечить взаимодействие нижнего и верхнего уровней системы управления предприятием.

Промышленные сети могут быть открытыми и закрытыми: первые из них поддерживают международные стандарты, вторые – это сети, работающие по уникальным протоколам одного из производителей и не имеющие совместимости с техническими средствами других производителей. Промышленная сеть должна обеспечивать на своем уровне совместимость приборов от разных производителей и выход в коммерческие системы обработки данных, например *MAP* или *TOP*.

По уровню использования промышленные сети делятся на следующие виды:

1. Стандартные сети или сети устройств, действующих на уровне низовой автоматики и объединяющие удаленные модули ввода/вывода, интеллектуальные датчики и исполнительные механизмы (сети *Device Net*, *InterBus*, *ModBus ASI* и др.).

2. Контроллерные сети или сети управления, объединяющие контроллеры, промышленные компьютеры (сети *ProfiBus*, *Control Net*, *BITBus* и др.).

3. Универсальные сети – сети диспетчерского управления (MAP, TOP, Internet).

4. Сети Internet с протоколом TCP/IP.

Сравнительные характеристики промышленных сетей уровня устройств и контроллерного уровня приведены в табл. 2.3.

Стандартной промышленной сети сейчас не существует, так как эта область развивалась благодаря усилиям отдельных компаний или их групп. В 1976 г. Международной организацией по стандартизации (ISO) с целью разрешения проблемы взаимодействия сетевых систем с различными видами вычислительного оборудования и различающимися стандартами протоколов была предложена «Описательная модель взаимосвязи открытых систем» (OSI – модель, ISO/OSI Model или семиуровневая модель).

Таблица 2.3

Сравнительные характеристики промышленных сетей

Характеристика	Сети	
	Сенсорные	Контроллерные
1. Расширение	До 1000 м	100 ÷ 10000 м
2. Время цикла	1 мс ÷ 1 с	10 мс ÷ 10 с
3. Объем передаваемых данных в одной посылке	1 ÷ 8 байт	8 ÷ 1000 байт
4. Доступ к шине	Фиксированный/ Свободный	Свободный
5. Цена подключения узла, евро	10 ÷ 100	150 ÷ 560

В табл. 2.4 представлены все уровни и функции этой модели.

Большинство промышленных сетей поддерживают 1, 2 и 7-й уровни OSI-модели – физический, канальный (уровень передачи данных) и прикладной уровень.

Сеансовый уровень определяет синхронизацию информационного взаимодействия прикладных процессов обмена данными,

т.е. поддержание диалога между процессами определенного типа (стандарт *ЕСМА-75*).

Уровень представления данных обеспечивает представление данных в требуемом формате. Хранение и обработка данных осуществляется СУБД (стандарт *ЕСМА-84, -86, -88*).

Прикладной уровень обеспечивает непосредственную поддержку прикладных процессов и программ конечного пользователя и управление взаимодействием этих программ с различными объектами сети передачи данных (реализуются функции «объект – объект», «объект – оператор», «оператор – объект», «объект – архив»).

Таблица 2.4

Модель *ISO/OSI*

Уровень <i>ISO</i> -модели	Функции
7. Прикладной (<i>Application</i>)	Обеспечивает связь программ пользователя с объектами сети
6. Представление данных (<i>Presentation</i>)	Определяет синтаксис данных, управляет их отображением на виртуальном термине
5. Сеансовый (<i>Seansion</i>)	Управляет ведением диалога между объектами сети
4. Транспортный (<i>Transport</i>)	Обеспечивает прозрачность передачи данных между абонентами сети
3. Сетевой (<i>Network</i>)	Определяет маршрутизацию «пакетов» сети и связи между сетями
2. Канальный (<i>Data Link</i>)	Обеспечивает передачу данных («кадров») по каналу, контроль ошибок и синхронизацию данных
1. Физический (<i>Physical</i>)	Устанавливает и поддерживает физическое соединение устройств

Физический уровень обеспечивает необходимые механические, функциональные и электрические характеристики для установления, поддержания и размыкания физического соединения (стандарт *X.21 ICSTT* – Международный консультативный комитет по телефонии и телеграфии).

Канальный уровень гарантирует передачу данных между устройствами. Этот уровень управляет не только сетевым доступом, но также механизмами защиты и восстановления данных в случае ошибок при передаче (стандарт *HDLC ISO*).

Сетевой уровень определяет функции маршрутизации «пакета» через несколько логических каналов по одной или нескольким сетям. Принадлежностью пакета является сетевой адрес (стандарт *X.25 ICSTT*).

Транспортный уровень решает задачи прокладки маршрута в сети и продвижения пакета данных по маршруту.

Методы организации доступа к линиям связи

Метод доступа – это набор правил, позволяющий пользователям работать с локальной сетью, не мешая друг другу. Метод доступа реализуется на физическом уровне.

Если несколько устройств коммутируются между собой через общую линию связи (шину), то должен быть определен ясный и понятный протокол доступа к ней. Существуют два метода упорядоченного доступа: централизованный и децентрализованный.

В случае централизованного контроля за доступом к шине выделяется узел с правами Мастера. Он назначает и отслеживает порядок и время доступа к шине для всех других участников. Если на Мастере произошла авария, то и циклы обмена по шине останавливаются. Именно по этой причине децентрализованный контроль с переходящими функциями мастера от одного участника (узла сети) к другому получил наибольшее развитие. Здесь права Мастера назначаются группе устройств сети. Во всем мире приняты и широко используются две модели децентрализованного доступа: модель *CSMA/CD* и модель с передачей маркера.

Модель *CSMA/CD* (*Ethernet*, стандарт *IEEE 802-3*). Наиболее известным механизмом управления локальной сетью шинной

конфигурации является метод множественного доступа с контролем несущей и обнаружением конфликтов (*CSMA/CD – Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect*). Наиболее широко известная реализация этого метода – спецификация *Ethernet*. Все станции на шине имеют право передавать данные. Каждая из них постоянно прослушивает шину. Если шина свободна, любая из станций сети может занять шину под свой цикл передач. В том случае, когда несколько станций претендуют на шину одновременно, это приводит к так называемому конфликту (коллизии), и тогда станции снимают свою «заявку» на случайный промежуток времени, задаваемый случайным генератором, и затем через удвоенный промежуток времени вновь выходят в сеть. Аналогией подобного метода взаимодействия может служить «разговор группы воспитанных людей в небольшой темной комнате». Каждый человек в комнате слышит речь других людей – обнаружение несущей. Все в комнате имеют одинаковые возможности вести разговор – это множественный доступ, но никто не говорит слишком долго, так как все вежливы. Все, находящиеся в комнате, молчат, пока кто-то не начинает говорить. Если два человека начинают говорить одновременно, то они сразу обнаруживают эту коллизию. В этом случае они замолкают на некоторое время, после чего один из них может вновь начать говорить. Другие люди слышат, что ведется разговор, и ждут, когда он закончится, после чего сами могут говорить. При этом в начале разговора называется имя того, к кому обращаются (своего рода адрес), а затем и свое имя. Возможен аналог широкопередаточной передачи, когда кто-то обращается ко всем одновременно.

Одним из реальных способов определения наличия коллизий при передаче, например по коаксиальному кабелю, является способ определения коллизий по повышенному уровню постоянной составляющей сигнала. Детектор коллизий определяет превышение уровнем сигналов определенного порога (около 1,5 В), что означает, что на кабель работает более одного передатчика.

Метод *CSMA/CD* получил широкое распространение и наиболее эффективен в условиях относительно низкой общей загрузки канала (менее 30 %). В условиях большей загрузки канала выгоднее использовать сети, реализующие модель с передачей маркера.

Модель с передачей маркера (*Token Passing Model*, стандарт *IEEE 802.4*). Право на доступ к шине передается в цикле от устройства к устройству. Порядок передачи зависит от прикладной задачи и определяется на стадии планирования системы. Этот метод предлагает каждому участнику сети «справедливое» разделение шинных ресурсов в соответствии с их запросами. Принцип передачи маркера используется в системах, где реакция на события, возникающие в распределенной системе, должна проявляться за определенное время. Для совместной работы сетей типа *CSMA/CD* и *Token Model* необходим так называемый межсетевой шлюз.

Метод MASTER–SLAVE (централизованный метод) находит свое применение в промышленных сетях как на контроллерном уровне (*field level*), так и на уровне датчиков и исполнительных механизмов (*sensor/actuator level*). Право инициировать циклы чтения/записи на шине имеет только *MASTER*-узел. Он адресует каждого пассивного участника (*SLAVE*-узел), обеспечивает их данными и запрашивает у них данные. Для того чтобы увеличить пропускную способность шины, команды протокола должны быть как можно проще. В рамках протокола решаются такие задачи, как защита данных, обнаружение ошибок при передаче, восстановление данных. На скорость и объем передаваемой информации естественным образом влияет среда передачи.

2.4.2. Структура и активные элементы промышленной сети

Физически промышленная сеть включает в себя сегменты (отрезки кабеля) и набор активных устройств, осуществляющих формирование, преобразование, коммутацию, передачу сигнала с использованием внешнего источника энергии. Активные устройства можно разделить на рабочие станции (источники и приемники сигнала – это промышленные компьютеры, *PLC*, интеллектуальные устройства), репитеры, концентраторы, хабы, трансиверы, мосты, маршрутизаторы и шлюзы.

Сеть состоит из сегментов – участков кабеля, заканчивающихся нормирующимися резисторами – терминаторами. Кабели через ответвители подключаются к различным узлам (рис. 2.13).

Если сеть больше длины сегмента, то к концу кабеля через ответвитель подключают повторитель. Повторитель – это двухпортовое активное физическое устройство, которое восстанавливает и переправляет сигналы с одного сегмента на другой.

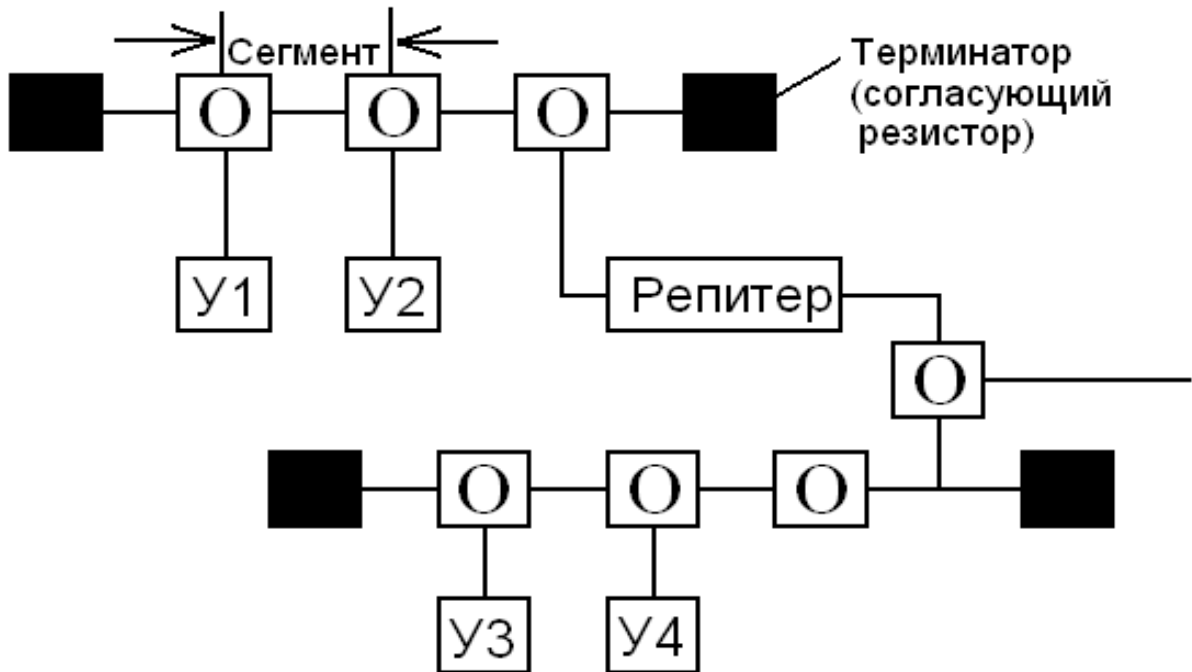


Рис. 2.13. Структура промышленной сети:
У – узел (подключаемое устройство); О – ответвитель

Многопортовые репиторы называются концентраторами. Их функции те же, что и у репитера.

С появлением протокола 10 *BaseT* «витой пары» концентраторы стали называться хабами. Большинство концентраторов и хабов выполняют следующие операции:

- Автосегментация – автоматическое включение и отключение порта, отображение состояния портов с помощью светодиодов;
- Обнаружение ошибки полярности сигнала. Репитеры и концентраторы могут использоваться для увеличения размера и организации требуемой топологии сети, за исключением топологии «кольцо».

В настоящее время хабы относят к устаревшему оборудованию. По всем техническим показателям они уступают коммута-

торам, которые имеют в 10 раз большую скорость обмена информацией в сети, однако хабы на 30–40 % дешевле коммутаторов и они более надежны в тяжелых условиях эксплуатации.

Коммутаторы – это многопортовые устройства. Их делят на 2 класса:

5–8-портовые коммутаторы, которые используются в сетях небольшого размера;

12-, 16-, 24-портовые, которые используются в более сложных сетях, имеют порты для коаксиального и трансиверного (AUI) кабелей.

Мосты.

Если 2 сегмента сети слишком велики для объединения их в один коллизийный домен (логическое объединение сети) и территориально удалены друг от друга, то применяют мосты. Мосты – это устройства, соединяющие 2 отдельные сети или 2 сегмента одной сети, в которой используются одинаковые протоколы обмена информацией. Мосты устанавливают соединения, фильтруют пакеты. По принципу действия они не отличаются от коммутаторов в том, что коммутатор – это многопортовое устройство и в основном ассоциируется с сетями *Ethernet*, а мосты чаще всего одноканальные устройства, и термин ближе к пользователям, работающие с полевой шиной. В последнее время мостами стали называть устройства, предназначенные для связи локальных сетей с фазными физическими средами передачи.

Маршрутизаторы – это устройства, выбирающие маршрут передачи данных. Они осуществляют виртуальное соединение на 4 уровне модели *OSI/ISO*. Если мосты для передачи кадров (пакетов) используют адреса физического уровня, то маршрутизаторы используют *IP* адреса *Internet* протокола. При этом маршрутизатор разворачивает пакет данных и извлекает из него дейтограммы *IP* и по его заголовку направляет пакет абоненту. Дейтограммы – это способ передачи пакетов в произвольном порядке без подтверждения получения пакета. Маршрутизаторы, подобно повторителям, используют буферизацию сигнала, а затем восстанавливают его уровень и форму. Они могут соединять сети с различными протоколами доступа, но при этом верхние уровни модели *OSI/ISO* (5, 6, 7 уровни) отправителя и получателя должны быть одинаковыми (рис. 2.14).

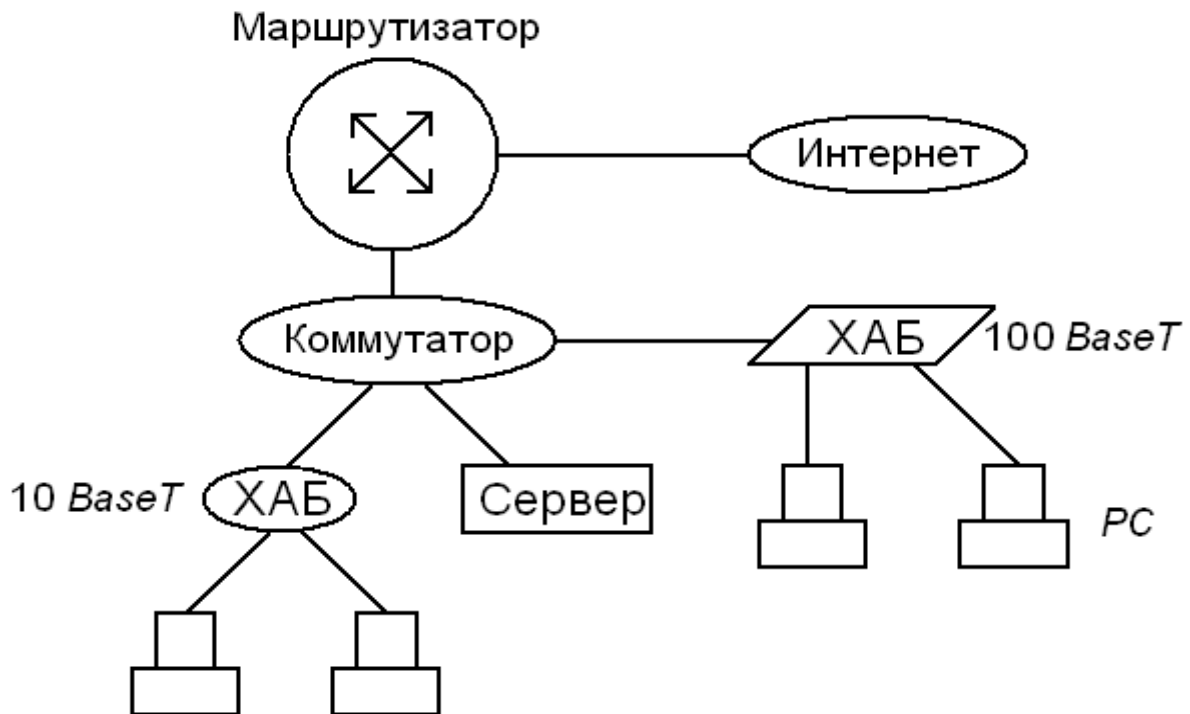


Рис. 2.14. Структура компьютерной сети с маршрутизатором, коммутатором и хабами

Шлюзы – это устройства, служащие для объединения сетей с различными протоколами обмена. Шлюз обычно выполняет протоколы на всех уровнях модели *OSI/ISO*. Также шлюз может выполнять функции маршрутизатора, но скорость при этом несколько снижается.

2.4.3. Краткая характеристика протоколов промышленных сетей

При выборе промышленной сети (протокола) используются следующие критерии:

- Объем передаваемых данных;
- Время передачи фиксированного объема данных;
- Удовлетворительные требования реального времени;
- Максимальная длина шины;
- Допустимое количество узлов;
- Помехозащищенность;
- Стоимость сети в расчет на один узел.

Протокол нижнего (сенсорного) уровня AS(ASI) (рис. 2.15) создан в 1989 г. и поддерживается фирмами *Siemens*, *IBM* и др. По данному протоколу можно передавать не только данные, но и напряжение питания к узлу сети по одной паре проводов. Каждый узел сети должен иметь интерфейсную микросхему с поддержкой данного протокола.

Топология может быть «кольцо», «звезда», «шина», «дерево». Длина сегмента – до 100 м, с репитерами – до 300 м. Максимальное число узлов, подключаемых к *Master* узлу – 62, время цикла – 5–10 мс. Физическая среда – двухпроводной канал. При длине сети $L=300$ м скорость равна 167 кбод. Для передачи информации используется манчестерский код. Общий ток в системе – до 2 А. К каждому узлу подводится напряжение 24 В.

ModBus Modicon – это протокол фирмы *Modicon*, в котором физический интерфейс не определен, пользователь сам выбирает этот интерфейс (чаще RS-485). Конфигурация: 1 *Master* узел и до 247 *Slave* узлов. Протокол описан фиксированной формой команд.

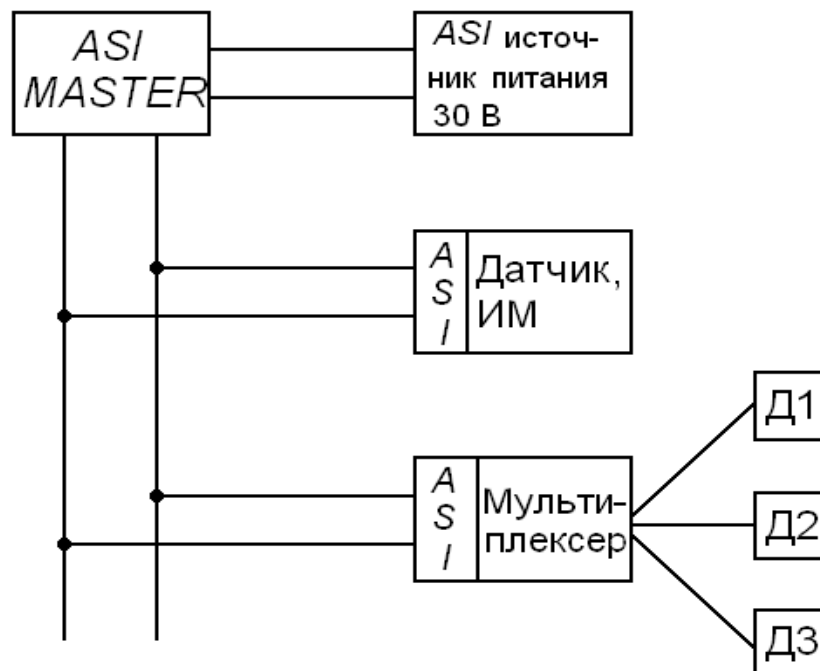


Рис. 2.15. Пример конфигурации устройств по протоколу ASI:
Д1, Д2, Д3 – датчики

HART – это протокол разработан в 1980 г. американской фирмой *Fisher Rosemount*, он реализует принцип частотной модуляции для организации цифровой передачи, основанной на сигнале 4–20 мА. В этой системе на аналоговый сигнал 4–20 мА накладывается частотно-модулированный цифровой сигнал с амплитудой $\pm 0,5$ мА. При этом лог. «1» соответствует частота $f = 1200$ Гц, а лог. «0» – $f = 2200$ Гц. «Витая пара» используется в качестве физической среды. Топология: «звезда» или «точка-точка». Возможна топология «шина» на 1543 узла. Обмен данными-асинхронный. Протокол может иметь до двух мастер-узлов (чаще 1).

InterBus-S – это популярный протокол благодаря дальности охвата, гибкости, быстродействию, хорошей диагностике, разработан в 1984 г. Физический уровень основан на RS-485 и представляет собой последовательное кольцо. Достоинствами этого протокола является то, что он обеспечивает точность сведений о сетевых отказах, что упрощает их поиски и устранение, и может работать как с аналоговыми, так и с цифровыми вводами/выводами. Имеет максимально 512 узлов, расстояние между которыми до 400 м, 12,8 км – общая длина сети, скорость передачи – 500 кбит/с.

Device Net – это протокол, разработанный американской фирмой *Allen Brandy* в 1984 г. Он обеспечивает связь между различными устройствами нижнего и контроллерного уровня. Сеть имеет топологию «шина» с 4-проводной линией связи. Кроме протокола обмена сеть регламентирует разъемы, типы разъемов, диагностирует индикаторы. Дополнительно к чтению состояния дискретных датчиков и управлению пусковыми устройствами сеть позволяет передавать величину тока нагрузки пусковых устройств, значение температуры, изменять скорость электрического привода и регулировать пороги датчиков. Сеть включает 64 узла, к которым могут подсоединяться до 32 устройств на каждый узел. Общая длина сети – 12,2 км. Скорость передачи при $L = 500$ м – 125 кбит/с, при $L = 250$ м – 250 кбит/с, при $L = 100$ м – 500 кбит/с.

Контроллерные сети

Сеть **BitBus** разработана фирмой *Intel* в 1984 г., использует принцип «*Master-Slave*». Физический интерфейс основан на *RS-485*. Физическая среда – экранированная «витая пара». Максимальная длина сети – 13,2 км, 240 абонентов, 1,2 км – длина сегмента, 28 абонентов на одном сегменте. Данная сеть дает возможность построения сложных систем и не требует больших аппаратных затрат. Позволяет организовать 2 режима передачи данных по шине:

- Синхронный режим (расстояние до 30 м, скорость передачи 500–2400 кбит/с) для передачи больших массивов информации. Максимальное число узлов – 28;
- Режим с самосинхронизацией: скорость – 375 кбит при длине до 300 м и 62,5 кбит/с при длине до 1200 м; максимальная длина линии связи с репитерами – 13,2 км.

ProfiBus – этот протокол разработан немецкими фирмами *Siemens* и *Bosh* в 1991 г. Описывает 1, 2, 7-й уровни модели *OSI/ISO*, имеет 122 узла, из которых 32 – *Master*, остальные – *Slave* узлы. В среде *Master* узлов по возрастающим номерам узлов передается маркер (рис. 2.16), который предоставляет право ведения циклов чтения – записи по шине. Данный протокол разбит на 3 различных, но совместимых протокола. Пример АСУ ТП на базе протоколов *ProfiBus* представлен на рис. 2.17.

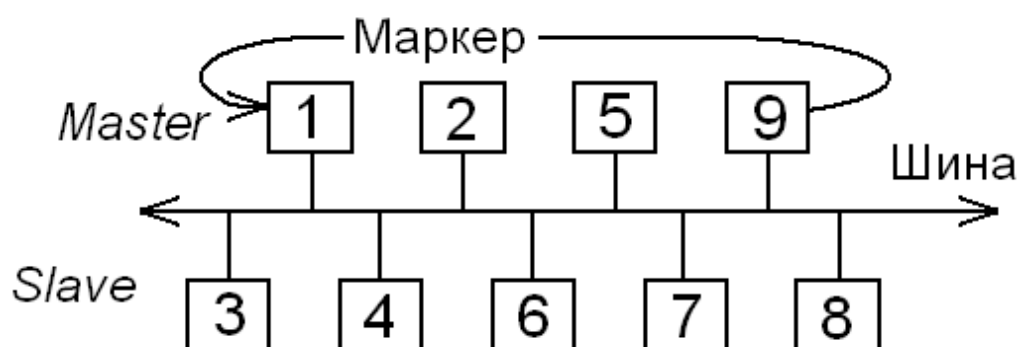


Рис. 2.16. Ведущие (*Master*) и ведомые (*Slave*) узлы, подключенные к шине по протоколу *ProfiBus*

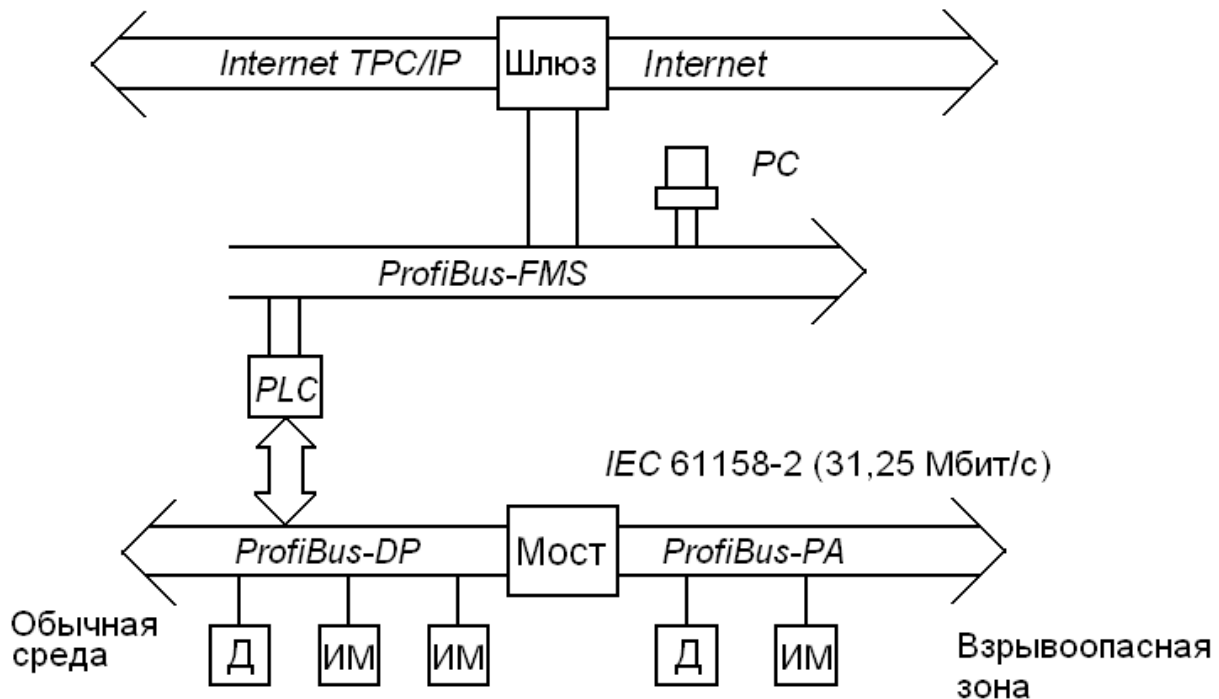


Рис. 2.17. Пример сетевой структуры АСУ ТП на базе трех протоколов *ProfiBus*: *PC* – компьютер; *Д* – датчик; *ИМ* – исполнительный механизм

Протокол *ProfiBus-DP* объединяет датчики *Д* и исполнительные механизмы *ИМ*. Его характеристики:

- Физический уровень – *RS-485*;
- Максимальное число станций – 32;
- Максимальная скорость передачи данных – 1,5 Мбит/с;
- Длительность цикла опроса – не более 6 мс.

Протокол *ProfiBus-PA* используется во взрывоопасных помещениях, длина сегмента – 1900 м.

Протокол *ProfiBus-FMS* используется для связи контроллеров *PLC* и интеллектуальных устройств *PC* с передачей больших объемов данных.

Control Net – протокол, имеющий топологию общую «шину» или «звезду», удовлетворяет требованию режима реального времени (высокая пропускная способность всех критичных данных, имеющих более высокий приоритет перед остальными данными). *PLC*, *Д*, *ИМ* – рабочие станции. Протокол имеет 99 узлов, которые можно подключать в любом месте шины через ответви-

тели. Архитектура позволяет работать с несколькими процессорами.

Сети диспетчерского уровня (универсальные сети)

World-FIP. Производители – Италия, Франция, Бельгия. Сеть описывает уровни 1, 2, 7 OSI/ISO. Физическая среда – «витая пара» или оптоволокно.

CANBUS (CAN). Производитель – фирмы *Bosh*, сеть описывает уровни 1, 2 OSI/ISO.

Foundation FieldBus. Протокол разработан в США в 1998 г., позволяет использовать программное и алгоритмическое обеспечение различных производителей, является двухуровневым, сочетающим черты мощной информационной магистрали для объединения компьютеров и рабочих станций верхнего уровня и управляющей сети, объединяющей PLC, Д, ИМ. На нижнем уровне имеется стандарт IEC 61158, который позволяет использовать сеть во взрывоопасном помещении (скорость передачи 31,25 Мбит/с). На верхнем уровне действует протокол *Fast Ethernet* (скорость передачи 100 Мбит/с). Максимальное число узлов в сегменте – 240.

Industrial Ethernet. В современных системах автоматизации технология *Ethernet* используется для организации сети верхнего уровня, обеспечивающей взаимодействие рабочих станций, серверов, принтеров, накопителей данных и т.д. Сопряжение такой сети с полевыми шинами осуществляется посредством промышленных компьютеров и контроллеров с использованием конвертеров – протоколов PKV-40, которые позволяют связать среду *Ethernet* с основными протоколами сенсорного уровня (*CAN*, *Device Net*, *ProfiBus – DP*, *AS*). Сеть *Ethernet* использует протокол стандарта *TCP/IP*.

Протокол *TCP/IP* – это многоуровневый протокол, состоящий из транспортного уровня *TCP* и сетевого уровня *IP*, в котором информация формируется в виде блоков, называемых дейтограммами. Дейтограмма состоит из заголовка и поля данных. Размер дейтограммы, который может быть принят устройством сети, 576 байт. Модуль *IP* подготавливает заголовок дейтограммы и подсоединяет к нему данные, полученные от протоколов

верхнего уровня, в частности от *TCP*, определяет подсетевой адрес и передает их модулю, реализующему протокол отправителя, который создает подзаголовок подсети и присоединяет к нему дейтограмму. Протокол *TCP* является транспортным протоколом стека *TCP/IP*. Управление содержит информацию о длине поля данных и о типе кадров.

В настоящее время предпринимаются попытки использовать протокол *Industrial Ethernet* на контроллерном и сенсорном уровне АСУ ТП, однако присущие ему недостатки ограничивают использование его на нижних уровнях АСУ ТП. Во-первых, технология создана для интенсивного обмена информацией, однако полевым устройствам необходимо передавать сравнительно небольшие объемы данных и через сравнительно длинные промежутки времени. Во-вторых, протокол *Ethernet* не рассчитан на организационные связи с гарантированными задержками, т.е. не рассчитан на работу в режиме реального времени.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АСУ ТП

В соответствии с терминологическими стандартами под математическим обеспечением АСУ ТП понимается совокупность математических методов, моделей и алгоритмов, используемых при разработке и функционировании данных систем. Программное обеспечение АСУ ТП охватывает совокупность программных средств, обеспечивающих функционирование программно-технического комплекса (ПТК) и решение задач контроля и управления технологическим объектом. Условно математическое и программное обеспечение можно разделить на методы, алгоритмы и программы решения задач управления на контроллерном и на диспетчерском уровне АСУ ТП. На контроллерном уровне решаются задачи первичной обработки измерительной информации, получаемой от аналоговых, дискретных и импульсных датчиков, и формирование управляющих воздействий, в большинстве случаев, по типовым математическим или логическим закономерностям. Большинство задач контроллерного уровня решается в режиме «реального времени», т.е. в темпе, обеспечивающем нормальный ход технологического процесса. На диспетчерском уровне решаются задачи визуализации полученной информации, ее архивирование, вычисление интегральных и средних показателей, поиск оптимальных режимов работы оборудования и т.д.

3.1. Первичная обработка измерительной информации

3.1.1. Схема преобразования измерительной информации в контроллере

Состояние объекта управления, исполнительных устройств в АСУ ТП оценивается по сигналам измерительных преобразователей, датчиков положения и других элементов автоматики. В большинстве своем данные сигналы являются электрическими (ток, напряжение, сопротивление, частота и т.д.). Для обработки

сигналов в контроллерах и других вычислительных устройствах их преобразуют в цифровую форму. Однако получаемая таким образом информация не пригодна для использования в задачах управления объектом и требуется ее предварительная обработка, которую называют первичной.

Для определения перечня задач, решаемых при первичной обработке информации, при контроле ее на достоверность, целесообразно рассмотреть последовательность преобразований, которым подвергается сигнал измерительной информации в типовом информационно-измерительном канале (ИИК), структурная схема которого представлена на рис. 3.1.

Так в большинстве случаев обеспечить номинальное условие преобразования не удастся, измерительный преобразователь вносит в сигнал $y(t)$ дополнительную погрешность. Кроме этого, в сигнал $z(t)$ входят погрешности, вносимые условиями передачи информации от преобразователя к контроллеру, а также погрешности, вносимые нормирующими преобразователями (если они используются в ИИК), т.е. на вход контроллера поступает суммарный сигнал:

$$z(t) = y(t) + e(t), \quad (3.1)$$

где $e(t)$ – помеха.

Ввод информации от входных модулей в основной блок контроллера осуществляют соответствующие драйверы. Каждый драйвер циклически со своим периодом опроса заносит информацию в область памяти с совместным доступом. Период опроса аналоговых переменных зависит от динамических характеристик канала измерения. Чтобы переменная была достоверно представлена квантованным сигналом, удовлетворяющим всем задачам, необходимо иметь 20–25 значений на период максимальной гармоника, которая присутствует в сигнале. Для большинства аналоговых переменных удовлетворительным является цикл опроса 0,1–0,2 с.

Для дискретных переменных цикл опроса должен обеспечивать выполнение требования по быстродействию задач потребителей, а также по точности присвоения метки времени. Для большинства дискретных переменных цикл опроса составляет 0,1 с.

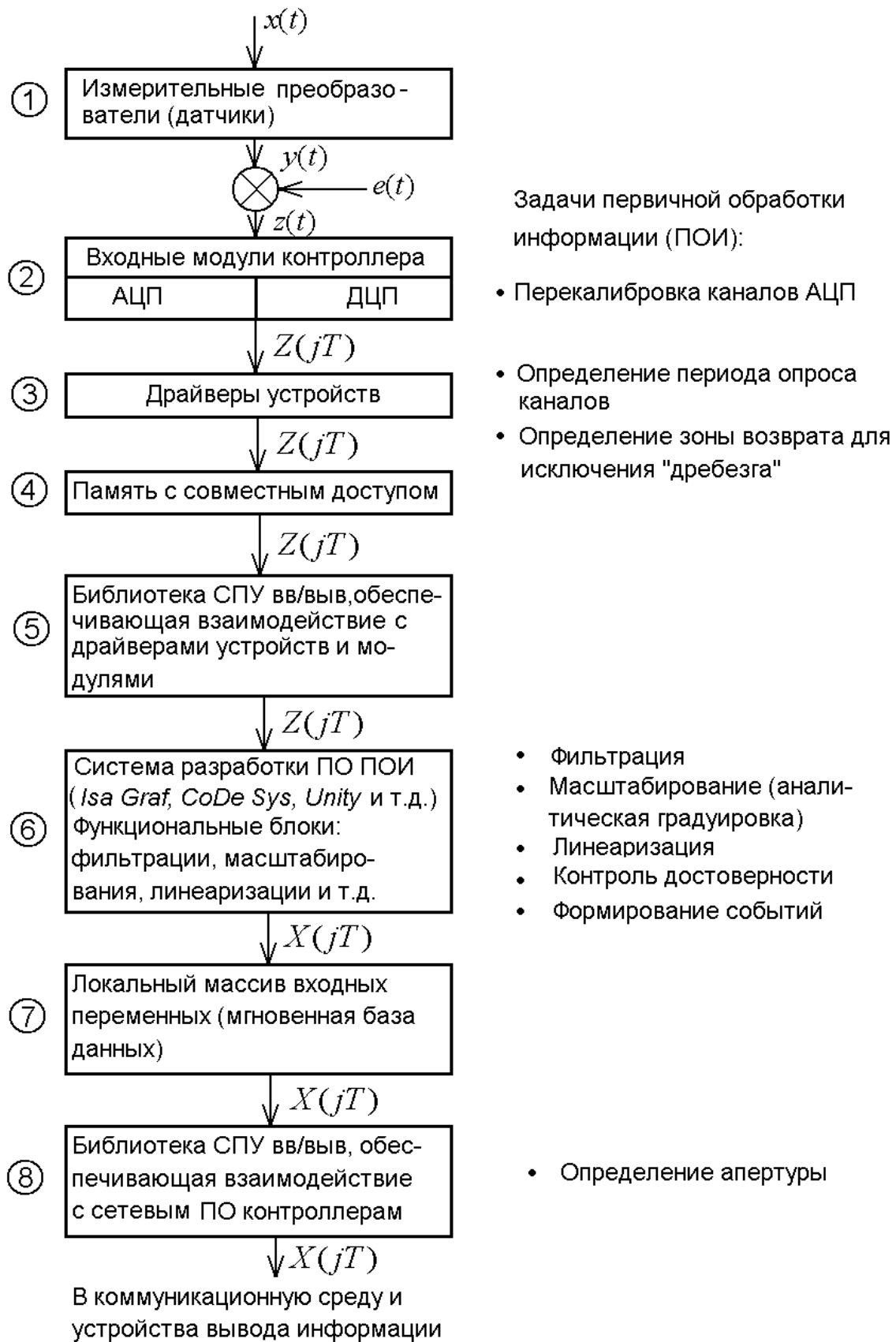


Рис. 3.1. Структурная схема преобразования и первичной обработки измерительной информации

Драйверы входных модулей запрограммированы так, что они выдают значения переменных в единицах датчика – микроамперы для токовых датчиков, миллиомы и микровольты для температурных датчиков, «0» или «1» для дискретных датчиков. Каждый драйвер имеет настроечную информацию: частоту среза фильтра при входе, период опроса.

Взаимодействие базового блока со служебным программным обеспечением контроллеров (драйверами внешних устройств, модулями диагностики и сетевым программным обеспечением контроллеров) осуществляется с помощью специализированных программных устройств (СПУ) ввода/вывода, образующих отдельную библиотеку в системе разработки «*IO boards*». Программные устройства ввода/вывода имеют унифицированный интерфейс, а на уровне контроллера поддерживаются также соответствующим расширением исполняемого ядра.

Информация, занесенная драйвером в свою область памяти, вычитывается средствами библиотеки «*IO boards*» со своим циклом выполнения. «*IO boards*» выдают значения входных величин в микроамперах для токовых датчиков, и в миллиомах, микровольтах для температурных датчиков.

Средствами «*Isa Graf*» или других инструментальных средств программирования контроллеров производится дальнейшая первичная обработка считанных переменных. Для обработки информации в библиотеке «*Isa Graf*» используются функциональные блоки, выполняющие следующие функции: фильтрацию, масштабирование (получение значения аналоговой переменной в технических единицах и в безмерных единицах от 0 до 1000), линеаризацию, контроль достоверности, формирование событий при достижении переменной величины уставки. Затем обработанные значения со своими итоговыми признаками достоверности заносятся в локальный массив входной информации (мгновенную базу данных).

Средствами библиотеки «*IO boards*» организуются отправка сообщений в коммуникационную среду АСУ ТП и выдача команд на устройства вывода.

3.1.2. Перекалибровка каналов АЦП

Сигналы $Z(t)$ поступают в соответствующие входные модули контроллера, где осуществляется их преобразование в цифровую форму. Аналоговые сигналы преобразуются с помощью таких компонентов, как усилители, фильтры, схемы выборки-хранения, мультиплексоры и аналого-цифровые преобразователи (АЦП). АЦП являются основными элементами аналогового вида, и их характеристики, в основном, определяют характеристики блока аналогового ввода в целом. Они по ряду параметров отличаются от идеальных. Чаще всего проявляются погрешности, связанные с нестабильностью источника опорного напряжения, коэффициентов усилительных каскадов и т.д. Как правило, смещение этих параметров, в основном связанное с изменением окружающей температуры, имеет малую скорость. Поэтому для минимизации данной погрешности применяют метод периодической перекалибровки модуля ввода в процессе измерения. Алгоритм перекалибровки сводится к периодическому обновлению калибровочных констант: 1) смещения нуля АЦП (N_0); 2) масштаба шкалы измерения ($M_{ш}$).

Масштаб шкалы измерения определяется по формуле

$$M_{ш} = \frac{D_1 - D_0}{N_1 - N_0} = \frac{D_1 - 0}{N_1 - N_0} = \frac{D_1}{N_1 - N_0}, \quad (3.2)$$

где D_0 – значение первой калибровочной величины ($D_0 = 0$);

D_1 – значение второй калибровочной величины;

N_0 – смещение нуля АЦП (показание АЦП в первой калибровочной точке);

N_1 – показание АЦП во второй калибровочной точке.

Чем дальше разнесены опорные точки, тем выше точность измерения. Обычно опорные точки выбираются вблизи предельных значений измеряемой величины.

Смещение нуля (N_0) АЦП производится прямым измерением.

Значение измеряемой величины (D) после перекалибровки определяется по выражению

$$D = \frac{D_1 - D_0}{N_1 - N_0} \cdot (N - N_0) = M_{\text{ш}} (N - N_0), \quad (3.3)$$

где N – показание АЦП (16- или 24-разрядное значение).

Обновление калибровочных констант ($M_{\text{ш}}$, N_0) в каждом канале производится в процессе работы входного модуля через R обычных измерений величины D . При этом увеличение числа R уменьшает частоту перекалибровки и затраты времени (накладные расходы по времени) на эту операцию, что положительно сказывается на обеспечении режима реального времени. Однако это приводит к снижению точности преобразования, так как система менее оперативно отслеживает температурные дрейфы АЦП и другие изменения в параметрах системы. Число R определяется для каждого или группы однотипных каналов индивидуально

и является одной из задач первичной обработки информации, наряду с разработкой алгоритма перекалибровки.

3.1.3. Определение периода опроса каналов

Ввод информации от входных модулей в центральный блок контроллера осуществляют соответствующие драйверы каналов. Каждый драйвер циклически со своим периодом опроса заносит информацию в свою область памяти с совместным доступом. Период опроса аналоговых переменных зависит от динамических характеристик сигнала и канала измерения. Выбор данного периода базируется на теореме Котельникова – Шеннона, которая определяет необходимые условия передачи без искажения информации, содержащейся в непрерывном сигнале при его квантовании по времени и последующем восстановлении. Ввиду сложности реализации в полном объеме условий данной теоремы, на практике для определения периода опроса используют следующие рекомендации:

– для достоверного представления измеряемой переменной $x(t)$ квантованным сигналом $Z(jT)$, удовлетворяющим всем зада-

чам-потребителей, необходимо иметь 20–25 значений данной переменной на период гармоника максимальной частоты, присутствующей в сигнале (для большинства переменных удовлетворительным считается цикл опроса в 0,1–0,2 с);

– для дискретных переменных цикл опроса должен обеспечивать выполнение требования по быстродействию задач потребителей, а также по точности присвоения метки времени. Для большинства дискретных переменных цикл опроса дискретных каналов составляет 0,1 с.

Так как измерительный, нормирующий преобразователи, да и остальные элементы информационно-измерительного канала обладают инерционностью, которая в паспортных данных характеризуется постоянной времени ($T_{пр}$), они будут являться низкочастотными фильтрами поступающих сигналов. Исходя из этого, в ИИК необходимо выбрать элемент с максимальным значением постоянной времени и, уменьшив ее в 5–10 раз, определить допустимое значение периода опроса канала. Например, для термоэлектрического преобразователя *ТХА* в стальном чехле $T_{пр} = 100 \div 150$ с. Исходя из этого, максимальный период опроса канала с *ТХА* составит 10 с.

3.1.4. Определение зоны возврата для исключения «дребезга» и формирование событий для аналоговых переменных

Для любой технологической переменной может быть задано до четырех уставок, обозначаемых как нижняя аварийная, нижняя предупредительная границы (НАГ, НПГ) и верхняя предупредительная, верхняя аварийная границы (ВПГ, ВАГ). Данные уставки обычно используются в системах сигнализации, защиты и блокировки. Значения уставок для отдельных переменных могут меняться в зависимости от других технологических переменных, от состояния органов управления. Значения уставок должны лежать в пределах шкалы переменной. Для некоторых переменных данные уставки могут быть не заданы.

Если уставки, определяющие границы срабатывания систем сигнализации (защиты), задать без зоны возврата, в этих системах может возникнуть явление «дребезга». Это явление появляется

тогда, когда технологическая переменная колеблется на границе срабатывания систем (ВПГ, НПГ, ВАГ, НАГ). Для исключения этого явления, кроме значений технологической переменной, определяющих данные границы, необходимо задать зону возврата. Величина зоны возврата индивидуальна для каждой технологической переменной и должна быть не менее амплитуды пульсаций этой переменной при выбранной апертуре. Соотношение значений уставок и зон возврата показано на рис. 3.2.

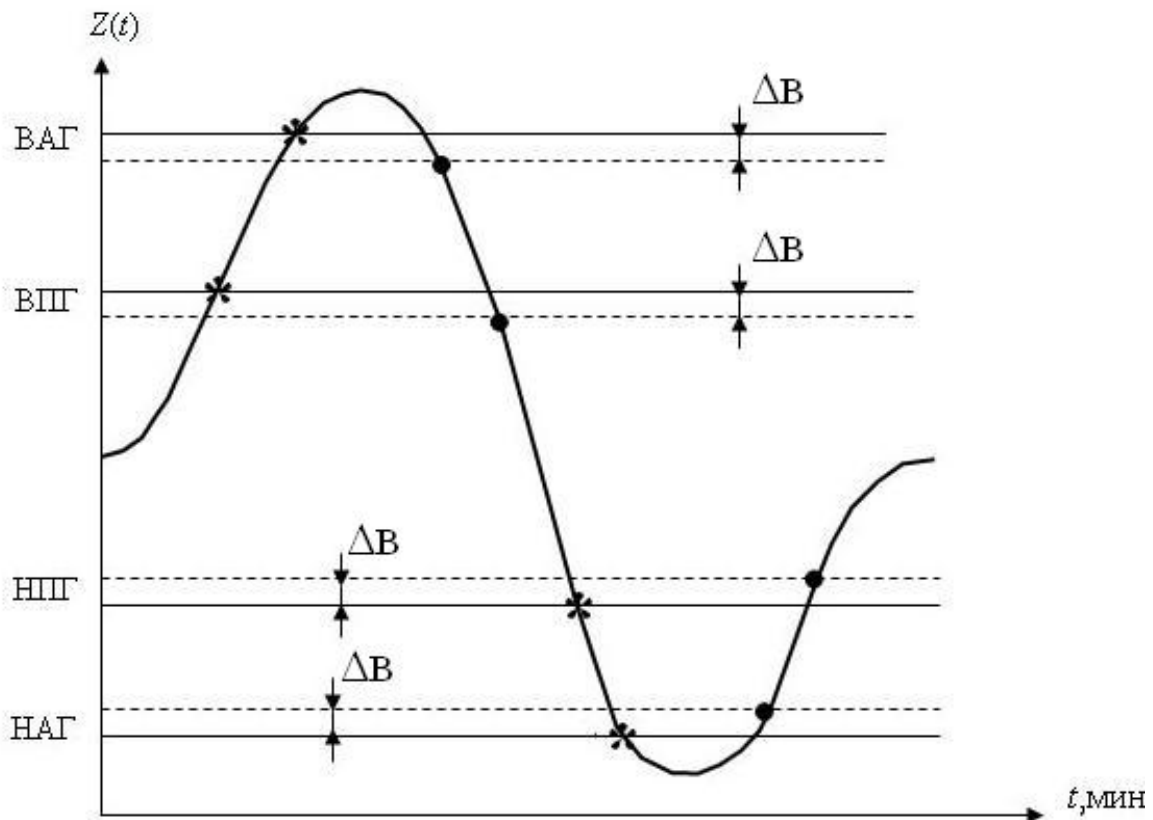


Рис. 3.2. Соотношение установок и зон возврата

Формирование событий при выходе переменной за уставку производится в блоке 6 (см. рис. 3.1) в следующих случаях:

- при выходе переменной за ВПГ (ВАГ) снизу;
- при выходе переменной за ВПГ $-\Delta B$ (ВАГ $-\Delta B$) сверху;
- при выходе переменной за НПГ (НАГ) сверху;
- при выходе переменной за НПГ $+\Delta B$ (НАГ $+\Delta B$) снизу.

На рис. 3.2 данные события отмечены метками:

* — при срабатывании систем сигнализации (защиты);

- – при отключении средств сигнализации (защиты).

Необходимо заметить, что в реальных контактных устройствах зона возврата обеспечивается различием в их токах срабатывания и отпускания.

3.1.5. Фильтрация сигналов измерительной информации

Фильтрация является наиболее сложной из операций первичной обработки сигналов измерительной информации. Она может выполняться аппаратно с помощью RC , LC фильтров перед поступлением сигнала в контроллер или программно с помощью различных алгоритмов фильтрации. Наибольшее распространение в АСУ ТП получили алгоритмы экспоненциального сглаживания (около 90 % задач фильтрации решаются с помощью данных алгоритмов). Рекуррентные соотношения для вычисления отфильтрованного (сглаженного) сигнала для фильтра экспоненциального сглаживания 1 порядка имеют следующий вид:

$$Z_{\phi}(jT) = \alpha [Z(jT) - Z_{\phi}(j-1, T)] + Z_{\phi}(j-1, T), \quad (3.4)$$

где $Z_{\phi}(jT)$, $Z_{\phi}(j-1, T)$ – текущее и предыдущее значения отфильтрованного сигнала;

$Z(jT)$ – текущее значение неотфильтрованного сигнала;

α – коэффициент фильтрации ($0,1 \div 0,8$).

Для повышения точности фильтрации можно использовать выражение (3.5), однако для его реализации требуется дополнительная ячейка памяти и время обработки сигнала увеличивается.

$$Z_{\phi}(jT) = \alpha \left[\frac{Z(jT) + Z(j-1, T)}{2} - Z_{\phi}(j-1, T) \right] + Z_{\phi}(j-1, T). \quad (3.5)$$

Выражение (3.4) соответствует экспоненциальному фильтру первого порядка с передаточной функцией

$$W_{\phi 1}(P) = \frac{K_{\phi}}{T_{\phi} P + 1}. \quad (3.6)$$

Повторное использование выражения (3.4) для обработки отфильтрованного сигнала $Z_{\phi}(jT)$ будет соответствовать использованию экспоненциального фильтра второго порядка.

Коэффициент фильтрации α определяется из выражения

$$\alpha = \frac{T}{T_{\phi}}, \quad (3.7)$$

где T – интервал времени между тактами обработки сигнала по выражению (3.5);

T_{ϕ} – постоянная времени фильтра.

К достоинствам алгоритмов экспоненциальной фильтрации относится малая трудоемкость расчетов и небольшой объем памяти контроллера, необходимый для хранения данных.

Кроме указанных выше алгоритмов фильтрации в АСУ ТП используются фильтр скользящего среднего, статические фильтры.

3.1.6. Масштабирование и линеаризация

Так как большинство задач управления в АСУ ТП решаются с использованием значений технологических переменных, представленных в естественных единицах (градусах, паскалях и т.д.), необходимо преобразовать сигнал измерительной информации $Z_{\phi}(jT)$. Данная операция носит название аналитической градуировки, которая выполняется с использованием градуировочной характеристики измерительного преобразователя и представляет собой функцию, обратную его номинальной статической характеристике:

$$X(jT) = f^{-1}(y, g_0). \quad (3.8)$$

Номинальная статическая характеристика приводится в паспорте измерительного преобразователя в виде аналитической функции или таблицы соответствия X, Y .

Операцию аналитической градуировки рассмотрим на примере гидростатического уровнемера жидкости. Гидростатический уровнемер преобразует значение измеряемого уровня жидкости

(L) в перепад давлений (ΔP) между точками отбора по выражению

$$\Delta P(t) = \kappa_1 \cdot \rho \cdot L(t), \quad (3.9)$$

где κ_1 – масштабный коэффициент, зависящий от выбора единиц измерения величин ΔP (если ΔP выражено в МПА, $\kappa_1 = 10^{-5}$);

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

L – уровень жидкости, м.

Перепад давления ΔP линейно преобразуется дифманометром в стандартный электрический сигнал 4–20 мА:

$$y(t) = \kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot \rho \cdot L(t), \quad (3.10)$$

где κ_2 – коэффициент передачи дифманометра, мА/МПА:

$$\kappa_2 = \frac{\Delta y}{\Delta P}. \quad (3.11)$$

Если плотность жидкости, уровень которой измеряется, остается неизменным, то выражение (3.10) можно представить в следующем виде:

$$y(t) = \kappa \cdot L(t), \quad (3.12)$$

где $\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot \rho$.

Из выражения (3.12) находится градуировочная характеристика:

$$L^\Gamma(t) = \frac{1}{\kappa} \cdot y(t). \quad (3.13)$$

В тех случаях, когда плотность жидкости меняется в процессе измерения уровня, необходимо ее измерить и после всех преобразований и аналитической градуировки использовать для коррекции уровня жидкости по выражению

$$L^\Gamma(t) = \frac{1}{\kappa_0 \cdot \rho} y(t), \quad (3.14)$$

где $\kappa_0 = \kappa_1 \cdot \kappa_2$.

На практике, когда числовой код на выходе АЦП связан с измеряемой переменной $x(t)$ линейной зависимостью, аналити-

ческая градуировка (воспроизведение значения $x(t)$ в абсолютных единицах) выполняется по следующему выражению:

$$X^{\Gamma} = X_{\text{нш}} + [(X_{\text{кш}} - X_{\text{нш}}) / K_{\text{н}}] \cdot (\Pi - \Pi_{\text{нш}}), \quad (3.15)$$

где $K_{\text{н}} = \Pi_{\text{кш}} - \Pi_{\text{нш}}$;

X^{Γ} – значение измеряемой переменной в абсолютных единицах;

$X_{\text{нш}}$, $X_{\text{кш}}$ – начало и конец шкалы измерительного преобразователя в абсолютных единицах;

$\Pi_{\text{нш}}$ – код измеряемой переменной, получаемой на выходе АЦП при подаче на него напряжения, соответствующего началу шкалы измерительного преобразователя;

$\Pi_{\text{кш}}$ – код измеряемой переменной, получаемой на выходе АЦП при приложении к нему напряжения, соответствующего концу шкалы измерительного преобразователя;

Π – текущий код параметра, получаемый на выходе АЦП, при измеряемом значении $X(t)$.

В рассмотренном выше примере $X_{\text{нш}}$ – это значение уровня жидкости в миллиметрах (или метрах), при котором сигнал на выходе дифманометра будет равен 4 мА, а $X_{\text{кш}}$ – 20 мА, например: $X_{\text{нш}} = 0$ мм, $X_{\text{кш}} = 2000$ мм.

Нелинейность статических характеристик первичных преобразователей (зависимость выходного сигнала от измеряемой величины) определяется физическими свойствами их чувствительных элементов и используемым методом измерения. К первому виду нелинейностей относятся характеристики термометров сопротивления (ТС), термоэлектрических термометров (термопар) и некоторых других преобразователей. Примером второго вида нелинейности могут служить расходомеры переменного перепада давления.

Номинальные статические характеристики термометров сопротивления, термопар приводятся в справочной литературе в виде таблиц и аналитических выражений. Так как в аналитических выражениях присутствует ошибка аппроксимации, то на практике для преобразования сопротивления ТС и ЭДС термопар в температуру (аналитическая градуировка) чаще используют табличную форму задания статической характеристики.

Таблицы составляются для всех градуировок термометров сопротивления и термопар, подключаемых к входным модулям контроллера. При этом диапазон температур, входящих в таблицу, должен охватывать диапазоны шкал всех измерительных преобразователей одной градуировки. При большом различии в диапазонах измеряемой температуры разными измерительными преобразователями одной градуировки таблицы составляются для каждого преобразователя с неравномерным шагом. Выбор величины шага таблицы определяется допустимой погрешностью линеаризации статической характеристики, обычно для термометров сопротивления она составляет не более $\pm 0,1$ °С, а для термопар – $\pm 0,3$ °С. При таких значениях погрешность, вносимая процедурой преобразования, будет существенно меньше погрешности, вносимой самим измерительным преобразователем.

Алгоритм поиска температуры в таблице включает в себя просмотр табличных значений термосопротивления или термо-ЭДС (обычно с меньшего значения), нахождения ближайших к измеренному табличных значений и последующего расчета измеренной температуры путем линейной интерполяции.

При измерении температуры с помощью термопары необходимо вводить постоянную поправку на температуру ее холодных слоев, которая обычно измеряется термометрами сопротивления. В этом случае вычисление действительного значения температуры производится в следующем порядке:

1. Считывается код, пропорциональный ЭДС термопары $E(t, t_0)$.
2. По измеренному значению температуры холодных спаек термопары по линеаризованной таблице определяется код ЭДС холодного слоя $(t_0, 0)$.
3. По формуле $E(t, 0) = E(t, t_0) + E(t_0, 0)$ определяется ЭДС термопары при температуре холодных слоев, равной 0 °С.
4. По линеаризованной таблице, в соответствии с полученным значением ЭДС $E(t, 0)$, определяется измеряемая температура.

3.1.7. Алгоритмический контроль достоверности сигналов измерительной информации

В процессе функционирования комплекса технических средств АСУТП производится аппаратная диагностика его работоспособности: модулей ввода/вывода, процессоров, коммуникационных средств и других устройств. При обнаружении отказов в системе формируется событие. При этом для переменных, вводимых через неработоспособные каналы, выставляется признак недостоверности.

Однако не все отказы измерительных каналов могут быть определены встроенной самодиагностикой комплекса технических средств. Для повышения надежности при вводе информации в систему производится алгоритмический контроль достоверности технологических переменных. Отказы измерительных каналов принято делить на полные и частичные или метрологические (параметрические). Полный отказ чаще всего наступает при повреждении линии связи, первичного или нормирующего преобразователя. При метрологических (частичных) отказах измерительный канал внешне сохраняет свою работоспособность, однако погрешность, возникающая в канале, выходит за допустимые пределы. Причинами такого положения могут быть изменения характеристик преобразователей, линий связи в процессе их эксплуатации и другие.

Контроль достоверности аналоговых переменных осуществляется по «уставкам». При этом для всех аналоговых переменных как вводимых в систему через модули ввода, так и для расчетных, переменных, проверяется выполнение неравенства

$$HУ \leq X(jT) \leq ВУ, \quad (3.16)$$

где $HУ$, $ВУ$ – нижний и верхний предельные уровни технологической переменной $X(jT)$, при нарушении которых формируется событие отказа измерительного канала.

Данный вид контроля, вообще говоря, не связан непосредственно с контролем по допустимому диапазону выходного сигнала датчика (такой контроль также предусмотрен в качестве аппаратного, например, для датчиков с выходом 0–5 мА или

4–20 мА), а проверяет значение переменной на физическую возможность существования. Например, температура питательной воды не может быть равна 600 °С. Этот вид контроля особенно полезен для расчетных переменных, так как недостоверность отдельных членов, входящих в формулы расчета, может быть и не обнаружена другими видами контроля.

Нижний и верхний уровни устанавливаются для каждого канала при его калибровке, эти величины не обязательно должны повторять шкалу нормальных значений переменной, но должны представлять собой физически достижимые границы значения переменной даже в аварийных режимах. Иначе говоря, недостоверными считаются переменные, противоречащие здравому смыслу.

Контроль полных отказов измерительных каналов может осуществляться и по скорости изменения технологической переменной. Данный вид контроля применяется для аналоговых переменных, инерционность которых обусловлена их физической природой. Таковыми являются, в частности, все переменные температурного контроля. Для быстроменяющихся переменных, а также подверженных пульсациям данный вид контроля не применяется. Переменная считается достоверной, если выполняется неравенство

$$\frac{X(jT) - X(j-1, T)}{T} \leq V_{\max}, \quad (3.17)$$

где $V_{\max}$ – максимально возможная скорость изменения переменной $X(jT)$.

Обнаружение метрологических отказов производится несколькими способами. Для наиболее ответственных технологических переменных используется аппаратное резервирование измерительных каналов, при этом если расхождение между сигналами, полученными по основному и резервному каналу, окажется больше допустимого предела, данный канал будет считаться не работоспособным. Другой способ обнаружения параметрических отказов использует связи между измеряемыми технологическими переменными, которые имеются в объекте. Простейшим примером такого способа является обнаружение параметрического отказа в схеме измерения с тремя и более расходомерами (рис. 3.3).

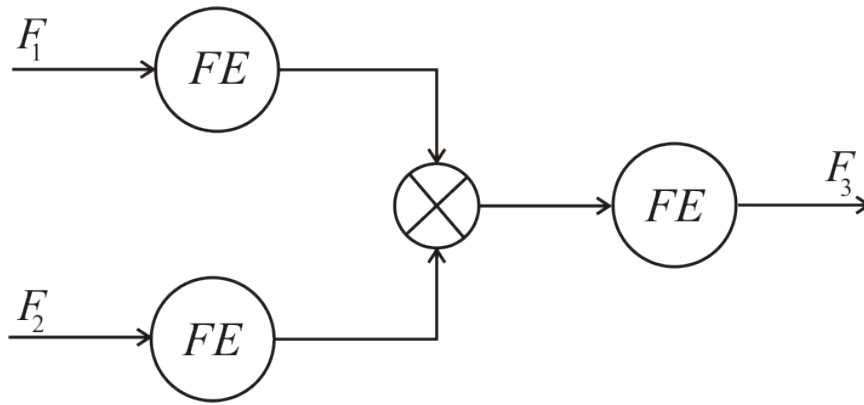


Рис. 3.3. Схема измерения расхода с помощью трех преобразователей

При выполнении условия

$$\Delta F = F_3 - (F_1 + F_2) \leq \Delta F_{\text{доп}}, \quad (3.18)$$

где $\Delta F_{\text{доп}}$ – допустимая погрешность, результаты измерения считаются достоверными.

Для обнаружения отказов измерительных каналов могут использоваться другие виды контроля, например: контроль по вариационному ряду, контроль путем сравнения с расчетной величиной и т.д. Данные виды контроля чаще всего используются на диспетчерском уровне АСУ ТП. В случае признания аналоговой переменной недостоверной производится замена недостоверного значения на последнее значение, признанное достоверным. При этом для недостоверной переменной запрещается дальнейшая обработка.

Для расчетных переменных, в которых используются переменные, признанные недостоверными, может производиться замена их на расчетное значение. При этом для расчетной переменной может быть разрешена дальнейшая обработка, однако для него выставляется признак «ограниченной достоверности». Например, при расчете расходов с коррекцией по плотности среды при недостоверной температуре или давлении среды вычисление может быть продолжено при замене недостоверного значения плотности на значение, принятое при расчете сужающего устройства.

3.1.8. Обработка дискретной информации

Обработка дискретной информации в контроллере включает в себя решение следующих задач:

- Устранение «дребезга»;
- Формирование значений двух-, трех- и других позиционных переменных (перекидные контакты реле, конечных и путевых выключателей, ключи выбора режимов и т.п.) по таблице возможных значений, составленной индивидуально для каждой такой переменной. При этом, если переменная имеет «неразрешенное» значение, она считается недостоверной;
- Инверсия дискретной переменной;
- Занесение значений переменной в «локальный» массив дискретной информации с присвоением метки времени и признака достоверности;
- Формирование события и передача сообщения о нем в коммуникационную среду АСУТП при изменении состояния дискретной переменной;
- Обработка сигналов от датчиков число-импульсной информации.

Датчики число-импульсной информации формируют на своем выходе последовательность импульсов (дискретных сигналов) переменной частоты (от 0 до величины порядка 1 Гц) длительностью ≈ 120 мс. Обработка сигналов от данного вида датчиков состоит в подсчете (суммировании) количества импульсов, поступающих на вход с коэффициентом, задаваемым индивидуально для каждой переменной данного типа. В дальнейшем количество импульсов обрабатывается как аналоговая переменная.

Для однопозиционных дискретных переменных алгоритмический контроль достоверности не производится. Для двух-, трех- и более позиционных дискретных переменных контроль достоверности производится по таблице возможных значений, задаваемой индивидуально для каждой переменной.

Переменная считается недостоверной, если она недостоверна хотя бы по одному из видов контроля (аппаратный контроль либо контроль по таблице возможных значений). При этом для недостоверной переменной запрещается дальнейшая обработка.

Для расчетных дискретных переменных, в которых используются переменные, признанные недостоверными, может производиться замена их на заранее заданное значение либо на переменную ручного ввода, запрос на которую должен формироваться в случае признания переменной недостоверной.

3.1.9. Определение апертуры

Для сокращения объемов информации, передаваемой в коммуникационную среду АСУ ТП, в программное обеспечение ПЛК вводится апертура, при этом передаче на верхний уровень системы подлежат переменные, изменение значения которых превышает апертуру.

Величина апертуры задается индивидуально для каждого канала измерения при его калибровке. Выбор величины апертуры ограничен сверху максимальной величиной погрешности, нормированной для канала, а снизу – пропускной способностью коммуникационной среды АСУ ТП или размером оперативного архива.

3.2. Состав программного обеспечения современных систем автоматизации

Программное обеспечение (ПО) АСУ включает в себя две группы программ:

- Системные ПО;
- Прикладное ПО.

Системное ПО – это комплекс программ, используемый для разработки и выполнения прикладных программ. В состав системного ПО входят:

- Операционная система (ОС);
- Системы программирования (СП);
- Системы управления базами данных (СУБД);
- Программное обеспечение локальных вычислительных систем (ПО ЛВС).

Операционная система – это совокупность программных средств, обеспечивающих управление аппаратными ресурсами вычислительной системы и взаимодействие программных процессов с аппаратурой и другими процессами и пользователями. В состав операционной системы входят:

- Монитор (супервизор) – центральная управляющая программа;
- Файловая система (осуществляет управление файлами);
- Утилиты (сервисные программы);
- Драйверы – программы управления периферийными устройствами.

Операционные системы обеспечивают следующие режимы вычисления:

- Однопрограммный;
- Мультипрограммный;
- Многозадачный.

Различают следующие операционные системы:

- Диалоговые – это однопрограммный режим взаимодействия с пользователем в реальном масштабе времени;
- Общего назначения (с пакетной обработкой данных);
- Операционные системы с разделением времени, обеспечивающие мультипрограммный режим при коллективном доступе пользователя к вычислительным ресурсам;
- Операционные системы реального времени – это многозадачные системы, обеспечивающие решение задач в темпе, диктуемом управляемым производственным процессом.

Система программирования – это один или несколько языков программирования в совокупности со средой, необходимой для использования в вычислительной системе. СП включает в себя набор программ: Редактор, Транслятор, Компоновщик, Загрузчик, Отладчик.

Редактор позволяет вводить в компьютер исходные тексты программ на выбранном языке программирования. Эти тексты образуют программные модули, для преобразования которых в машинные коды используют трансляторы. Они могут быть реализованы либо в форме компилятора, когда переводится весь текст прикладной программы, а затем начинается ее выполнение,

либо в виде интерпретатора, когда переводится в машинные коды одна команда (оператор) и после этого сразу идет выполнение этой команды. При компиляции текста программа образует объектный модуль, который представляет собой перечень машинных кодов, не имеющих физических адресов в памяти компьютера. Компоновщик – это программа, которая присваивает конкретные адреса в памяти элементам объектного модуля, после чего объектный модуль называется загрузочным модулем. Загрузчик – это программа, которая считывает загрузочный модуль ОЗУ.

Прикладное программное обеспечение – это программы решения конкретных задач управления. Его можно разделить на общее и специализированное. Общее прикладное программное обеспечение – это набор типовых программ, используемых на большинстве предприятий. Специализированное прикладное ПО – это программное обеспечение решения задач управления конкретными технологическими объектами.

3.3. Программное обеспечение нижнего (контроллерного) уровня в АСУ ТП

Программное обеспечение контроллеров включает в себя служебные программы (драйверы внешних устройств, модули диагностики, сетевое программное обеспечение и т.д.) и программы решения задач контроля и управления технологическим объектом, которые разрабатываются и отлаживаются при проектировании и внедрении АСУ ТП. В большинстве случаев для современных микропроцессорных контроллеров данные программы составляются на языках международного стандарта IEC 61131-3. Причиной разработки стандарта послужили два основных фактора: большое количество разнородных языков программирования (каждый изготовитель в комплекте с ПЛК поставлял свои средства для его программирования), сложность получаемых программ для чтения и редактирования (зачастую, в случае обнаружения неточности в программе или необходимости ее корректировки, разобраться в ней мог только автор).

3.3.1. Характеристика языков программирования стандарта IEC 61131-3

Стандарт IEC 61131-3 был утвержден в 1992 г. Международной электротехнической комиссией (МЭК) и описывает синтаксис и семантику пяти языков программирования:

SFC (последовательных функциональных схем) – язык графических схем, описывающий логику программы как последовательность процедурных шагов и условных переходов. По внешнему виду он напоминает хорошо известные логические блок-схемы алгоритмов;

LD (релейных диаграмм) – графический язык программирования, являющийся стандартизированным вариантом класса языков релейно-контактных схем, дополненный таймерами, счетчиками, ПИД-преобразователями и т.д.;

FBD (функциональных блоковых диаграмм) – графический язык, на котором процедура строится из различных функций и функциональных блоков, имеющих в библиотеке. Внешне алгоритм работы некоторого устройства на данном языке выглядит как функциональная схема электронного устройства, собранного на интегральных микросхемах;

ST (структурированный текст) – текстовый высокоуровневый язык общего назначения, по синтаксису ориентированный на Паскаль, самостоятельного значения не имеет, используется совместно с языком *SFC*;

IL (язык инструкций) – текстовый язык низкого уровня, выглядит как типичный язык Ассемблера, используется совместно с языком *SFC*.

Для программирования контроллеров на уровне пользователя чаще всего используются языки *FBD* и *LD*, а для реализации шаговых программ – язык *SFC*.

Прикладные программы первичной обработки информации создаются с помощью систем разработки (МЭК-систем) на любом *PC/AT* – совместимом компьютере, поддерживающем программирование контроллеров в стандарте IEC 61131-3. Они представляют собой набор функциональных блоков, для которых задана последовательность обработки и формирования сигналов.

Каждый из блоков решает одну из задач первичной обработки измерительной информации (фильтрацию, масштабирование, линеаризацию и т.д.).

Существует несколько десятков инструментальных средств программирования, поддерживающих языки данного стандарта. Наибольшее распространение получили такие системы, как «*Isa Graf*», «*Co De Sys*», «*Unity*» и др.

Основными объектами адресации языков программирования ПЛК являются либо биты, соответствующие дискретным логическим переменным, либо слова того или иного формата, соответствующие числовым данным. Объекты-биты имеют длину, соответствующую одному разряду, принимающему значение 0 или 1, и соответствуют либо дискретным сигналам ввода/вывода, либо результатам выполнения тех или иных логических операций (0 – «ложь», 1 – «истина»). Объекты-слова имеют различную длину (B (байт) = 8 бит, W (слово) = 16 бит, D (двойное слово) = 32 бит, F – число с плавающей точкой).

Адресация переменной величины в стандарте IEC 61131-3 осуществляется следующим образом. Сначала записывается символ стандарта %, затем тип объекта (ввод, вывод или др.), затем формат объекта (бит или слово) и, наконец, адрес (номер корзины, номер модуля, номер канала – для величин ввода/вывода или номер регистра – для внутренних переменных ПЛК).

Формат адресации величины, вводимой или выводимой из ПЛК, показан на рис. 3.4, а, а внутренней переменной ПЛК – на рис. 3.4, б.

а

%	I или Q	X , W или D	x	y	i
Символ IEC	I – вход Q – выход	X – бит W – слово D – двойное слово	Номер корзины	Номер модуля	Номер канала

Рис. 3.4. Формат адресации вводимой или выводимой из ПЛК величины (а) и внутренней переменной ПЛК (б)

б

%	<i>M, K</i> или <i>S</i>	<i>X, B, W, D</i> или <i>F</i>	<i>i</i>
Символ <i>IEC</i>	<i>M</i> – внутренний (бит) <i>K</i> – константа <i>S</i> – системный (бит)	<i>X</i> – бит <i>B</i> – байт <i>W</i> – слово <i>D</i> – двойное слово <i>F</i> – число с плавающей точкой	Адрес (номер ячейки памяти)

Рис. 3.4. Продолжение

Язык релейных диаграмм (*LD*)

Язык *LD* представляет собой графическую интерпретацию процесса разработки релейно-контактных схем управления. Первоначально на языке *LD* программировались контроллеры производства компании *Allen Bradley*. Ввиду его удобства и значительного количества пользователей, обладающих навыками проектирования логических систем на базе реле и контакторов, язык *LD* был введен в стандарт *IEC 61131-3* и в настоящее время является одним из наиболее распространенных языков программирования ПЛК. Этот язык наиболее удобен для программирования небольших задач дискретной логики, поэтому многие контроллеры младших классов имеют язык *LD* в качестве основного для разработки программ управления.

Программы, написанные на языке *LD*, состоят из последовательности ступеней, которые выполняются ПЛК последовательно, слева направо (рис. 3.5).

Ступень состоит из набора графических элементов, ограниченных слева и справа условными шинами питания.

Набор графических элементов языка *LD* включает:

- Входы/выходы ПЛК (кнопки, датчики, реле, индикаторные лампы и т.д.);

- Стандартные управляющие системные функции (таймеры, счетчики и т.д.);
- Арифметические, логические и специальные операции;
- Внутренние переменные ПЛК.

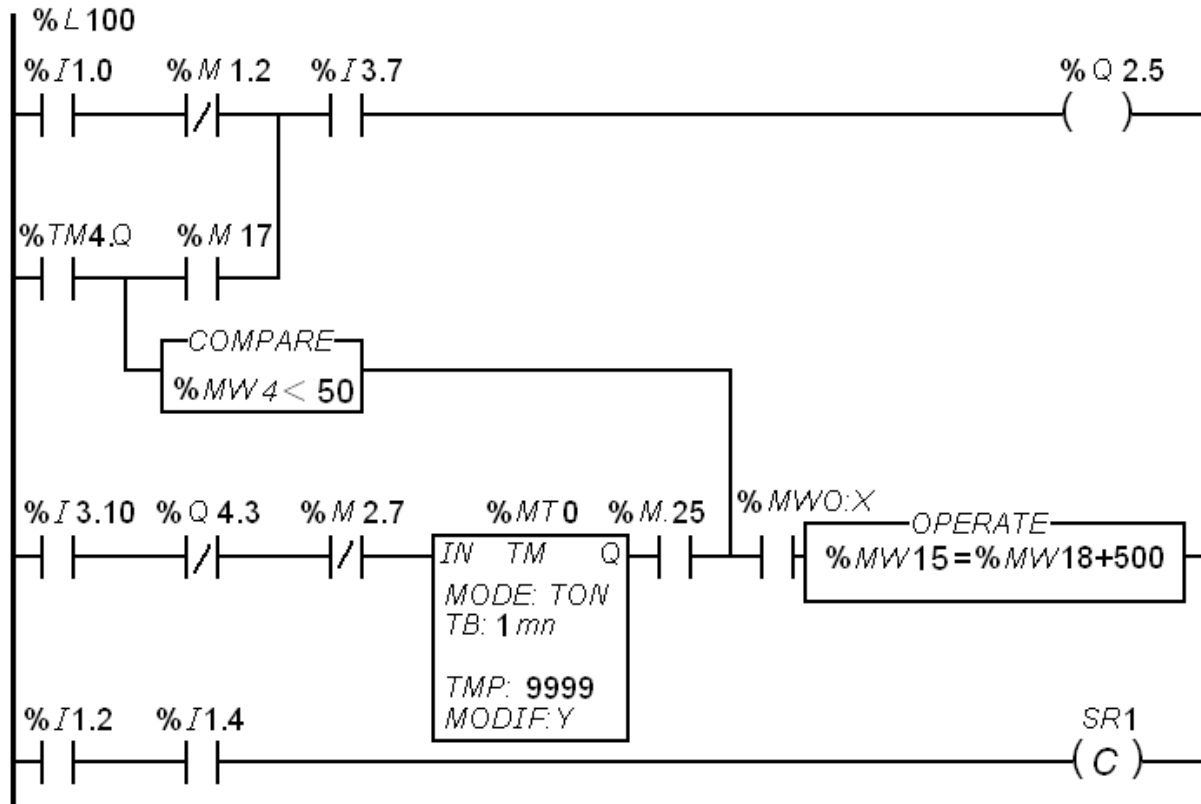


Рис. 3.5. Пример программы на языке *LD*

Дискретные входы ПЛК и результаты выполнения логических операций представляются в виде условных контактов реле, нормально разомкнутых (замыкаются при появлении сигнала на соответствующем входе или истинности поставленного в соответствие данному контакту логического выражения) и нормально замкнутых (с логикой работы, обратной предыдущей). Дискретные выходы ПЛК или результаты выполнения данной ступени представляются в виде обмотки реле, питание на которой появляется после прохождения сигнала от левой условной шины питания через все находящиеся на ступени элементы. Левая шина соответствует исходному питанию схемы, правая – выходу схемы, сигнал в котором появляется после замыкания всех контактов и выполнения всех логических условий.

Графические элементы языка *LD* можно условно разделить на базовые элементы, функциональные и операционные блоки. Каждый базовый элемент занимает одну ячейку (одну строку по высоте и одну колонку по ширине). Блоки могут занимать несколько ячеек. Базовые элементы и блоки языка *LD* приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Базовые элементы и блоки языка *LD*

Наименование	Элемент/Блок	Символ	Функция
Элементы условий	Нормально открытый контакт	$- -$	Контакт замкнут, когда битовая переменная, которая управляет им, равна 1
	Нормально закрытый контакт	$- / -$	Контакт замкнут, когда битовая переменная, которая управляет им, равна 0
	Контакты, срабатывающие по перепаду	$- P -$	Возрастающий перепад: контакт замкнут, когда битовая переменная, которая управляет им, изменяется с 0 до 1
		$- N -$	Убывающий перепад: контакт замкнут, когда битовая переменная, которая управляет им, изменяется с 1 до 0

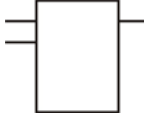
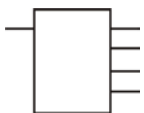
Продолжение табл. 3.1

Наименование	Элемент/Блок	Символ	Функция
Элементы связи	Горизонтальные связи	—	Используются для соединения элементов условий и элементов действия, расположенных последовательно между двумя шинами питания
	Вертикальные связи		Используются для параллельного соединения элементов действия и условий
	Коротко-круговые соединения	—┐└—	Используются для соединения двух объектов, использующих разные связи
Элементы действия	Прямая обмотка	—()—	Устанавливает соответствующий битовый объект в значение, равное результату, полученному в проверочной зоне
	Обратная обмотка	—(/)—	Устанавливает соответствующий битовый объект в значение, равное инверсии от результата, полученного в проверочной

Продолжение табл. 3.1

Наименование	Элемент/Блок	Символ	Функция
	Устанавливающая обмотка	–(S)–	Устанавливает соответствующий битовый объект в 1, когда результат, полученный в проверочной зоне, равен 0
	Сбрасывающая обмотка	–(R)–	Сбрасывает соответствующий битовый объект в 0, если результат, полученный в проверочной зоне, равен 1
	Условный переход к другой ступени	$\gg \%Li$	Обеспечивает соединение с помеченной строкой, причем последняя может быть расположена до или после текущей ступени
	Обмотка вызова подпрограммы	–(C)–	Позволяет подсоединиться к подпрограмме, если результат, полученный в проверочной зоне, равен 1

Продолжение табл. 3.1

Наименование	Элемент/Блок	Символ	Функция
	Возврат из подпрограммы	<i><RETURN></i>	Зарезервировано для подпрограмм, позволяет возвращаться в вызывающий модуль, когда результат, полученный в проверочной зоне, равен 1
	Останов программы	<i><HALT></i>	Останов выполнения программы, когда результат, полученный в проверочной зоне, равен 1
Проверочные элементы	Блоки: Таймер Счетчик Одновибратор Регистр Контроллер барабана		Каждый из блоков стандартной функции использует входы/выходы, через которые обеспечивают связи с другими графическими элементами
	Вертикальный блок сравнения		Позволяет сравнивать два операнда. В зависимости от результата соответствующий вход принимает значение, равное 1. Размер: 2 колонки/4 строки

Окончание табл. 3.1

Наименование	Элемент/Блок	Символ	Функция
	Горизонтальный блок сравнения «Compare»		Позволяет сравнивать два операнда. Выход принимает значение, равное 1, если при сравнении получен истинный результат. (Блок может содержать до 4096 символов). Размер: 2 колонки/1 строка
Элемент действия	Операционный блок «Operate»		Выполняет арифметические, логические и другие операции и использует синтаксис языка структурированного текста. (Блок может содержать до 4096 символов). Размер: 4 колонки/1 строка

Ступень содержит до 7-ми строк и до 11-ти колонок, разделенных на две зоны – проверочную и зону действий. Каждая ступень может быть снабжена меткой и озаглавлена комментарием. Метки могут быть использованы для идентификации ступени внутри программного объекта (головной программы, подпрограммы и т.д.), но не являются обязательными. Метки имеют синтаксис %Li (где *i* от 0 до 999) и располагаются в левом верхнем углу перед шиной питания. Каждая метка может присваиваться только одной ступени в пределах данного программного

объекта. Система сканирует ступени в том порядке, как они были введены, независимо от порядка нумерации меток.

В состав ступени может быть введен комментарий, содержащий до 222 алфавитно-цифровых символов и обрамленный с обоих концов символами (*и*). Это упрощает интерпретацию ступени. Введение комментария не является обязательным. Комментарий запоминается в ПЛК и в любой момент может быть вызван пользователем. Следует учитывать, что комментарии используют память программ.

Ступень изображается в форме, похожей на релейные диаграммы. Простейшие проверочные элементы и элементы действия занимают одну строку и одну колонку ступени. Все линии контактов начинаются от левой шины питания и должны заканчиваться на правой шине питания. Проверочные операции всегда располагаются в колонках с 1 по 10. Операции действия всегда располагаются в колонке 11. Предполагается, что между шинами питания протекает ток, который имеет следующее направление:

- по горизонтальным связям – слева направо;
- по вертикальным связям – в обоих направлениях.

Проверочная зона содержит: контакты, которые могут быть помечены любым, ранее определенным битовым объектом; функциональные блоки; блоки сравнения. Возрастающие и убывающие фронты могут быть связаны только входными и выходными битовыми объектами и внутренними битами.

Зона действий содержит: прямые, инверсные, фиксирующие и инверсно-фиксирующие обмотки, которые могут быть помечены любым битовым объектом; записанные пользователем операционные блоки; другие элементы действия (*Call, Jump, Halt, Return*).

На одной линии возможно до 10-ти контактов. В одной колонке максимально может параллельно проверяться до 7-ми контактов. До 7-ми обмоток могут быть включены параллельно. Ступень может быть разделена на несколько независимых линий контактов, причем каждая линия управляет независимой обмоткой.

Операционные блоки всегда расположены в зоне действий. Внутри блока записывается фраза на языке *ST*. Операционный

блок должен быть присоединен непосредственно к правой «шине» питания.

Ступени исполняются последовательно друг за другом; каждая ступень исполняется слева направо. В тех случаях, когда встречается вертикальная связь, выполняется подступень, соответствующая этой связи, и только после этого возобновляется исполнение оставшейся части ступени.

В соответствии с указанным порядком исполнения система:

- Оценивает логическое состояние каждого контакта, соответствующее текущему значению внутренних переменных объекта управления, или состояние входов модулей ввода/вывода ПЛК, считываемых в начале сканирования;
- Выполняет рабочие действия, соответствующие функциям, функциональным блокам и подпрограммам;
- Обеспечивает битовые объекты, соответствующие обмоткам (выходы модулей ввода/вывода обновляются в конце сканирования);
- Переходит к другой помеченной ступени в данном программном модуле (переходы к другой ступени $\gg \%Li$), возвращается в вызывающий модуль $\langle RETURN \rangle$ или останавливает программу $\langle HALT \rangle$.

Язык функциональных блоковых диаграмм (FBD)

Язык функциональных блоков (*Function Block Diagrams*) позволяет создать программу практически любой сложности на основе стандартных функциональных блоков (арифметические, тригонометрические, логические блоки, *PID*-регуляторы, блоки, описывающие некоторые законы управления, мультиплексоры и т.д.). Все программирование сводится к «склеиванию» готовых компонентов (блоков). Каждый функциональный блок представляет собой прямоугольник, внутри которого имеется обозначение функции, выполняемой блоком.

При программировании используются следующие формальные правила языка *FBD*:

- Функциональные блоки могут располагаться произвольно в поле программы;

- Не может быть несоединенных входов и выходов функционального блока;
- Соединение блоков может выполняться также при помощи ссылок с определенными именами;
- Функциональные блоки выполняются слева направо, сверху вниз;
- На входе функционального блока может быть константное выражение, любая внутренняя или входная переменная контроллера; выходная переменная;
- На выходе блока может быть любая внутренняя или выходная переменная ПЛК.

В табл. 3.2 представлены основные функциональные блоки языка *FBD*.

Таблица 3.2

Некоторые функциональные блоки языка *FBD*

Наименование	Обозначение	Описание
1. Функции двоичного типа	<i>NOT</i>	Логическое отрицание
	<i>AND</i>	Логическая конъюнкция
	<i>OR</i>	Логическая дизъюнкция
	<i>XOR</i>	Исключающее ИЛИ
	<i>SET</i>	Присвоение переменной
	<i>RESET</i>	Обнуление переменной
2. Функции управления	<i>RETURN</i>	Возврат из подпрограммы
	<i>GOTO</i>	Безусловный переход
	<i>CALL</i>	Вызов подпрограммы
	<i>TSTART</i>	
	<i>TSTOP</i>	
	<i>GSTART</i>	
	<i>GSTOP</i>	
3. Арифметические функции	<i>ADD</i>	Сложение
	<i>SUB</i>	Вычитание
	<i>DIV</i>	Деление
	<i>MUL</i>	Умножение

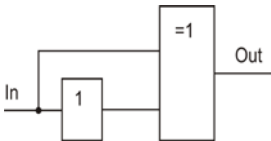
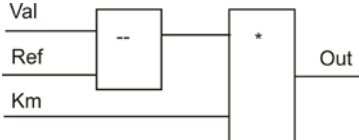
Окончание табл. 3.2

Наименование	Обозначение	Описание
4. Функции сравнения	=	Равно
	<>	Не равно
	>	Больше
	<	Меньше
	=>	Больше или равно
	<=	Меньше или равно
5. Математические функции	<i>ABS</i>	Модуль
	<i>EXPT</i>	Экспонента
	<i>LOG</i>	Логарифм
	<i>SQRT</i>	Корень
6. Тригонометрические	<i>ACOS</i>	Арккосинус
	<i>ASIN</i>	Арксинус
	<i>ATAN</i>	Арктангенс
	<i>COS</i>	Косинус
	<i>SIN</i>	Синус
	<i>TAN</i>	Тангенс

В табл. 3.3 приведены примеры реализации некоторых операций на языке *FBD*.

Таблица 3.3

Примеры программирования на языке *FBD*

Выполняемая операция	Изображение	Описание
Обнаружение перепада сигнала <i>In</i>		Двоичная переменная <i>Out</i> примет значение <i>TRUE</i> тогда и только тогда, когда переменная <i>In</i> изменит свое состояние
П-регулятор		Рассогласование между текущим значением величины <i>Val</i> и заданием <i>Ref</i> домножается на коэффициент <i>Km</i> и используется в качестве управляющего воздействия

Окончание табл. 3.3

Выполняемая операция	Изображение	Описание
Ограничение нижнего предела делителя <i>In</i>		Программа обеспечивает деление переменной <i>Sampl</i> на значение переменной <i>Val</i> . Переменная делителя <i>Val</i> снизу ограничена значением <i>Vmin</i> . Переменная <i>Error</i> принимает значение <i>TRUE</i> , если $Val < Vmin$

3.3.2. Краткая характеристика инструментальной системы *ISaGRAF*

Инструментальная система *ISaGRAF* относится к классу систем *CASE*-типа (*Computer Aided Software Engineering*) и предназначена для разработки прикладного программного обеспечения интеллектуальных контроллеров. Система *ISaGRAF* включает:

- Систему разработки (*ISaGRAF WorkBench*);
- Систему исполнения (*ISaGRAF Target*).

Система разработки предназначена для создания прикладных задач, исполняемых затем под управлением ядра *ISaGRAF* на системах исполнения, и устанавливается на компьютере *IBM PC* (или совместимом) под управлением *MS Windows*. Специальных требований к компьютеру не предъявляется.

Система исполнения либо загружается, либо прожигается в ПЗУ системы исполнения (*TARGET SYSTEM*). Она включает в себя ядро *ISaGRAF* и набор модулей связи. В качестве целевой системы могут выступать контроллеры (или компьютеры), построенные на основе микропроцессоров *INTEL* и *MOTOROLA* и работающие как под управлением операционных систем (*OS-9*, *VxWorks*, *Dos*, *Windows NT*, *QNX* и т.д.), так и без них.

Основные достоинства *ISaGRAF*:

- Использование стандартных языков программирования (*IEC 61131-3*);
- Графический интерфейс системы разработки;

- Легкость в освоении и удобство использования;
- Обеспечение качественных разработок пользовательских приложений;
- Встроенные средства программирования промышленных сетей;
- Удобные и эффективные отладочные средства.

В *ISaGRAF* заложена методология структурного программирования, которая дает возможность пользователю описать автоматизируемый процесс в наиболее легкой и понятной форме. Интерфейс с пользователем системы разработки *ISaGRAF* соответствует международному стандарту *GUI (Graphical User Interface)*, включающему многооконный режим работы, полнографические редакторы, работу с мышью и т.д. Функции *ISaGRAF* можно разделить на два класса: функции общего назначения и функции программирования логики. Функции общего назначения позволяют решать следующие задачи:

- Управление разработкой проекта (создание программной конфигурации, разработка отдельных программных и функциональных единиц);
- Создание пользовательских библиотек функций и блоков на основе стандартных языков;
- Создание пользовательских библиотек СИ-функций и СИ-блоков, а также драйверов модулей УСО;
- Архивация проектов и функций;
- Отладка разработанных программных единиц;
- «Горячая» замена исходного кода.

ISaGRAF предоставляет возможность разрабатывать процедуры с использованием языка «С». Эти процедуры можно вызывать из любого, описанного выше языка. Тестирование любого программного продукта составляет существенную часть всей разработки, и наличие хороших отладочных средств является необходимым условием для создания сложных программных комплексов. *ISaGRAF* обладает таким средством. Графический отладчик интегрирован в систему разработки и дает возможность:

- Запуска приложения в реальном режиме и в режиме эмулятора;
- Трассировки программ и процедур;

- Мониторинга переменных проекта;
- Интерактивного изменения содержимого переменных;
- Изменения цикла выполнения.

В зависимости от реализации системы исполнения *ISaGRAF* под определенный тип контроллеров существует поддержка различных протоколов промышленных сетей непосредственно из *ISaGRAF*. Например, для контроллеров компании *Kontron Modular Computers* реализована поддержка протоколов *MODBUS*, *PROFIBUS-FMS/FDL/DP*. Это дает возможность использования одного инструментального средства и для программирования логики контроллеров и для конфигурирования многоузловых сетей с включением систем визуализации на базе *PC* (*FactoryLink*, *InTouch*, *TraceMode* и т.д.). База данных *ISaGRAF*-приложения открыта для доступа со стороны других задач и этой возможностью можно пользоваться, если на целевой системе стоит многозадачная операционная система.

3.3.3. Последовательность разработки программного обеспечения контроллера

Программирование контроллера начинается с создания словаря переменных, определения их типов. Состав переменных соответствует конкретному набору сигналов, формируемых или используемых в данном контроллере, из общего объема сигналов, функционирующих в системе. Именами переменных являются *KKS*-коды соответствующих сигналов. *KKS*-коды – это двоичные коды сигналов, сформированные по определенным алгоритмам, при создании информационного обеспечения АСУ ТП.

Затем осуществляется выбор специализированных программных устройств ввода/вывода (из библиотеки устройств ввода/вывода) и распределение переменных по каналам.

Затем выбором набора программных блоков задается последовательность обработки и формирования сигналов. Устанавливаются связи между модулями.

Загрузка приложения в целевую систему осуществляется с помощью графического Отладчика Системы разработки «*Isa Graf*» или другого инструментального средства.

Отладка приложения и настройка параметров программных блоков производится также с помощью средств инструментального пакета и специальных средств конфигурирования, встроенных в информационную систему верхнего уровня.

3.4. Программное обеспечение верхнего (диспетчерского) уровня в системе управления

3.4.1. Состав программного обеспечения верхнего уровня

Программное обеспечение АСУ ТП можно разделить на две части – общее и специализированное прикладное (ОПО, СППО). Общее программное обеспечение включает комплекс программ, обеспечивающих эффективную работу используемого в АСУ ТП программно-технического комплекса (ПТК) и разработку прикладных программ контроля и управления технологическим объектом. Специализированное прикладное программное обеспечение – это комплекс программ, разработанных для решения задач управления конкретным технологическим объектом. ОПО включает в себя операционные системы вычислительных узлов (рабочих станций, серверов), тестовые, диагностические программы, программное обеспечение коммуникационных сетей, языки программирования, специальные пакеты для разработки СППО и т.д. Доминирующей операционной системой для АСУ ТП верхнего уровня является *Windows NT*. Стандартным механизмом взаимодействия программного обеспечения АСУ ТП признан стандарт *OPC (OLE for Process Control)*, который основан на объектной модели *COM/DCOM* фирмы *Microsoft*. *OPC* – это стандарт взаимодействия между программными компонентами сбора данных и управления. Он приходит на смену *DDE*-обмена (динамического обмена данными). Его взаимодействие основано на клиент-серверной архитектуре. В качестве *OPC*-клиента выступает, например, *SCADA*-система, а в качестве *OPC*-сервера – контроллеры, *УСО* и т.д. *OPC*-серверы разрабатываются производителями контроллеров или *SCADA*-систем. Стандарт *OPC* включает три основные спецификации:

- 1) доступ к данным реального времени;

- 2) обработка тревог и событий;
- 3) доступ к историческим данным.

Приступая к разработке специализированного прикладного программного обеспечения системы контроля и управления, системный интегратор или конечный пользователь обычно выбирает один из следующих путей:

- Программирование с использованием «традиционных» средств (традиционные языки программирования, стандартные средства отладки и пр.);
- Использование существующих, готовых инструментальных проблемно-ориентированных средств создания программного обеспечения диспетчерского уровня АСУ ТП (SCADA-систем).

Для большинства разработчиков ПО выбор в настоящее время очевиден. Процесс разработки СППО важно упростить, сократить временные и прямые финансовые затраты на его разработку, минимизировать затраты труда высококлассных программистов, по возможности привлекая к разработке специалистов по автоматизации технологических процессов. Для сложных распределенных систем управления процесс разработки СППО с использованием «традиционных» средств может стать недопустимо длительным, а затраты на его разработку неоправданно высокими. Вариант с непосредственным программированием относительно привлекателен лишь для простых систем или небольших фрагментов большой системы, для которых нет стандартных решений (не написан, например, подходящий драйвер) или они не устраивают по тем или иным причинам заказчика. При этом программирование выполняется с помощью встроенных языков (*Visual Basic* и др.). Исходя из этого, в настоящее время разработка СППО АСУ ТП в подавляющем большинстве осуществляется на базе SCADA-систем.

3.4.2. Общая характеристика SCADA-систем

SCADA-система (Supervisory Control And Data Acquisition – система сбора данных и оперативного диспетчерского управления) разрабатывалась как универсальное многофункциональное программное обеспечение систем верхнего уровня, позволяющее оперативному персоналу наиболее эффективно управлять технологическим процессом. По мере развития программных и аппаратных средств наблюдается применение *SCADA-систем* на нижнем, контроллерном, уровне.

Система *SCADA* состоит из инструментального и исполнительного комплекса. Инструментальный комплекс предназначен для разработки ПО автоматизированных рабочих мест (*АРМ*) технолога, оператора, диспетчера и др. Исполнительный комплекс реализует разработанное ПО в определенной операционной среде.

Диспетчерское управление и сбор данных является наиболее перспективным методом автоматизированного управления сложными динамическими системами (процессами) в жизненно важных и критичных с точки зрения безопасности и надежности областях. Интерес к проблемам построения высокоэффективных и высоконадежных систем диспетчерского управления и сбора данных резко возрос за последние 10–20 лет. С одной стороны, это связано со значительным прогрессом в области вычислительной техники, программного обеспечения и телекоммуникаций, что увеличивает возможности и расширяет сферу применения автоматизированных систем. С другой стороны, развитие информационных технологий, повышение степени автоматизации и перераспределение функций между человеком и аппаратурой обострило проблему взаимодействия человека-оператора с системой управления. Анализ большинства аварий и происшествий в авиации, наземном и водном транспорте, промышленности и энергетике показал, что если в 60-х гг. прошлого столетия ошибка человека являлась первоначальной причиной лишь 20 % инцидентов (80 % – за технологическими неисправностями и отказами), то в 90-х гг. доля «человеческого фактора» возросла до 80 %. Это послужило толчком к разработке *SCADA-систем*.

Система *SCADA* – процесс сбора информации в режиме «реального времени» с удаленных точек контроля технологического объекта для анализа и управления этим объектом. Требование

обработки в режиме «реального времени» обусловлено необходимостью быстрой доставки (выдачи) всех необходимых событий (сообщений) и данных на рабочую станцию оператора (диспетчера).

Можно выделить пять функций человека-оператора в системе диспетчерского управления, в которых оператор:

- Планирует, какие следующие действия необходимо выполнить;
- Обучает (программирует) компьютерную систему на последующие действия;
- Отслеживает результаты работы системы;
- Вмешивается в процесс, в случае критических событий, когда автоматика не может справиться, либо при необходимости подстройки (регулировки) параметров процесса;
- Обучается в процессе работы (получает опыт).

Основными особенностями процесса управления в современных диспетчерских системах являются следующие:

- Процесс *SCADA* применяется в системах, в которых обязательно наличие человека (оператора, диспетчера);
- Оператор несет, как правило, общую ответственность за управление системой, которая, при нормальных условиях, только изредка требует подстройки параметров для достижения оптимальной производительности;
- Активное участие оператора в процессе управления происходит нечасто и в непредсказуемые моменты времени, обычно в случае наступления критических событий (отказы, нештатные ситуации и пр.);
- Действия оператора в критических ситуациях могут быть жестко ограничены по времени (несколькими минутами или даже секундами).

Основные функции, выполняемые практически любым СППО АСУ ТП, созданным на базе представленных на рынке промышленной автоматизации *SCADA*-систем:

- Сбор данных о параметрах процесса, поступающих от контроллеров или непосредственно от датчиков и исполнительных устройств (значения температуры, давления и других параметров, положение клапана или вала исполнительного механизма);

- Обработка и хранение (архивирование) полученной информации. Под обработкой информации понимается выполнение функций фильтрации, нормализации, масштабирования, линеаризации и других для приведения данных к нужному формату;
- Графическое представление в цифровой, символьной или иной форме информации о ходе технологического процесса. Это может быть представление значений переменных в виде графиков в функции времени (трендов), гистограмм и др.;
- Сигнализация изменений хода технологического процесса, особенно в предаварийных и аварийных ситуациях в виде системы алармов. При этом может осуществляться регистрация действий обслуживающего персонала в аварийных ситуациях;
- Формирование сводок, журналов и других отчетных документов о ходе технологического процесса на основе информации, собранной в архивах;
- Формирование команд оператора по изменению параметров настройки и режима работы контроллеров, исполнительных устройств (пуск-останов, открытие-закрытие и других функций);
- Автоматическое управление ходом технологического процесса в соответствии с имеющимися в SCADA-системах алгоритмами управления (ПИД-регулирование, позиционное, нечеткое регулирование и др.). Данные функции обычно выполняются контроллерами, SCADA-системы рекомендуется использовать для решения задач невысокого быстродействия.

Таким образом, SCADA-системы являются мощным инструментом для разработки СППО диспетчерского уровня АСУ ТП. При этом от разработчика не требуется больших знаний в области программирования на языках высокого уровня.

Наиболее распространенные, на сегодняшний день, SCADA-системы представлены в табл. 3.4.

При таком многообразии SCADA-продуктов на российском рынке естественно возникает вопрос об их выборе. Выбор SCADA-системы представляет собой достаточно трудную задачу, аналогичную поиску оптимального решения в условиях многокритериальности.

Таблица 3.4

SCADA-системы

№	Наименование	Фирма-производитель
1	<i>InTouch</i>	«Wonderware», США
2	<i>Genesis32</i>	«Iconics», США
3	<i>iFIX</i>	«Intellution», США
4	<i>Trace Mode</i>	«AdAstra», Россия
5	<i>Real Flex</i>	«BJ Software Systems (BJSS)», США
6	<i>Cimplicity</i>	«GE Fanuc», США – Япония
7	<i>WinCC</i>	«Siemens», Германия
8	<i>Citect</i>	«CI Technology», Австралия
9	<i>IMAGE</i>	«Numpha Soft», Финляндия – Россия
10	<i>MasterSCADA</i>	«ИнСАТ», Россия
11	<i>VNS</i>	«ИнСАТ», Россия
12	<i>КРУГ 2000</i>	«КРУГ», Россия
13	<i>WizFactory</i>	«PC Soft International Inc.», США – Израиль
14	<i>Elipse Windows</i>	«Elipse Software LTDA», Бразилия
15	<i>Genie 3.0</i>	«Advantech», Тайвань
16	<i>MOSCAD</i>	«Motorola», США
17	<i>СКАТ-М</i>	«Центрпрограммсистем», Россия
18	<i>КАСКАД</i>	АО «Элара», Россия
19	<i>VIORD microSCADA</i>	«ФИОРД», Россия
20	<i>Phocus</i>	«Jade Software»
21	<i>МИКСИС (MIKSys)</i>	«МИФИ», Россия

Ниже приводится примерный перечень критериев оценки SCADA-систем, которые в первую очередь должны интересовать пользователя. В нем можно выделить три большие группы показателей:

- Технические характеристики;
- Стоимостные характеристики;
- Эксплуатационные характеристики.

При выборе SCADA-систем необходимо провести анализ программно-аппаратных платформ для них. Анализ перечня таких платформ необходим, поскольку от него зависит ответ на вопрос, возможна ли реализация той или иной SCADA-системы на имеющихся вычислительных средствах, а также оценка стоимости эксплуатации системы (будучи разработанной в одной опера-

ционной среде, прикладная программа может быть выполнена в любой другой, которую поддерживает выбранный SCADA-пакет). В большинстве SCADA-систем этот вопрос решен по-разному. Так, *FactoryLink* имеет весьма широкий список поддерживаемых программно-аппаратных платформ, приведенных в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Программно-аппаратные платформы для SCADA-систем

Операционная система	Компьютерная платформа
<i>DOS/MS Windows</i>	<i>IBM PC</i>
<i>OS/2</i>	<i>IBM PC</i>
<i>SCO UNIX</i>	<i>IBM PC</i>
<i>VMS</i>	<i>VAX</i>
<i>AIX</i>	<i>RS6000</i>
<i>HP-UX</i>	<i>HP 9000</i>
<i>MS Windows/NT</i>	Системы с <i>Windows/NT</i> , реализованные, в основном, на <i>PC</i> -платформе

В то же время, в таких SCADA-системах, как *RealFlex* и *Sitex* основу программной платформы принципиально составляет единственная операционная система реального времени *QNX*.

Подавляющее большинство SCADA-систем реализовано на *MS Windows* платформах. Именно такие системы предлагают наиболее полные и легко наращиваемые *MMI*-средства. Большинство разработчиков приоритетным считают дальнейшее развитие своих SCADA-систем на платформе *Windows NT*. Некоторые фирмы, до сих пор поддерживающие SCADA-системы на базе операционных систем реального времени (ОСРВ), начали менять ориентацию, выбирая системы на платформе *Windows NT*. Все более очевидным становится применение ОСРВ, в основном, во встраиваемых системах, где они действительно хороши. Таким образом, основным полем, где сегодня разворачиваются главные события глобального рынка SCADA-систем, стала *MS Windows NT*.

на фоне все ускоряющегося сворачивания активности в области *MS DOS*, *MS Windows 3.xx/95,98*.

При выборе *SCADA*-систем необходимо провести анализ имеющихся в них средств сетевой поддержки. Одной из основных черт современного мира систем автоматизации является их высокая степень интеграции. В любой из них могут быть задействованы объекты управления, исполнительные механизмы, аппаратура, регистрирующая и обрабатывающая информацию, рабочие места операторов, серверы баз данных и т.д. Очевидно, что для эффективного функционирования в этой разнородной среде *SCADA*-система должна обеспечивать высокий уровень сетевого сервиса. Желательно, чтобы она поддерживала работу в стандартных сетевых средах (*ARCNET*, *ETHERNET* и т.д.) с использованием стандартных протоколов (*NETBIOS*, *TCP/IP* и др.), а также обеспечивала поддержку наиболее популярных сетевых стандартов из класса промышленных интерфейсов (*PROFIBUS*, *CANBUS*, *LON*, *MODBUS* и т.д.). Этим требованиям в той или иной степени удовлетворяют практически все рассматриваемые *SCADA*-системы, с тем только различием, что набор поддерживаемых сетевых интерфейсов, конечно же, разный.

При выборе *SCADA*-систем необходимо учитывать, имеет ли выбираемая система встроенные командные языки (*VBasic*-подобные языки), позволяющие генерировать адекватную реакцию на события, связанные с изменением значения переменной, с выполнением некоторого логического условия, с нажатием комбинации клавиш, а также с выполнением некоторого фрагмента

с заданной частотой относительно всего приложения или отдельного окна.

Большое значение имеет условие независимости *SCADA*-системы от типа базы данных, что позволяет менять базу данных без серьезного изменения самой прикладной задачи, создавать независимые программы для анализа информации, использовать уже наработанное программное обеспечение, ориентированное на обработку данных.

Для специалиста-разработчика системы автоматизации, так же как и для специалиста-технолога, чье рабочее место создается, очень важен графический пользовательский интерфейс. Функци-

онально графические интерфейсы SCADA-систем весьма похожи. В каждой из них существует графический объектно-ориентированный редактор с определенным набором анимационных функций. Используемая векторная графика дает возможность осуществлять широкий набор операций над выбранным объектом, а также быстро обновлять изображение на экране, используя средства анимации.

Система является открытой, если для нее определены и описаны используемые форматы данных и процедурный интерфейс, что позволяет подключить к ней «внешние», независимо разработанные компоненты. Вопрос об открытости системы является важной характеристикой SCADA-систем. Фактически открытость системы означает доступность спецификаций системных (в смысле SCADA) вызовов, реализующих тот или иной системный сервис. Это может быть и доступ к графическим функциям, функциям работы с базами данных и т.д.

Современные SCADA-системы не ограничивают выбора аппаратуры нижнего уровня, так как предоставляют большой набор драйверов или серверов ввода-вывода и имеют хорошо развитые средства создания собственных программных модулей или драйверов новых устройств нижнего уровня. Сами драйверы разрабатываются с использованием стандартных языков программирования. Вопрос, однако, в том, достаточно ли только спецификаций доступа к ядру системы, поставляемых фирмой-разработчиком в штатном комплекте (система *Trace Mode*), или для создания драйверов необходимы специальные пакеты (системы *FactoryLink*, *InTouch*), или же разработку драйвера нужно заказывать у фирмы-разработчика.

Многие компании занимаются разработкой драйверов, *ActiveX*-объектов и другого программного обеспечения для SCADA-систем. Этот факт очень важно оценивать при выборе SCADA-пакета, поскольку это расширяет область применения системы непрофессиональными программистами (нет необходимости разрабатывать программы с использованием языков *C* или *Basic*).

При оценке стоимости SCADA-систем нужно учитывать следующие факторы:

- Стоимость программно-аппаратной платформы;
- Стоимость системы;
- Стоимость освоения системы;
- Стоимость сопровождения.

Показатели этой группы критериев наиболее субъективны. Это тот самый случай, когда лучше один раз увидеть, чем семь раз услышать. К этой группе можно отнести:

- Удобство интерфейса среды разработки – «Windows – подобный интерфейс», полнота инструментария и функций системы;
- Качество документации – ее полнота, уровень русификации;
- Поддержка со стороны создателей – количество инсталляций, дилерская сеть, обучение, условия обновления версий и т.д.

Если предположить, что пользователь справился и с этой задачей – остановил свой выбор на конкретной SCADA-системе, то далее начинается разработка системы контроля и управления, которая включает следующие этапы:

- Разработка архитектуры системы автоматизации в целом. На этом этапе определяется функциональное назначение каждого узла системы автоматизации;
- Решение вопросов, связанных с возможной поддержкой распределенной архитектуры, необходимостью введения узлов с «горячим резервированием» и т.п.;
- Создание прикладной системы управления для каждого узла. На этом этапе специалист в области автоматизируемых процессов наполняет узлы архитектуры алгоритмами, совокупность которых позволяет решать задачи автоматизации;
- Приведение в соответствие параметров прикладной системы с информацией, которой обмениваются устройства нижнего уровня (например, программируемые логические контроллеры – ПЛК) с внешним миром (датчики технологических параметров, исполнительные устройства и др.);
- Отладка созданной прикладной программы в режиме эмуляции.

3.4.3. SCADA-система *Trace Mode*

Trace Mode – это 32-разрядная SCADA-система, имеющая сертификат Госстандарта РФ и широкое распространение в России и странах СНГ. *Trace Mode* является интегрированной SCADA/HMI и *SoftLogic* системой, когда разработка приложений для операторских станций и контроллеров производится в рамках одного проекта на базе единого ПО. За счет использования принципов автопостроения проекта сокращаются время его разработки и стоимость.

Архитектура системы *Trace Mode* – это клиент-серверная архитектура с использованием общей модели объектов DCOM для ОС Windows NT/2000/XP. Основу *Trace Mode* составляет мощный сервер и БД реального времени. Связь с клиентскими модулями, приложениями SCADA-систем, УСО и СУБД осуществляется через стандартные интерфейсы DCOM, OPC, HTTP, DDE, T-COM, ActiveX, SQL/ODBC.

Основные функции системы *Trace Mode 5*:

- Модульная структура с числом каналов от 128 до 64 000×16;
- Встроенная поддержка российских контроллеров Ремиконт, Ломиконт, Ш711, КРУИЗ, МФК, ЭК2000 и др.;
- Поддержка международного стандарта на средства программирования контроллеров IEC 61131-3;
- Библиотека драйверов контроллеров фирм *Rockwell Automation*, *Siemens*, *Schneider Electric*, *Moeller*, *PEP*, *Fisher Rosemount* и др.;

Средства программирования PC-base контроллеров *MIC2000*, *ROBO*, *Lagoon*, *TREI* и др.;

- Встроенная система более 150 алгоритмов АСУТП, в том числе алгоритмы фильтрации, ПИ- и ПИД-регулирования, нечеткое и позиционное регулирование, ШИМ-преобразование и др., а также адаптивная настройка регуляторов;
- Открытость для встраивания пользовательских алгоритмов и форм отображения *ActiveX*;
- Возможность резервирования локальных сетей, датчиков, архивов с автоматическим восстановлением после сбоя.

Суть автопостроения, ускоряющего разработку проекта, заключается в автоматическом генерировании баз каналов операторских станций и контроллеров на основе информации о числе

точек ввода-вывода, номенклатуре контроллеров и УСО, характере связи между ПК и ПЛК.

Благодаря автопостроению, разработка АСУ ТП сводится к следующему:

- В рабочем поле Редактора базы каналов размещаются иконки (объекты) контроллеров и операторских станций;
- Указываются число сигналов ввода-вывода и наличие информационного обмена между узлами;
- Запускается автопостроение, которое автоматически формирует базы каналов проекта.

Разработка графического интерфейса осуществляется с помощью Редактора представления данных (аналогичного Редактору базы каналов), который позволяет создавать мнемосхемы технологических объектов и динамические объекты (гистограммы, тренды, бегущие дорожки и пр.). Библиотека объектов включает емкости, теплообменники, кнопки и др. Пользователь может на языке *Visual Basic (VB)* написать собственные формы как *ActiveX* и встроить их в *Trace Mode*. Возможна отладка проекта из редактора *Trace Mode* в режиме реального времени.

По протоколам *TCP/IP*, *IPX/SPX*, *DCOM*, *DDE/NetDDE*, *OPC* и др. осуществляется связь с офисными приложениями *Excel*, *Access*, *MS SQL Server*, *Oracle*, *SyBase*, *BaseStar*, *R/3*, программами ПАРУС и ГАЛАКТИКА на уровне АСУП.

Основу ПО диспетчерского уровня управления составляют модули реального времени (*MPB*). *MPB Trace Mode* – это сервер реального времени, осуществляющий прием данных с контроллеров, управление процессом, визуализацию информации, расчет ТЭП, ведение архивов (с дискретностью 0,001 с).

Trace Mode содержит средства для разработки *APM* руководителя с помощью модулей *Supervisor*, которые предоставляют руководителю всю необходимую информацию о параметрах и состоянии технологического процесса.

Trace Mode позволяет создавать резервированные многоуровневые АСУ ТП масштаба предприятия на базе ведущих сетевых ОС с обменом по протоколу *NetBios*, *NetBEUI*, *IPX/SPX*, *TCP/IP*. Сетевые комплексы допускают структурирование с вы-

делением следующих уровней: контроллерного, диспетчерского и административного (рис. 3.6).

Оформление отчетов о ходе технологического процесса осуществляется с помощью Сервера документирования. Сервер принимает данные от удаленных модулей и обрабатывает их в соответствии со сценариями. Готовые отчеты могут быть записаны

в файл, выведены на печать, экспортированы в СУБД или представлены в *Internet*. Для обмена информацией по сети *Internet* используется Web-сервер *Trace Mode*. Технология тонкого клиента позволяет осуществлять визуализацию процесса, формировать тренды и алармы, формировать управляющие воздействия с помощью Web-браузера.

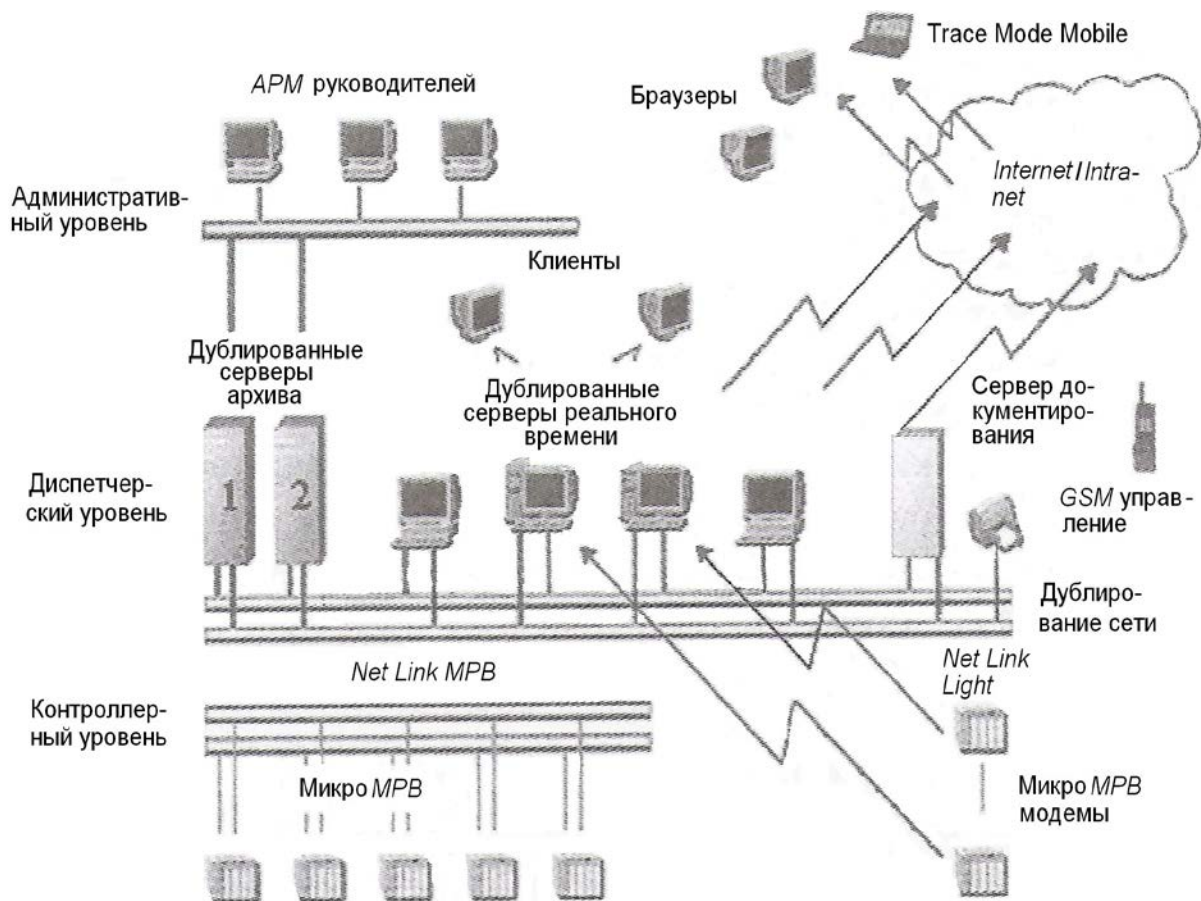


Рис. 3.6. Структура многоуровневой АСУ ТП предприятия на базе SCADA-системы *Trace Mode*

Trace Mode поддерживает технологии телеуправления через *GSM* и *SMS*. *GSM*-активатор для *Windows NT* предоставляет пользователям на сотовые телефоны отчеты тревог, позволяет передавать с сотового телефона команды управления, получать информацию по запросу с сотового телефона.

Пример визуализации технологического процесса гидрирования бензола и его управления показан на нескольких экранных формах, созданных в среде *SCADA*-система *Trace Mode* (рис. 3.7–3.11). На рис. 3.8 показана мнемосхема технологического процесса, а на рис. 3.9, 3.10, 3.11 – экранные формы для настройки регуляторов. После щелчка по кнопке, расположенной в строке «Настройка регуляторов» (см. рис. 3.6), на экран выводится рис. 3.9.

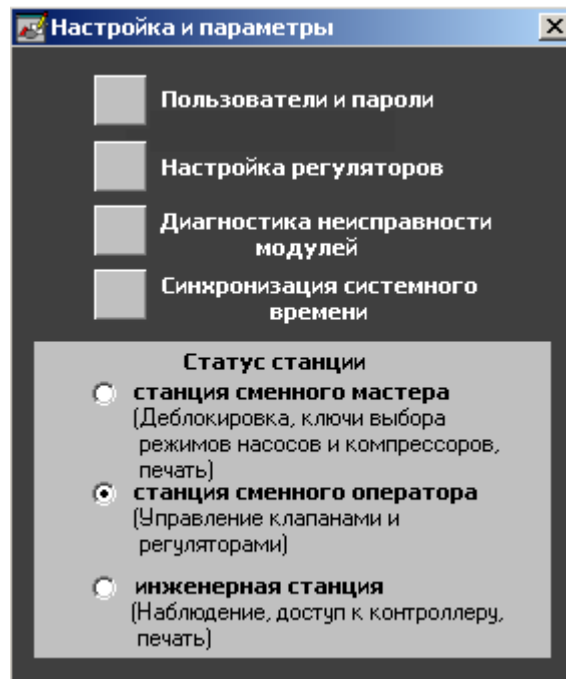


Рис. 3.7. Окно выбора статуса рабочей станции и выполняемой задачи

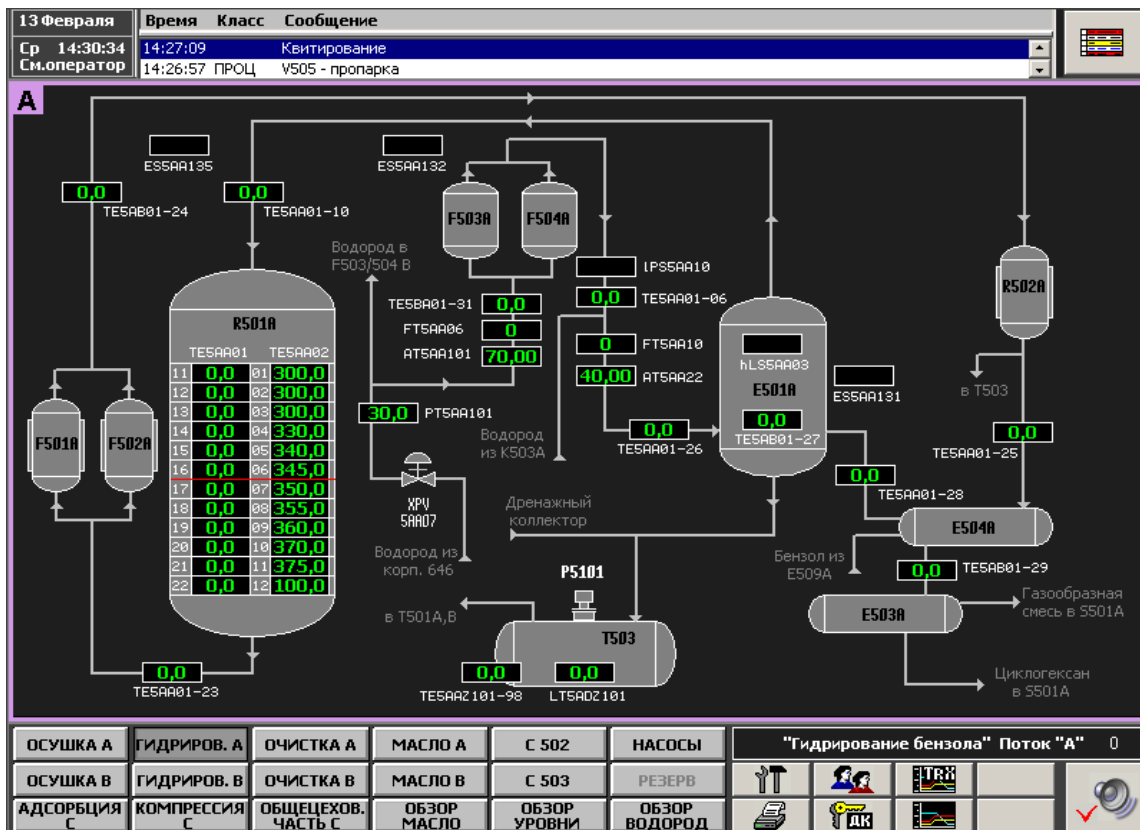


Рис. 3.8. Мнемосхема процесса гидрирования бензола

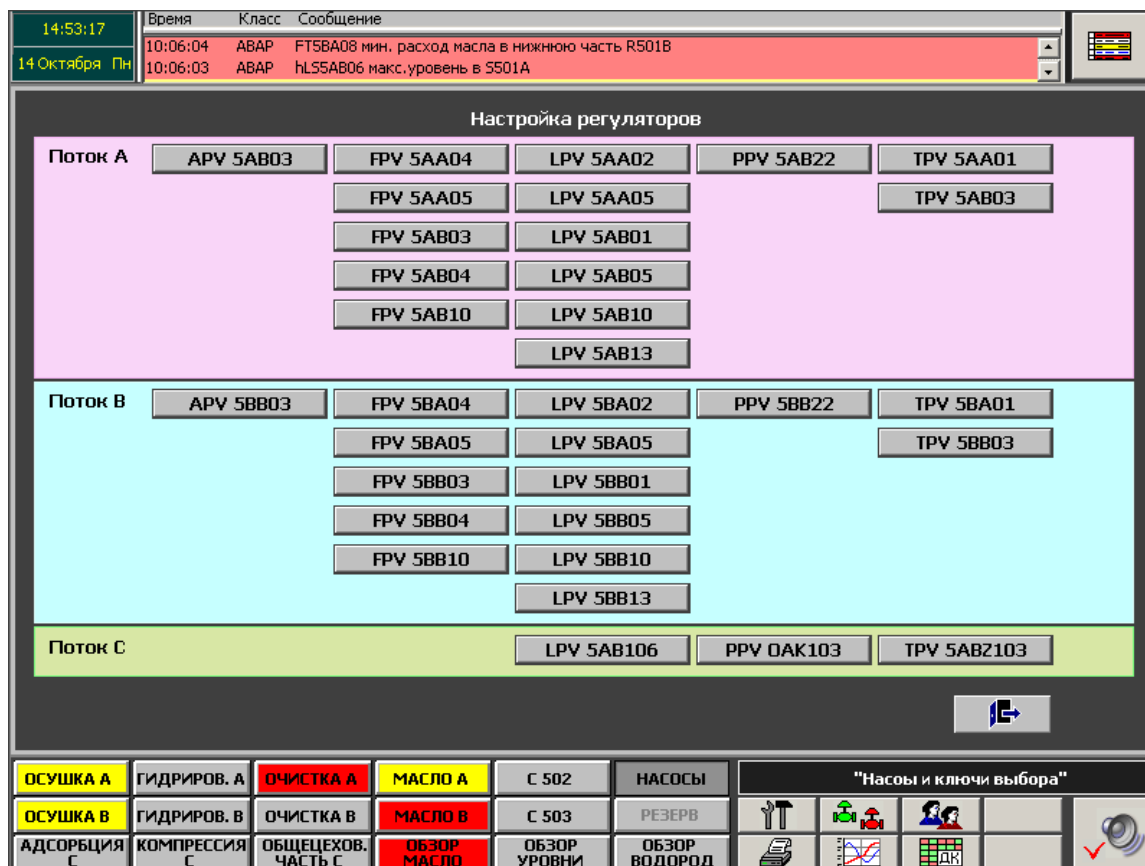


Рис. 3.9. Экранная форма выбора регуляторов

После щелчка по кнопке соответствующего регулирующего устройства он замещается экраном его настройки (рис. 3.10).



Рис. 3.10. Экранная форма настройки регулятора

В нем можно изменять настройки регулятора, вводить ограничение на изменение сигнала задания и выхода на клапан, определить зону нечувствительности. На графике отображаются изменения параметра, задания и выходного сигнала на клапан.

Для просмотра графиков изменения контролируемых переменных процесса во времени необходимо щелкнуть по клавише . При этом выводится экран просмотра графиков (рис. 3.11).

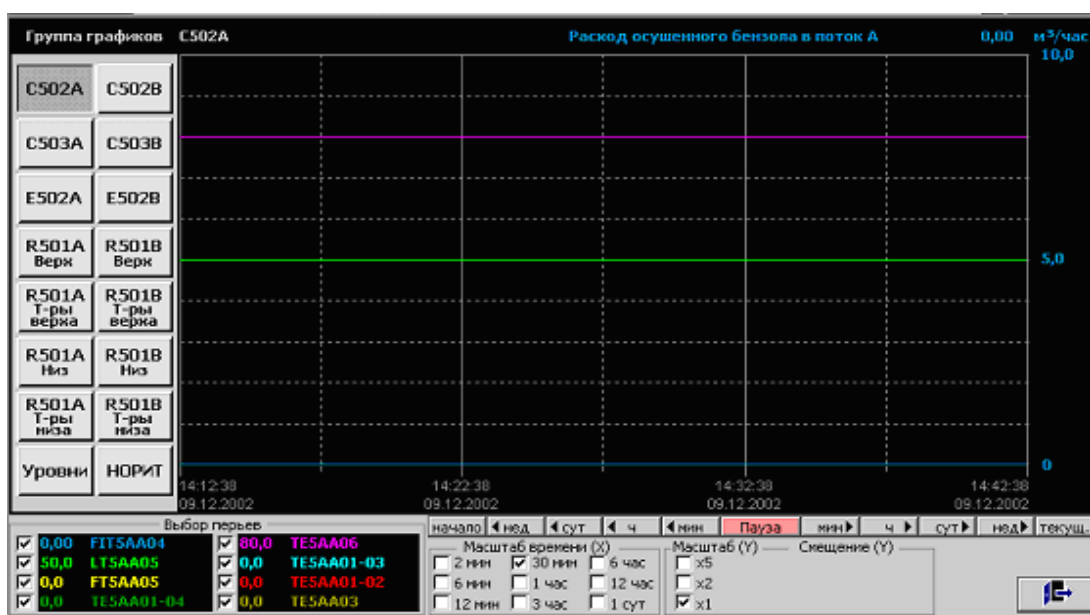


Рис. 3.11. Экранная форма просмотра графиков

Для управления регулирующими клапанами необходимо щелкнуть по символу соответствующего клапана. В результате этого появится окно (рис. 3.12).

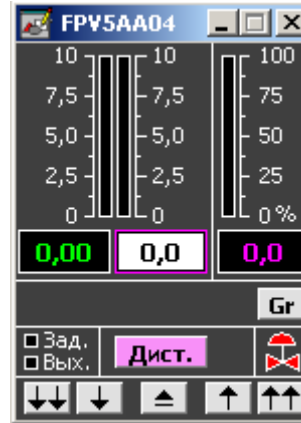


Рис. 3.12. Окно «ручного» изменения положения клапана

В верхней части окна расположены позиция клапана и блок кнопок. Щелчком по кнопке **×** можно закрыть окно. Щелчком по кнопке **Gr** вызывается графическое окно, отражающее величины в виде кривых. Для возврата необходимо щелкнуть по кнопке **Di**.

Блок индикаторов **Зад.** **Вых.** отражает состояние ограничения соответственно задания и выходного сигнала регулятора. При назначенном ограничении соответствующий индикатор загорается красным цветом.

Кнопка **Дист.** является одновременно индикатором состояния. Щелчок по кнопке переключает регулятор в автоматический режим, а кнопка принимает вид **Авт.**

Для клапанов, имеющих сигнализацию конечного положения, предусмотрен индикатор , отражающий состояние клапана закрыто (красный) или открыто (зеленый).

Кнопки **↓↓↓ ↓** (меньше) и **↑ ↑↑** (больше) служат для изменения в режиме Авт. величины задания регулятору, а в режиме Дист. – величины выходного сигнала, поступающего на клапан. Кнопки с одной стрелкой увеличивают (уменьшают) величины на 1 %, а с двумя стрелками – на 10 %.

Для управления отсечным клапаном необходимо щелкнуть по символу соответствующего клапана. В результате этого появится окно (рис. 3.13).

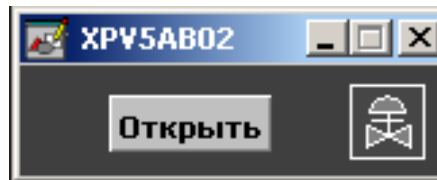


Рис. 3.13. Окно управления отсечным клапаном

Для клапанов, имеющих сигнализацию конечного положения, предусмотрен индикатор , отражающий состояние клапана закрыто (красный) или открыто (зеленый).

3.4.4. SCADA-система *Genie 3.0*

Пакет *Genie 3.0* является инструментальной средой для создания ПО систем сбора данных и оперативного диспетчерского управления (SCADA), исполняемого в среде *Windows 3.x/95/98*. Применяется для проектирования небольших АСУ ТП масштаба участка или цеха. *Genie* имеет модульно-ориентированную, открытую, интегрированную архитектуру (рис. 3.14). Открытость архитектуры позволяет легко реализовать взаимодействие *Genie* с другими приложениями для совместного доступа к данным в реальном масштабе времени. Управление всеми данными *Genie* в реальном масштабе времени, а также хранение и обработку данных осуществляет Центр обработки данных (*Date Center*). Пакет состоит из двух основных программных модулей: Построитель стратегии *GENIE (GENIE.EXE)* и Исполнительная среда *GENIE (GWRUN.EXE)*. Построитель стратегии используется для проектирования и тестирования проектов (стратегий), а Исполнительная среда – только для исполнения стратегий. Стратегия – это совокупность одной или нескольких задач вместе с одной или большим количеством экранных форм, а также одним сценарием. Простейшая стратегия имеет одну задачу с одной экранной формой и не имеет основного сценария. Задача, экранная форма и основной сценарий являются тремя основными элементами проектирования стратегий.

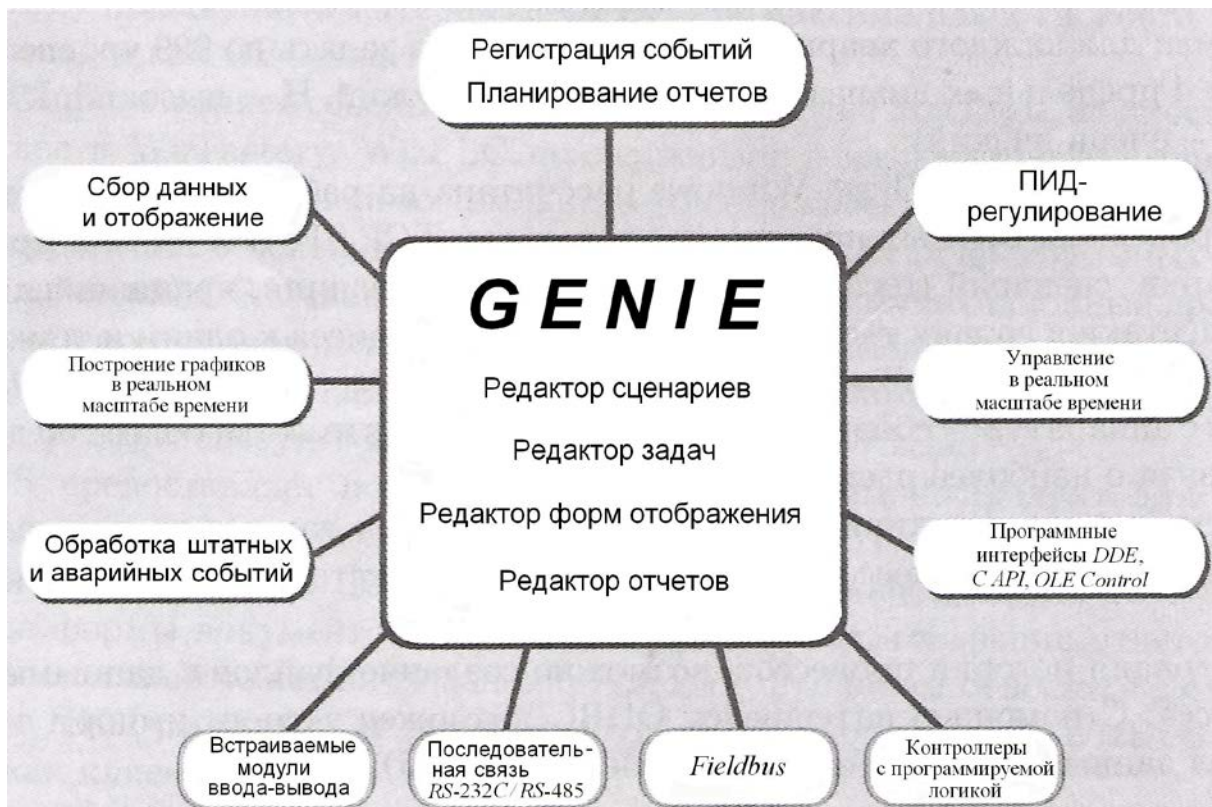


Рис. 3.14. Архитектура SCADA-системы *Genie 3.0*

Экранная форма представляет собой набор элементов отображения и элементов управления. Элементы отображения – это график, текстовая строка, индикатор и др. К элементам управления относятся кнопка, аналоговый, движковый или инкрементный регулятор.

Пиктограммы блоков и элементы являются стандартными блоками для построения стратегии. Соединения между функциональными блоками могут устанавливаться посредством видимых в окне Редактора задач связей, называемых «проводником». Соединение между пиктограммой блока и элементом отображения или между двумя элементами отображения невидимы, и поэтому они называются «связями».

Построитель стратегий *GENIE* предоставляет пользователю для проектирования АСУ ТП четыре различных редактора:

- Редактор задач (*Task Designer*);
- Редактор форм отображения (*Display Designer*);
- Редактор отчетов (*Report Designer*);
- Редактор сценариев (*Script Designer*).

Они используются для редактирования задач, экранных форм отображения, отчетов и основных сценариев соответственно.

Редактор задач (*Task Designer*) предназначен для реализации прикладных алгоритмов создаваемой системы. Разработка системы сводится к размещению пользователем функциональных блоков в окне задачи и установлению между ними связей, определяемых алгоритмом обработки данных. *Genie 3.0* обеспечивает возможность разработки и одновременного исполнения до 8 задач. Более сложная задача может быть разбита на несколько простых задач меньшего объема, что упрощает процесс разработки и увеличивает производительность при исполнении, поскольку при каждом сканировании должно быть обработано меньшее число функциональных блоков.

Редактор форм отображения (*Display Designer*) предназначен для создания динамических графических форм отображения, связанных с исполняемой стратегией сбора данных и управления. При необходимости создания графического интерфейса оператора возможно использование специальных инструментов рисования и элементов отображения, таких как насосы, клапаны, круги, прямоугольники, сегменты и т.п. Кроме того, пользователь может конфигурировать цвета и размеры указанных графических примитивов. Также *Genie* предоставляет команды «Сгруппировать» и «Разгруппировать», позволяющие объединять графические примитивы в единое изображение.

Редактор отчетов (*Report Designer*) предназначен для разработки и генерации отчетов. Пользователь может разрабатывать формат отчета с использованием специального инструмента табличной формы и определять расписание для автоматической печати отчета. К другим функциям Редактора отчетов относятся: сбор данных, конфигурирование формата отчетов, генерация отчетов событий, генерация отчетов тревог.

Редактор сценариев (*Script Designer*) предназначен для управления задачами, вычислениями и анализом данных в реальном масштабе времени. *Genie* предоставляет средства разработки программных сценариев, совместимых с языком *Visual Basic*. Поскольку *Visual Basic* является одним из самых популярных и простых для изучения языков программирования, его наличие в па-

кете позволяет значительно упростить и повысить эффективность разработки проекта с использованием Genie.

Центр обработки данных (*Date Center*) является набором библиотек динамической компоновки (*DLL*-библиотек) и предназначен для хранения и обработки данных, связанных с работой стратегии под управлением исполнительной среды *Genie*. Центр обработки данных поддерживает три способа взаимодействия пакета *Genie* с другими *Windows*-приложениями:

- Интерфейс прикладного программирования (*CAPI*);
- Механизм динамического обмена данными (*DDE*);
- Механизм связывания и внедрения объектов (*OLE Automation*).

Для взаимодействия *Genie* с аппаратными средствами в реальном масштабе времени используются драйверы ввода-вывода (*I/O Drivers*). Драйверы ввода-вывода поддерживают все аппаратные средства промышленной автоматизации фирмы *Advantech*, включая модули сбора данных и управления *ADAM* и др., *PC*-совместимый модульный контроллер *MIC-2000*, устройства удаленного сбора данных и управления серий *ADAM-4000* и *ADAM-5000/485*, а также устройства *ADAM-5000/CAN* промышленной шины *CAN* с протоколом *DeviceNet*.

ЧАСТЬ 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТИПОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И УСТАНОВОК В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

1. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ БУРЕНИЯ И ЭКСКАВАЦИИ

1.1. Автоматизация процессов бурения

1.1.1. Основные направления и эффективность автоматизации процессов бурения

Основными направлениями автоматизации бурения являются:

- Создание ЛСА – локальных систем автоматизации процессов бурения (САУ бурового станка), обеспечивающих:
 - оптимизацию процесса бурения (автоматическое регулирование);
 - автоматическую защиту;
 - диагностику;
 - программно-логическое управление вспомогательными операциями (наращивание, сборка – разборка бурового става и др.);
- Создание АСУ буровыми работами на карьере, включающих в свой состав:
 - локальные САУ буровых станков;
 - SCADA-систему (систему диспетчеризации).

АСУТП буровыми работами решают на верхнем уровне управления следующие задачи:

- Планирование буровых работ;
- Выбор критерия оптимального управления бурением;
- Централизованный (диспетчерский) контроль и учет работы буровых станков.

Источники эффективности автоматизации процессов бурения:

- Повышение производительности буровых станков;

- Снижение затрат на себестоимость бурения (5–7 %);
- Сокращение расхода долот и электроэнергии соответственно до 30 и 10 %.

1.1.2. Буровой процесс как объект автоматизации

Схема бурового процесса как объекта автоматизации представлена на рис. 1.1.

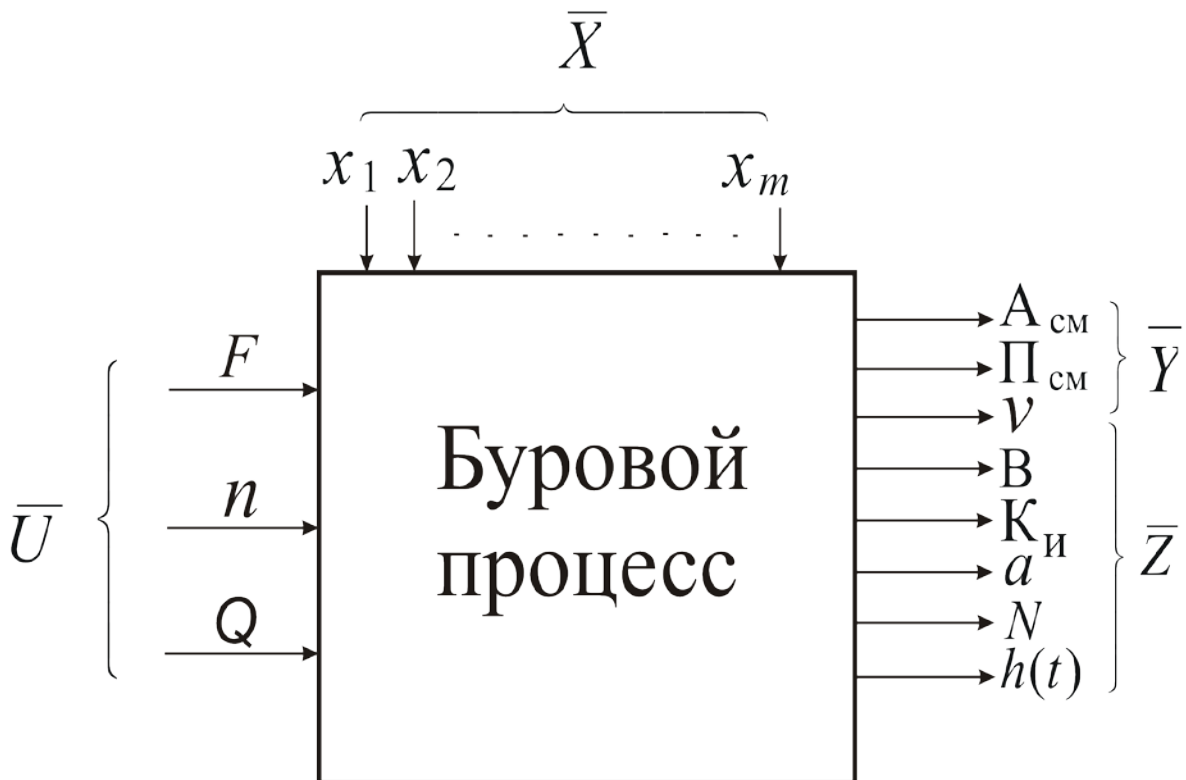


Рис. 1.1. Структура и параметры процесса бурения

$\bar{U}$ – вектор управляющих воздействий (режимных параметров);

F – осевая нагрузка на долото (усилие подачи);

n – частота вращения бурового става;

Q – расход агента очистки скважины (воздуха);

$\bar{X}$ – вектор возмущающих воздействий (x_1 – крепость буримых пород, x_2 – состояние (износ) долота и т.д.);

$\bar{Y}$ – выходной вектор периодически контролируемых величин;

$A_{\text{см}}$ – сменные затраты на бурение;

$\Pi_{\text{см}}$ – сменная производительность (м/смена).

$\bar{Z}$ – выходной вектор непрерывно контролируемых величин;

v – скорость бурения;

B – уровень вибрации;

$K_{\text{И}}$ – коэффициент интенсивности износа долота,

$$K_{\text{И}} = \frac{d(1/v)}{dt} = \frac{\Delta(1/v)}{\Delta t} = \frac{1/v_k - 1/v_H}{\Delta t} = \frac{v_H - v_k}{v_k \cdot v_H \cdot \Delta t}; \quad (1.1)$$

a – удельные энергозатраты на бурение, кВт·ч/м,

$$a = \frac{\int_0^t N(t) dt}{h(t)},$$

где N – мощность, потребляемая ЭП при вращении (бурении);

$h(t)$ – глубина пробуренной скважины (величина проходки).

Математическое описание объекта:

$$\bar{Y} = \check{\Phi}_1(\bar{U}, \bar{X}); \quad (1.2)$$

$$\bar{Z} = \check{\Phi}_2(\bar{U}, \bar{X}), \quad (1.3)$$

где $\check{\Phi}$ – функционал входных векторов.

Из уравнений (1.2) и (1.3) закон оптимального управления может быть записан выражением

$$\bar{U}_{\text{опт}} = \check{\Phi}_3(\bar{X}), \quad (1.4)$$

при условии обеспечения экстремальных значений выходных векторов ($\bar{Y} / \bar{Z} \rightarrow \max / \min$).

1.1.3. Критерии оптимального управления бурением

В качестве критериев оптимального управления бурением могут быть использованы:

Критерий максимальной производительности:

$$v \rightarrow \max.$$

Критерий минимальных затрат на бурение (минимальной себестоимости бурения $C_6 \rightarrow \min$). Себестоимость бурения определяется выражением

$$C_6 = \frac{A_{\text{см}}}{\Pi_{\text{см}}} + \frac{C_{\text{д}}}{h_{\text{д}}}, \quad (1.5)$$

где $C_{\text{д}}$ – стоимость долота;

$h_{\text{д}}$ – стойкость долота.

Для реализации критерия $C_6 \rightarrow \min$ в реальном времени предварительно проводят экспериментальное бурение и из массива полученных данных находят функциональные зависимости:

$$F_{\text{опт}} = f_F(v);$$

$$n_{\text{опт}} = f_n(v).$$

Для карьерных шарошечных станков характер этих функций показан на рис. 1.2.

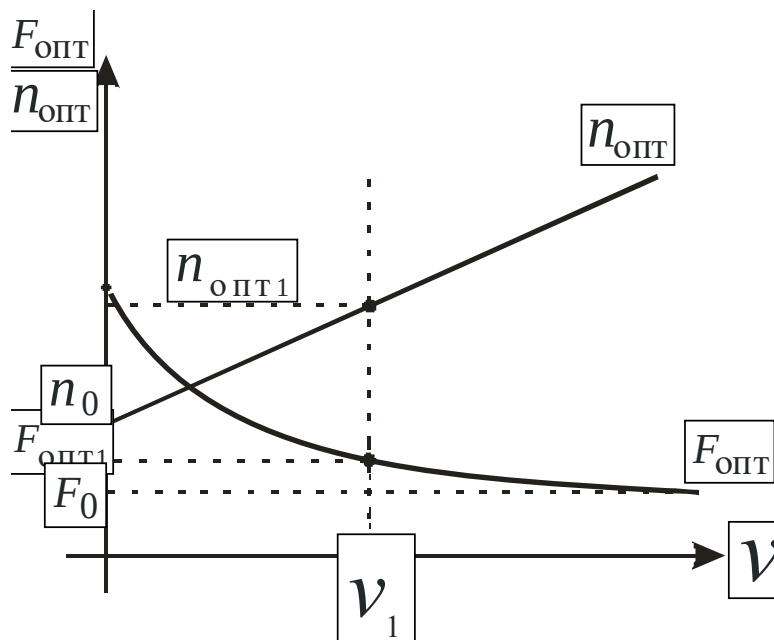


Рис. 1.2. Зависимость режимных параметров от скорости бурения при оптимальном управлении по критерию $C_6 \rightarrow \min$

Функциональные зависимости оптимальных режимных параметров от скорости бурения могут быть представлены в следующем виде:

$$F_{\text{опт}} = F_0 + \frac{K_F}{v}; \quad (1.6)$$

$$n_{\text{опт}} = n_0 + K_n \cdot v, \quad (1.7)$$

где K_F и K_n – постоянные коэффициенты, определяемые свойствами буримых пород и состоянием долота.

Критерий минимального износа долота: $K_{\text{И}} \rightarrow \min$.

Критерий минимальных энергозатраты: $a \rightarrow \min$.

Стабилизация нагрузки электропривода вращателя с ограничением вибраций бурового става:

$$N = N_{\text{зад}} = \text{const};$$

$$B \leq B_{\text{зад}}.$$

Последний принцип управления бурением взрывных скважин на карьерах применяют, если не достигаются экстремальные значения параметров v или C_6 .

1.1.4. Системы автоматизации процесса бурения карьерных шарошечных станков

К САУ бурением предъявляются следующие требования:

- Оптимизация процесса бурения с использованием не менее двух контуров регулирования;
- Автоматическая защита:
 - от стопорения бурового става;
 - забучивания скважины;
 - чрезмерных вибраций бурового става;
- Автоматическое программно-логическое управление вспомогательными операциями (перехватом, наращиванием и разборкой бурового става);
- Автоматический контроль технического состояния и поиск неисправностей (диагностика).

Кинематическая схема карьерного бурового станка ЗСБШ-200 представлена на рис. 1.3.

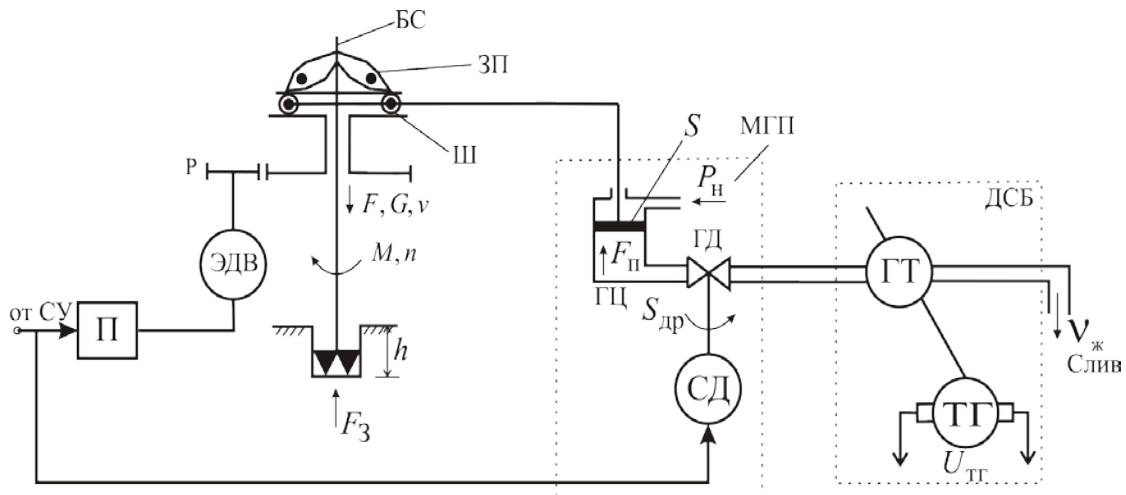


Рис. 1.3. Кинематическая схема станка 3СБШ-200

Элементы схемы:

П – силовой преобразователь;

ЭДВ – электродвигатель вращения;

Р – редуктор;

БС – буровой став;

Ш – шпиндель;

ЗП – зажимной патрон;

ГЦ – гидроцилиндр подачи;

ГД – гидродроссель;

СД – серводвигатель;

ГТ – гидротурбина;

ТГ – тахогенератор;

ДСБ – датчик скорости бурения;

МГП – механизм гидроподачи.

Параметры системы:

F – усилие подачи (осевая нагрузка на долото);

G – вес поступательно движущихся частей става;

v – скорость бурения (скорость подачи);

F_3 – реакция забоя;

P_H – давление в напорной магистрали;

F_{II} – усилие противодействия, создаваемое в гидроцилиндре;

h – глубина бурения;

$S_{др}$ – сечение проходного окна ГД;

$v_{\text{ж}}$ – скорость истечения жидкости;

$U_{\text{ТГ}}$ – напряжение тахогенератора;

S – сечение поршня;

M – момент вращения бурового става;

n – частота вращения бурового става.

В динамике движение бурового става может быть описано выражением

$$\frac{G}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} = F - F_3. \quad (1.8)$$

В статике работа МГП описывается уравнениями:

$$F = F_{\text{max}} - F_{\text{П}}; \quad (1.9)$$

$$F_{\text{max}} = P_{\text{Н}} \cdot S + G; \quad (1.10)$$

$$F_{\text{П}} = K_{\text{П}} \cdot \frac{v^2}{S_{\text{др}}^2}; \quad (1.11)$$

$$F = F_{\text{max}} - K_{\text{П}} \cdot \frac{v^2}{S_{\text{др}}^2}, \quad (1.12)$$

где $K_{\text{П}}$ – коэффициент пропорциональности.

Статические характеристики МГП представлены на рис. 1.4.

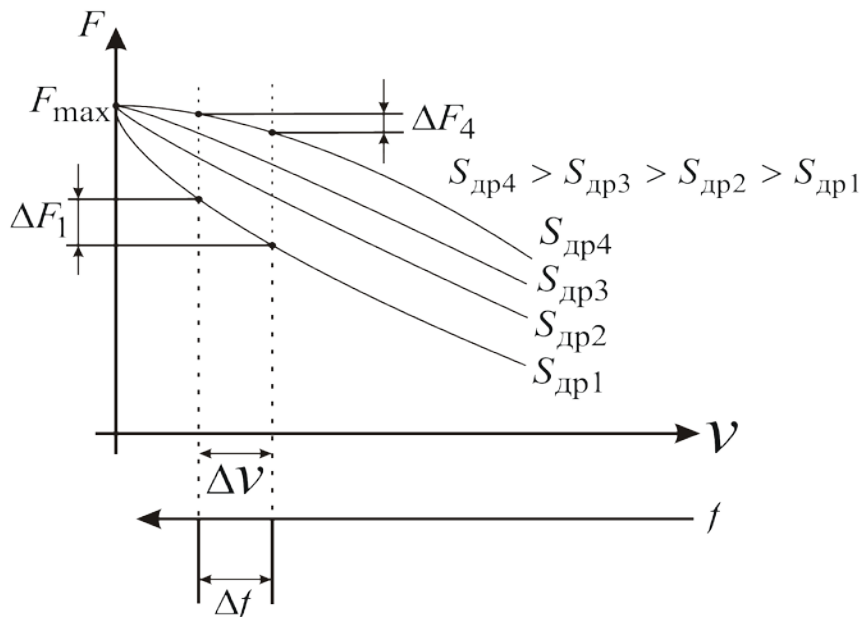


Рис. 1.4. Статические характеристики МГП

Выводы:

1. МГП обладает саморегулированием: с ростом крепости буримых пород возрастает усилие подачи.

2. Эффективность саморегулирования возрастает с уменьшением сечения $S_{др}$ ($\Delta F_1 \gg \Delta F_4$).

Далее рассматриваются структуры и функции САУ бурением шарошечных станков.

Система «Режим 2НМ»

Функции системы:

- Автоматическое регулирование режимных параметров по критерию $C_6 \rightarrow \min$ (оптимальное управление бурением).

В процессе бурения оптимальные значения режимных параметров $F_{опт}$, $n_{опт}$ определяются в функции скорости в соответствии с выражениями (1.6) и (1.7);

- Автоматическое ограничение параметров (защита) вибраций B , нагрузки (тока) I , электродвигателя вращателя и давления P в системе продувки скважины.

Функциональная структурная схема САУ бурением «Режим 2НМ» представлена на рис. 1.5.

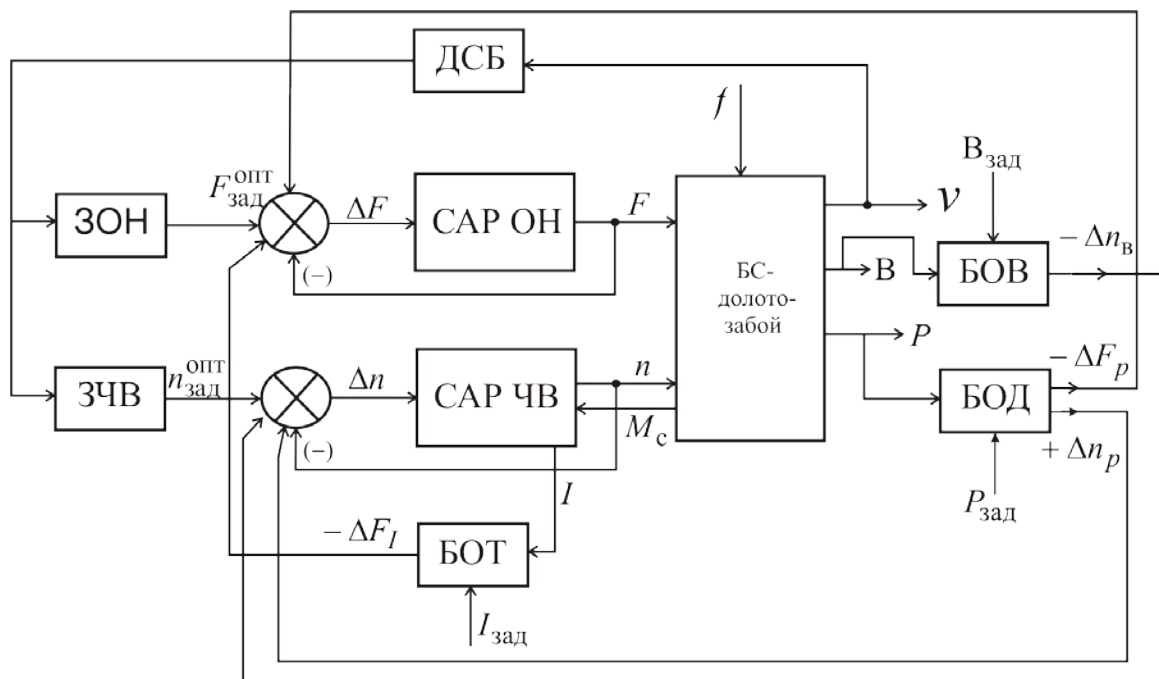


Рис. 1.5. Структурная схема САУ бурением «Режим 2НМ»

Система состоит из следующих элементов:

ЗОН, ЗЧВ – задатчики оптимального значения соответственно усилия подачи (осевой нагрузки) и частоты вращения бурового става;

ДСБ – датчик скорости бурения (ГТ – ТГ);

САР ОН – система автоматического регулирования осевой нагрузки, содержащая ПИ-регулятор, МГП и датчик осевой нагрузки;

САР ЧВ – система автоматического регулирования частоты вращения, содержащая ПИ-регулятор, электропривод вращателя и датчик частоты вращения;

БОТ – блок ограничения тока электропривода вращателя для защиты от стопорения бурового става, включающий в свой состав датчик тока, управляющий элемент (УЭ) и выходной элемент (ВЭ);

БОВ – блок ограничения вибрации бурового става, содержащий датчик вибрации – УЭ – ВЭ;

БОД – блок ограничения давления воздуха в пневматической системе очистки скважины (реле давления).

Параметры системы:

P – давление воздуха в пневмосистеме очистки скважины;

I – ток электродвигателя вращателя;

$\Delta F_P, \Delta F_I$ – сигналы коррекции задания осевой нагрузки на долото соответственно по давлению в пневмосистеме и току электродвигателя вращателя;

$\Delta n_B, \Delta n_P$ – сигналы коррекции заданной частоты вращения бурового става соответственно по вибрации (виброскорости) и давлению.

Возможные статические характеристики блоков ограничения параметров системы показаны на рис. 1.6.

Сигнал коррекции равен:

$$y = 0 \text{ при } x < x_{\text{зад}};$$

$$y = y_{\text{max}} \text{ при } x \geq x_{\text{зад}}.$$

Сигнал коррекции равен:

$$y = 0 \text{ при } x \leq x_{\text{зад}};$$

$$y = K_y(x - x_{\text{зад}});$$

$$\text{при } x_{\text{зад}} < x < x_{\text{П}};$$

$$y = y_{\text{max}} \text{ при } x \geq x_{\text{П}}.$$

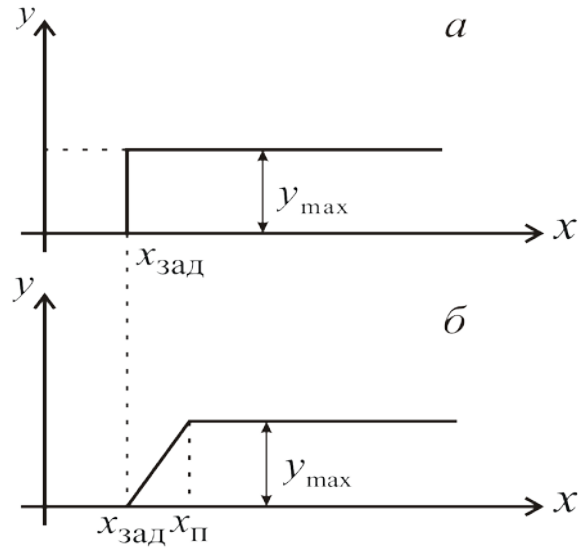


Рис. 1.6. Статические характеристики ступенчатой (а) и пропорциональной (б) коррекции сигналов задания

Статические характеристики задатчиков осевой нагрузки и частоты вращения при управлении по критерию $S_6 \rightarrow \min$ представлены на рис. 1.7.

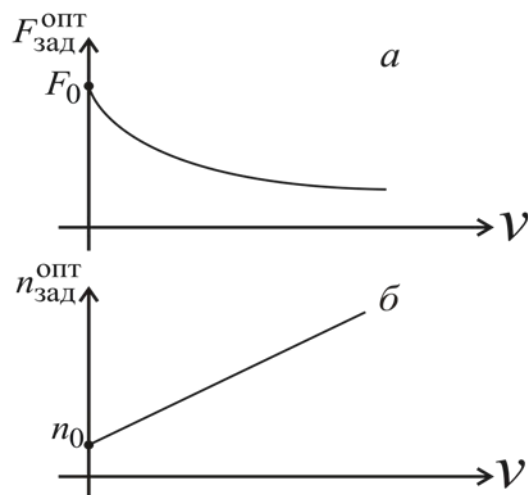


Рис. 1.7. Статические характеристики задатчиков осевой нагрузки (а) и частоты вращения (б)

Настройка системы на оптимальный режим бурения осуществляется в следующем порядке:

1. Записать в ЗОН и ЗЧВ оптимальные зависимости $F_{\text{зад}}^{\text{опт}}(v)$ и $n_{\text{зад}}^{\text{опт}}(v)$, найденные экспериментальным бурением для данного станка на данном месторождении.

2. При переходе на другое месторождение, другой станок изменить записи в ЗОН и ЗЧВ в соответствии с новыми оптимальными заданиями.

Основным недостатком системы «Режим 2НМ» является невозможность оперативной перестройки системы на оптимальный режим при изменении условий бурения.

Система «Режим СВ»

Достоинством системы «Режим СВ» является возможность оперативной настройки в процессе бурения на оптимальный режим. В качестве управляемых параметров в системе используют:

- Углубления на 1 оборот долота

$$Z = \frac{v}{n}; \quad (1.13)$$

- Показатель режима бурения

$$K = F \cdot n; \quad (1.14)$$

- Критерий эффективности процесса бурения:

$$\Theta = \frac{N_{\text{подачи}}}{N_{\text{вращателя}}} = \frac{F \cdot v}{M \cdot n} = \frac{F}{M} \cdot Z, \quad (1.15)$$

где N – мощность привода.

Структурная схема системы «Режима СВ» для станка ЗСБШ-200Н представлена на рис. 1.8.

Элементы схемы:

D_M, D_v, D_n, D_F, D_B – датчики момента, скорости бурения, частоты вращения бурового става, усилия подачи и вибрации бурового става соответственно;

БОВ, БОМ – блоки автоматического ограничения момента и вибраций, формирующие сигналы коррекции заданий ΔK_M и ΔZ_B соответственно;

МДУ – множително-делительное устройство (вычислитель);

Z_K, Z_Z – задатчики параметров K и Z ;

P_K, P_Z – ПИ-регуляторы K и Z ;

ГПП – гидропривод подачи;

ЭПВ – электропривод вращения бурового става;

«БС – долото – забой» – объект управления.

Параметры системы:

$K_{\text{зад}}, Z_{\text{зад}}$ – заданные машинистом значения показателя режима бурения и углубления долота;

U_{PK}, U_{PZ} – выходные сигналы регуляторов параметров K и Z ;

f – крепость буримых пород.

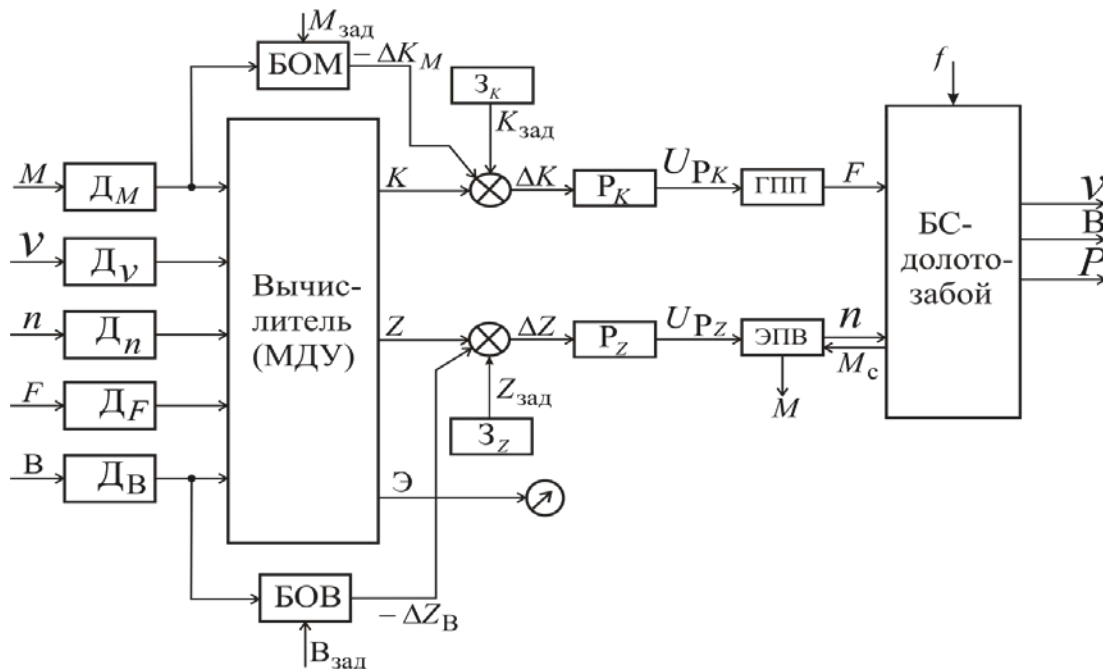


Рис. 1.8. Структурная схема системы «Режима СВ» для станка ЗСБШ-200Н

Настройка системы на оптимальный режим бурения осуществляется в следующем порядке:

1. Установить с помощью задатчиков Z_K, Z_Z средние значения заданий: $Z_{\text{зад}} = Z_{\text{ср}}, K_{\text{зад}} = K_{\text{ср}}$.
2. Включить систему.
3. Изменяя $Z_{\text{зад}}$, найти по прибору локальный максимум $\mathcal{E}_{\text{лmax1}}^z$.
4. Изменяя $K_{\text{зад}}$, найти локальный максимум $\mathcal{E}_{\text{лmax2}}^k$.
5. Повторяя процедуры по пп. 3, 4, найти абсолютный максимум $\mathcal{E}_{\text{абсmax}}$, которому будут соответствовать оптимальные значения $Z_{\text{зад}} = Z_{\text{опт}}, K_{\text{зад}} = K_{\text{опт}}$.
6. При резком изменении показателя $\mathcal{E}$ в процессе бурения, повторить пп. 3, 4 и найти новое максимальное значение $\mathcal{E}_{\text{абсmax}}$.

Микропроцессорная система управления карьерным буровым станком на примере станка СБШ 250/270-15

Микропроцессорная система управления карьерным буровым станком представлена на рис. 1.9.

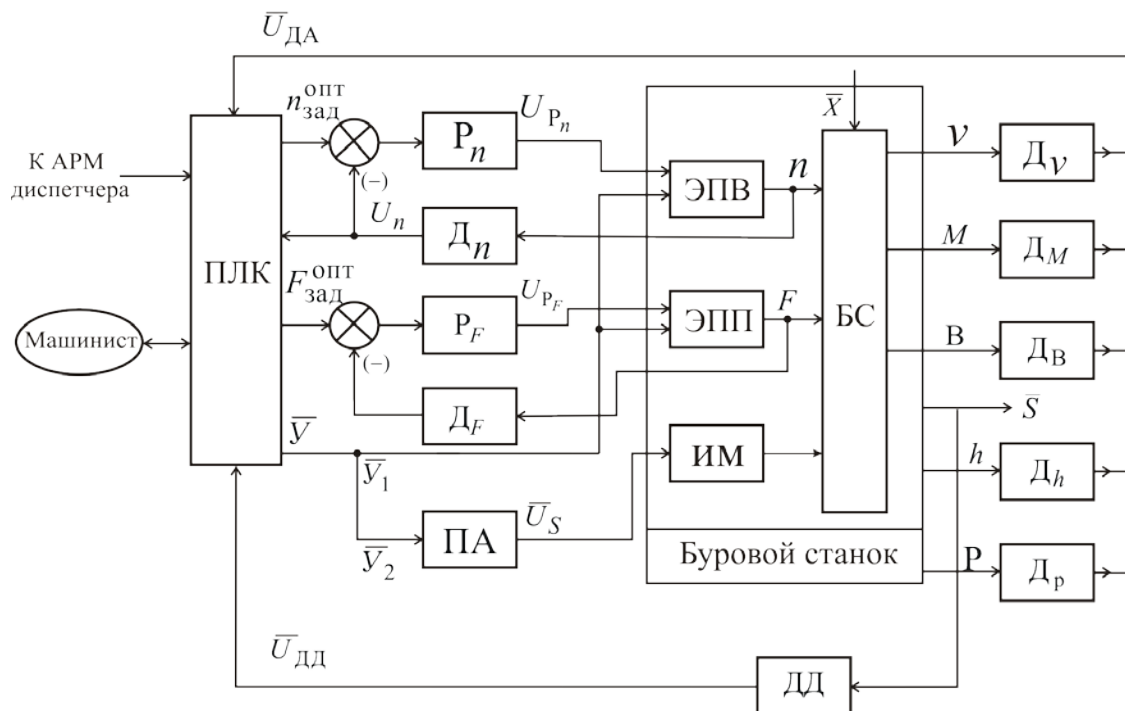


Рис. 1.9. Микропроцессорная СУ карьерным буровым станком

Система является программно-аппаратной, двухуровневой.

Первый уровень управления включает в себя автоматические регуляторы, пусковую аппаратуру и датчики и реализуется аппаратным способом.

Второй уровень управления выполнен на базе программируемого логического контроллера.

На схеме обозначено:

ПЛК – программируемый логический контроллер, в качестве которого рекомендуется использовать систему автоматизации *Simatic C7*, Ф. *Siemens*;

P_n, P_F – ПИ-регуляторы аналоговые;

$D_h, D_B, D_v, D_M, D_p, D_n, D_F$ – аналоговые датчики глубины скважины, вибрации, скорости бурения, момента двигателя вращателя, давления в пневмосистеме очистки скважин, частоты вращателя долота, усилия подачи (осевой нагрузки) соответственно;

ДД – дискретные датчики состояния и/или положения $\bar{S}$ механизмов станка;

$\bar{U}_{ДД}$ – вектор сигналов дискретных датчиков;

$\bar{U}_{ДА}$ – вектор сигнала аналоговых датчиков;

$\bar{X}$ – вектор возмущающих воздействий;

ПА – пусковая аппаратура (реле, контакторы, пускатели) для управления исполнительными механизмами станка (электроприводами вентиляторов обдува электродвигателей, компрессоров, гусениц и маслонасосов, гидроприводами горизонтирования станка, подъема мачты, наращивания и разборки бурового става и сепаратора);

ЭПВ, ЭПП – главные электроприводы станка вращателя и подачи;

БС – буровой став;

ИМ – исполнительные механизмы станка.

ПЛК выполняет в системе следующие функции:

- Формирование оптимальных заданий $F_{зад}^{опт}$ и $n_{зад}^{опт}$ в соответствии с приятным критерием оптимизации;

- Логическое управление главными электроприводами и ИМ с формированием следующих дискретных сигналов:

$\bar{Y}_1$ – вектор дискретных сигналов управления главными электроприводами (включить питание силовых преобразователей, осуществить реверс и т.п.);

$\bar{Y}_2$ – вектор дискретных сигналов управления ИМ;

- Обмен информацией с компьютером диспетчера. К диспетчеру направляется информация о количестве пробуренных метров и состоянии станка. От диспетчера поступает задание критерия оптимального управления;

- Визуализация (графики h, F, n параметров работы станка, мнемосхема – состояние механизмов станка).

Функции машиниста станка:

- Формирование команд управления станком:
 - включить питание;
 - переезд на новую скважину;
 - начать бурение;
 - экстренный останов при аварийных ситуациях и др.;
- Задание уставок защиты, а также критерия оптимального управления бурением;
- Контроль за работой станка (при необходимости ручное управление);
- Ввод информации о причинах простоя для передачи диспетчеру.

1.2. Автоматизация процессов экскавации

1.2.1. Основные направления автоматизации карьерных экскаваторов

В качестве основных направлений автоматизации одноковшовых карьерных экскаваторов следует отметить следующие:

- Совершенствование систем автоматизированного электропривода;
- Автоматическая защита рабочих механизмов от аварийных режимов;

- Автоматизация отдельных операций цикла: копания, транспортных операций;
- Создание АСУ экскаватором, обеспечивающей:
 - программно-логическое управление циклом экскавации с автоматическим регулированием параметров технологических операций цикла;
 - автоматический контроль загрузки транспортных средств;
 - технологический контроль и учет работы экскаватора (количество экскавируемой горной массы, расход электроэнергии, время и причины простоев, текущие параметры цикла и др.);
 - технический контроль (диагностика) состояния рабочих механизмов и системы управления экскаватором.

1.2.2. Автоматическое управление процессом копания мехлопаты с неповоротным ковшом

Технологическая схема процесса копания экскаватором с неповоротным ковшом представлена на рис. 1.10.

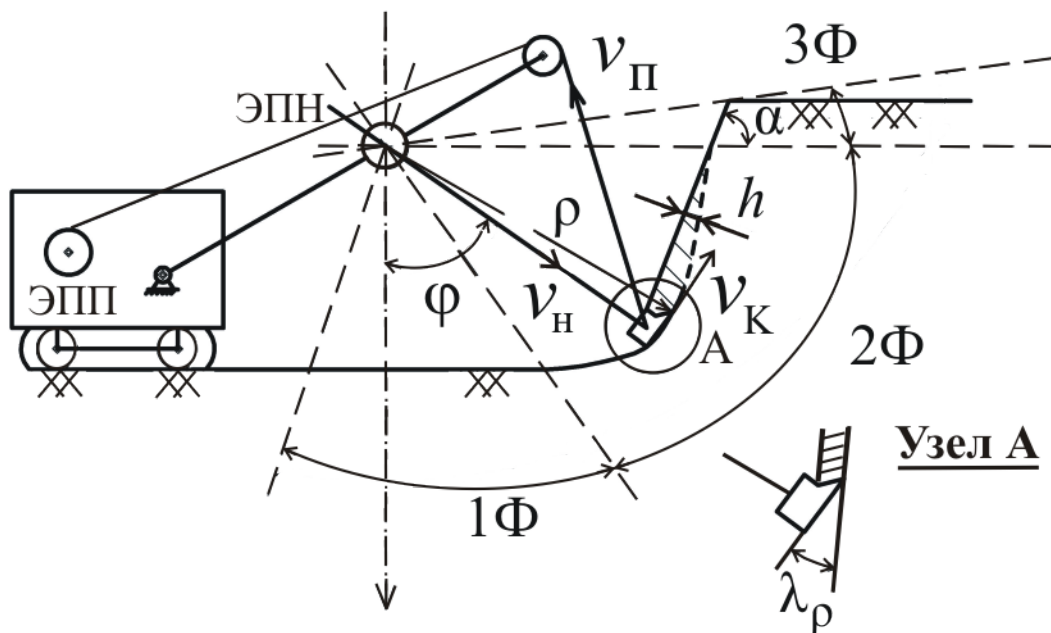


Рис. 1.10. Технологическая схема процесса копания

На схеме обозначено:

- ЭПП, ЭПН – электроприводы механизмов подъема и напора;
 φ – угол поворота рукоятки в вертикальной плоскости;

ρ – выдвижение рукояти;
 α – угол откоса забоя;
 λ_ρ – кинематический угол резания;
 v_H, v_Π – скорости напора и подъема;
 h – толщина стружки;
 v_K – абсолютная скорость движения ковша,

$$\bar{v}_K = \bar{v}_H + \bar{v}_\Pi;$$

1Ф – первая фаза копания: планирование подошвы забоя. В этой фазе система управления должна обеспечить движение ковша по горизонтали ($\alpha = 0$);

2Ф – фаза собственно копания, в которой требуется стабилизировать мощность привода подъема $N_\Pi = N_{\Pi\text{зад}} = \text{const}$ и ограничить угол резания $\lambda_\rho \geq \lambda_{\rho\text{min}}$ не ниже некоторого минимального значения;

3Ф – фаза обработки верхней части забоя, в которой требуется исключить появление нависающих козырьков в забое путем обеспечения движения ковша по прямой линии под углом α относительно горизонтали.

Автоматическое управление наиболее трудоемкой операцией цикла экскавации копанием (черпанием) обеспечивает:

- сокращение длительности операции копания и, как следствие, сокращение длительности цикла и рост производительности экскаватора на 5–10 %;
- сокращение затрат электроэнергии за счет оптимизации угла резания, автоматического обхода препятствий и быстрого вторичного заглубления ковша;
- повышение безопасности ведения горных работ.

Ниже рассмотрены принципы управления копанием мехлопатой с неповоротным ковшом для различных фаз.

Управление копанием в фазе 1 может быть осуществлено путем управления выдвижением рукояти в функции угла ее поворота. На рис. 1.11 показан принцип управления выдвижением рукояти.

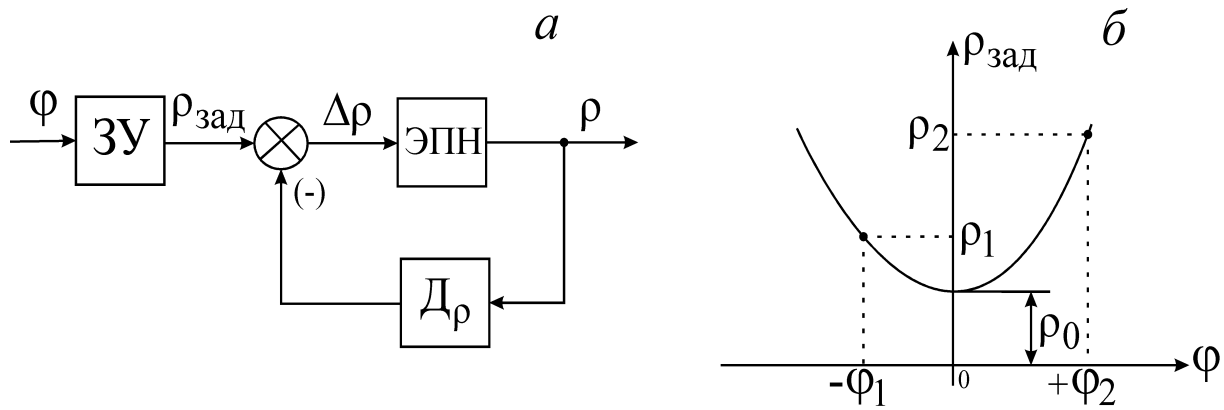


Рис. 1.11. Структурная схема (а) и характеристика задающего устройства (б) системы управления копанием в фазе 1:
ЗУ – задающее устройство; D_p – датчик выдвижения рукояти;
 ρ_0 – выдвижение рукояти в вертикальном положении (при $\varphi = 0$)

Характеристика ЗУ $\rho_{\text{зад}} = f(\varphi)$ строится по результатам графических определений ρ для разных значений φ при условии движения ковша в нижней части забоя по горизонтали ($\alpha = 0$).

Управление копанием в фазе 2 может быть осуществлено на принципе стабилизации нагрузки привода подъема путем изменения скорости напора при постоянной скорости подъема:

$$N_{\Pi} = N_{\Pi\text{зад}} = \text{const};$$

$$v_H = f(\Delta N_{\Pi});$$

$$v_{\Pi} = v_{\Pi\text{зад}} = \text{const} \text{ (как правило, } v_{\Pi\text{зад}} = v_{\Pi\text{max}} \text{)};$$

$$\Delta N_{\Pi} = N_{\Pi} - N_{\Pi\text{зад}}.$$

САУ копанием для экскаваторов ЭКГ-15/ЭКГ-10 (для фазы 2) представлена на рис. 1.12.

Статическая характеристика управляющего устройства системы представлена на рис. 1.13. При $v_{\Pi} = \text{const}$ в качестве нагрузки привода подъема может быть принят его ток, так как в этом случае его значение пропорционально мощности.

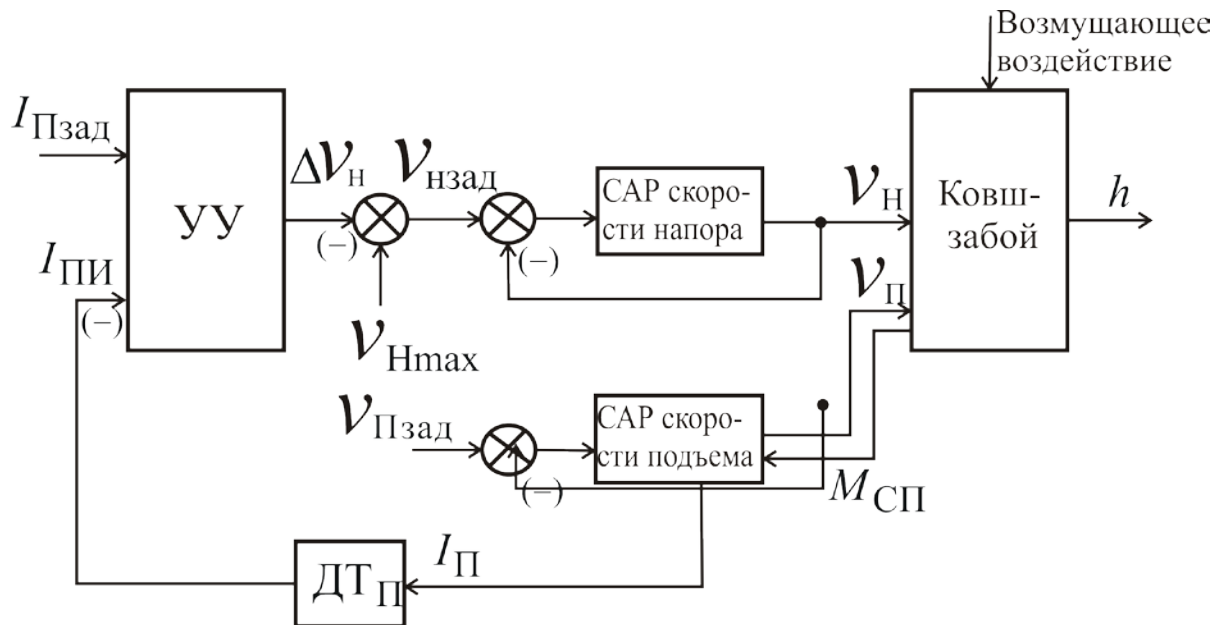


Рис. 1.12. Структурная схема САУ копанием экскаваторов-мехлопат: УУ – управляющее устройство; ДТ_П – датчик тока электродвигателя подъема; $I_{Пзад}$, $I_{ПИ}$, $I_{П}$ – ток двигателя подъема заданный, измеренный и фактический соответственно; $M_{СП}$ – момент статический на валу ЭПП

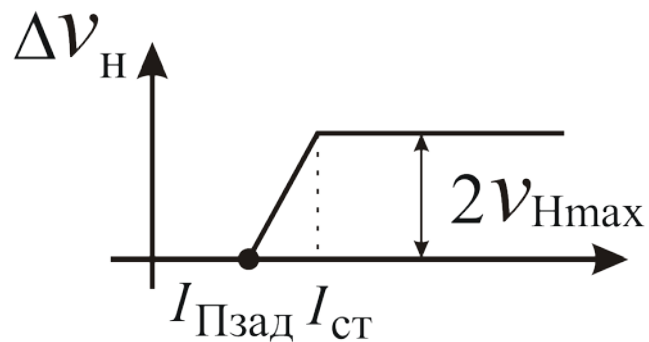


Рис. 1.13. Статическая характеристика управляющего устройства

Заданный ток электродвигателя подъема принимается равным 90 % от тока отсечки: $I_{\text{Пзад}} = 0,9I_{\text{Потс}}$.

Статическая характеристика САУ копанием показана на рис. 1.14.

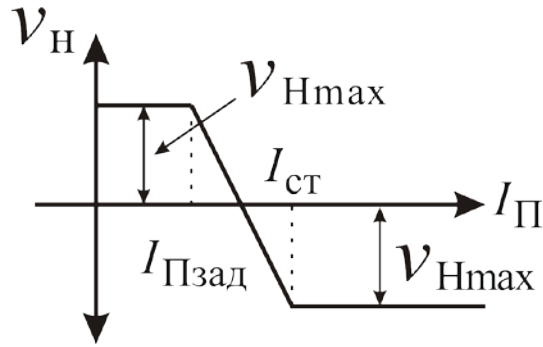


Рис. 1.14. Статическая характеристика САУ копанием мехлопаты в фазе 2: $I_{ст}$ – стопорный ток электродвигателя подъема

Процесс работы системы (см. рис. 1.13, 1.14) можно описать следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} I_{П} &\approx I_{Пзад} = \text{const}, \\ \Delta v_H &= 0 \text{ при } I_{П} \leq I_{Пзад}, \\ \Delta v_H &= K_I (I_{П} - I_{Пзад}) \text{ при } I_{Пзад} < I_{П} < I_{ст}, \\ \Delta v_H &= 2v_{H\text{max}} \text{ при } I_{П} \geq I_{ст}, \\ v_{Пзад} &= v_{П\text{max}}, \\ v_{Hзад} &= v_{H\text{max}} - \Delta v_H. \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

Недостатком этой системы является образование ям в нижней части забоя и нависающих козырьков в верхней части забоя, на устранение которых требуются дополнительные горные работы.

1.2.3. САУ копанием механической лопатой с поворотным ковшем

Достоинством экскаватора с поворотным ковшем является возможность управления движением ковша по линейным траекториям.

Благодаря этому обеспечивается:

- Селективная выемка наклонных и крутопадающих пластов и, как следствие, повышение качества вынимаемого угля;
- Возможность копания с оптимальным углом резания;

- Работа в нижней части забоя без образования ям;
- Отсутствие нависающих козырьков;
- Полная (без налипания) разгрузка ковша вследствие возможности его установки в горизонтальное положение.

Технологическая схема процесса копания экскаватором с поворотным ковшом представлена на рис. 1.15. Ковш оснащен гидроприводом ГПК.

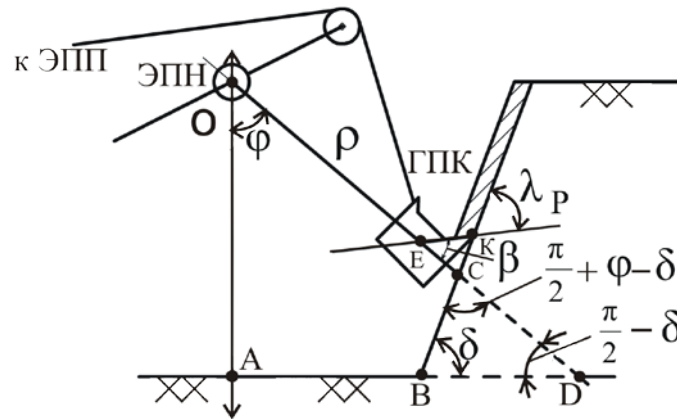


Рис. 1.15. Технологическая схема копания: δ – угол наклона траектории движения ковша (угол наклона пласта);
 β – угол поворота ковша относительно рукояти;
 λ_p – кинематический угол резания

На рис. 1.16 представлен треугольник ЕКС, из которого можно получить зависимости угла поворота ковша от угла поворота рукояти в вертикальной плоскости $\beta = f_1(\varphi)$ и скорости напора от угла и скорости поворота рукояти и ее выдвижения $v_H = f_2(\varphi, \dot{\varphi}, \rho)$.

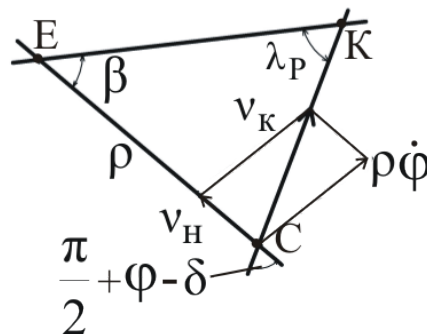


Рис. 1.16. Треугольник ЕКС для определения зависимостей $\beta = f_1(\varphi)$, $v_H = f_2(\varphi, \dot{\varphi}, \rho)$

Скорость движения ковша определяется как сумма векторов

$$\overline{v_K} = \rho \overline{\dot{\varphi}} + \overline{v_H}, \quad (1.17)$$

где $\dot{\varphi} = \frac{\partial \varphi}{\partial t}$ – угловая скорость поворота рукояти.

Из анализа углов и скоростей (см. рис. 1.16) можно записать для системы управления копанием заданные значения скорости напора и угла поворота ковша в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} v_{H\text{зад}} &= \rho \dot{\varphi} \operatorname{ctg} \left[\frac{\pi}{2} + (\varphi - \delta) \right] = -\rho \dot{\varphi} \operatorname{tg}(\varphi - \delta), \\ \beta_{\text{зад}} &= \frac{\pi}{2} - \varphi + \delta - \lambda_P. \end{aligned} \right\} \quad (1.18)$$

Структурная схема САУ копанием мехлопаты с поворотным ковшом представлена на рис. 1.17.

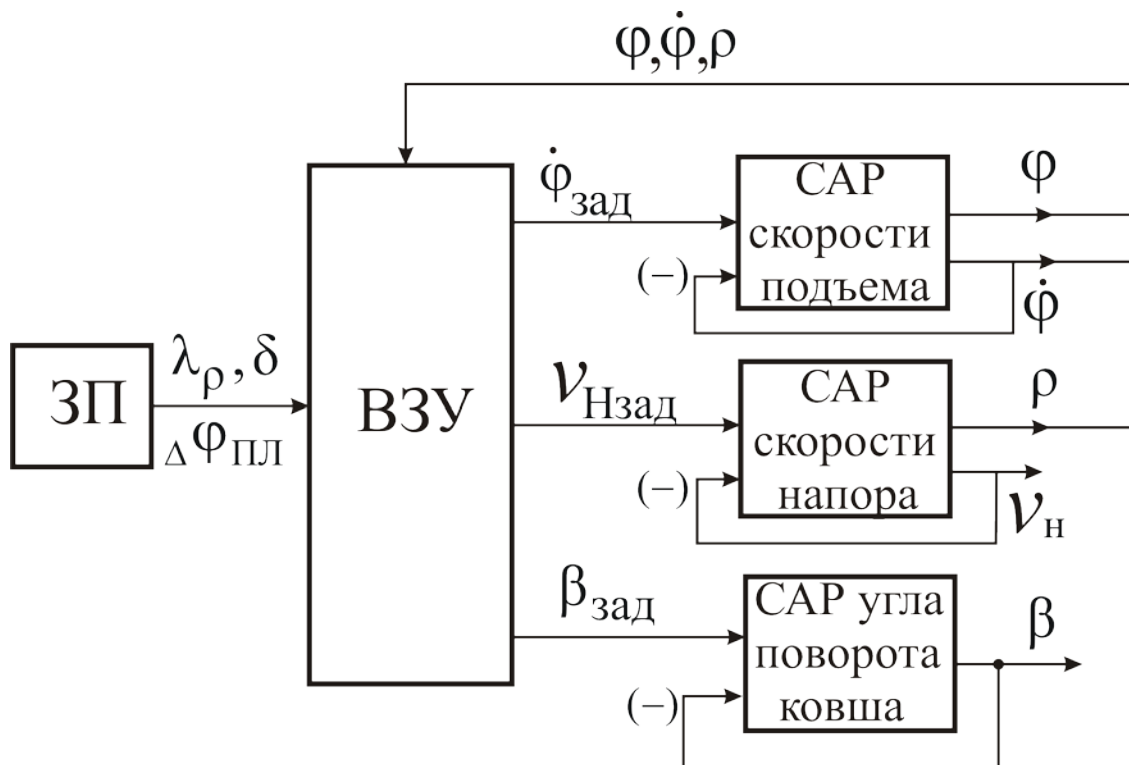


Рис. 1.17. Структурная схема САУ копанием мехлопаты с поворотным ковшом: ЗП – задатчик параметров копания; ВЗУ – вычислительное и задающее устройство; $\Delta\varphi_{\text{ПЛ}}$ – угол поворота рукоятки при планировании нижней части забоя

На рис. 1.18 показан процесс заглубления ковша при планировании подошвы забоя таким образом, что поворот рукоятки на угол $\Delta\varphi_{\text{ПЛ}}$ задает толщину стружки h для заполнения ковша за один проход.

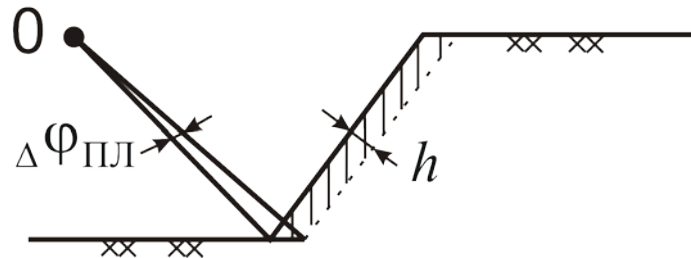


Рис. 1.18. Угол поворота рукоятки при планировании

ВЗУ вычисляет задания для САР скорости напора и САР угла поворота ковша $v_{\text{Нзад}}, \beta_{\text{зад}}$ по уравнениям (1.18).

Заданная скорость подъема принимается максимальной

$$\dot{\varphi}_{\text{зад}} = \dot{\varphi}_{\text{зад}}^{\text{max}}.$$

Для технической реализации системы необходимы следующие датчики:

- угловых перемещений φ и β ;
- выдвижения рукоятки ρ ;
- угловой скорости $\dot{\varphi}$ и скорости выдвижения рукоятки $V_{\text{Н}}$.

1.2.4. Компьютерная система управления процессом экскавации мехлопаты

Автоматизация карьерных экскаваторов циклического действия позволяет исключить либо ограничить влияние человеческого фактора на эффективность их функционирования. Неквалифицированное управление, ограничение видимости ночью и при неблагоприятных погодных условиях, снижение рабочих скоростей механизмов при работе в дальних забоях, утомляемость машинистов существенно снижают производительность одноковшовых экскаваторов. В результате неоптимального

управления машинистом процессом копания (наполнением ковша горной массой) возникает повышенный расход электроэнергии.

Современные компьютерные информационные технологии с применением микропроцессорной техники позволяют создать надежную и эффективную автоматизированную систему управления процессом экскавации одноковшового карьерного экскаватора. Логика управления таким экскаватором очень сложна, а количество необходимой информации велико. Все это приводит к целесообразности использования иерархической структуры системы с двумя уровнями управления. Верхний уровень – это автоматизированное рабочее место машиниста экскаватора. Управляющий компьютер решает задачи координации работы приводов рабочих механизмов экскаватора, оптимизации и визуализации процесса экскавации. Нижний уровень управления представляет собой группу микропроцессорных контроллеров, сопряженных с управляющим компьютером, формирующих и реализующих совместно с электроприводами программы управления движением рабочих механизмов экскаватора – подъема, напора и поворота. Выбор и контроль выполнения программы отработки блока забоя с одной стоянки экскаватора и корректировку при необходимости траекторий движения рабочих механизмов путем прямого воздействия на командоконтроллеры приводов осуществляет машинист экскаватора. После отработки блока забоя машинист также управляет перемещением экскаватора на новую стоянку и установкой ковша в точку начала автоматической отработки очередного блока забоя, имеющего определенные геометрические параметры – высоту, ширину и глубину.

Рассмотрим принципы построения компьютерной системы управления экскаватором-мехлопатой, осуществляющей отработку забоя снизу вверх и погрузку горной массы в автосамосвал. Рабочий процесс циклический. Каждый цикл экскавации состоит из четырех основных последовательно выполняемых операций: копания (наполнения ковша), перемещения груженого ковша к месту разгрузки, разгрузки ковша в автосамосвал и перемещения порожнего ковша в забой – в точку начала очередного копания.

Наиболее сложной задачей является управление операцией копания. Оптимизация управления процессом копания включает в себя:

- Достаточно хорошую планировку плоскости подошвы забоя. Это достигается обеспечением движения зубьев ковша по горизонтали в начальной части процесса копания путем регулирования скорости напора в функции отклонения выдвижения рукоятки от заданного значения;
- Полное использование мощности привода подъема, что позволяет обеспечить минимальное время копания. Это достигается управлением копанием после планирования подошвы забоя по принципу стабилизации тока двигателя подъема при максимальной скорости подъема ковша;
- Быстрое вторичное заглубление ковша после обхода им скального включения. Это может быть обеспечено ступенчатым снижением скорости подъема в период относительно малой нагрузки двигателя подъема. Такое управление сокращает длительность и энергозатраты на копание;
- Оптимальный угол резания, обеспечивающий наилучшие энергетические показатели процесса копания. Это может быть достигнуто обеспечением движения ковша по определенной траектории с наименьшей энергоемкостью процесса резания.

Основной задачей оптимизации транспортирования ковша (переноса ковша на разгрузку, возврата его в забой) является синхронизация работы механизмов подъема, тяги и поворота для получения минимальной длительности операций переноса и ограничения динамических нагрузок.

В общем случае компьютерная система управления мехлопатой должна обеспечить выполнение следующих основных функций:

- Автоматическое управление циклами экскавации в течение отработки заранее определенного блока забоя с одной стоянки экскаватора;
- Оптимизацию управления операциями копания и транспортирования ковша с целью сокращения длительности цикла работы экскаватора, снижения динамических нагрузок, а также экономии электроэнергии;

- Автоматическое управление механическими тормозами приводов подъема, напора и поворота и звуковым сигналом (сиреной);
- Ручное управление процессом экскавации машинистом при помощи командоконтроллеров электроприводов рабочих механизмов экскаватора;
 - Автоматический контроль параметров и ситуаций в забое:
 - координат ковша в пространстве забоя $\varphi_{\text{П}}, \rho_{\text{Н}}, \alpha_{\text{В}}$ угла поворота (подъема) рукояти в вертикальной плоскости, выдвижения рукояти и угла поворота платформы экскаватора соответственно;
 - весовой загрузки ковша G и автосамосвала ΣG ;
 - крена экскаватора – продольного γ и поперечного Θ ;
 - конечных положений рукояти по углу подъема $\varphi_{\text{П max}}$ и выдвижению $\rho_{\text{Н min}}, \rho_{\text{Н max}}$;
 - токов электродвигателей $I_{\text{П}}, I_{\text{Н}}, I_{\text{В}}$ и скоростей движения $\omega_{\text{П}}, v_{\text{Н}}, \omega_{\text{В}}$ приводов, подъема, напора и поворота соответственно;
 - количества циклов и отгруженной горной массы с учетом от начала текущей смены;
 - появления характерных ситуаций (рабочих сцен) S в забое:
 - а) наличие автосамосвала в точке разгрузки;
 - б) появление ковша в точках разгрузки в автосамосвал и начала копания в забое;
 - в) образование опасных нависей (козырьков) в забое, угрожающих обрушением и сползанием уступа;
 - Автоматическую защиту (прекращение процесса экскавации):
 - при превышении длительности любой операции цикла допустимого значения;
 - чрезмерной загрузке автосамосвала;
 - переподъеме ковша;
 - недопустимом выдвижении рукояти;
 - срабатывании электрозащиты любого из главных электроприводов;

- Автоматическую блокировку (запрет процесса экскавации):
 - при появлении опасных нависей в забое;
 - отсутствии автосамосвала в точке разгрузки ковша;
 - возникновении предельного крена экскаватора;
- Автоматическую сигнализацию:
 - звуковую о начале цикла (предупредительная) и возникновении предаварийной ситуации;
 - световую о режиме управления («Автомат.», «Руч.»);
- Визуализацию (отображение информации на экране компьютера):
 - выполняемой операции и положения ковша в пространстве забоя (мнемосхема процесса экскавации);
 - весовой загрузки автосамосвала, количества отгруженной горной массы и числа циклов (цифровая индикация);
 - причин срабатывания защит и автоблокировок (световое табло на экране).

Структура компьютерной системы управления работой мехлопаты, обеспечивающей выполнение вышеперечисленных функций, приведена на рис. 1.19.

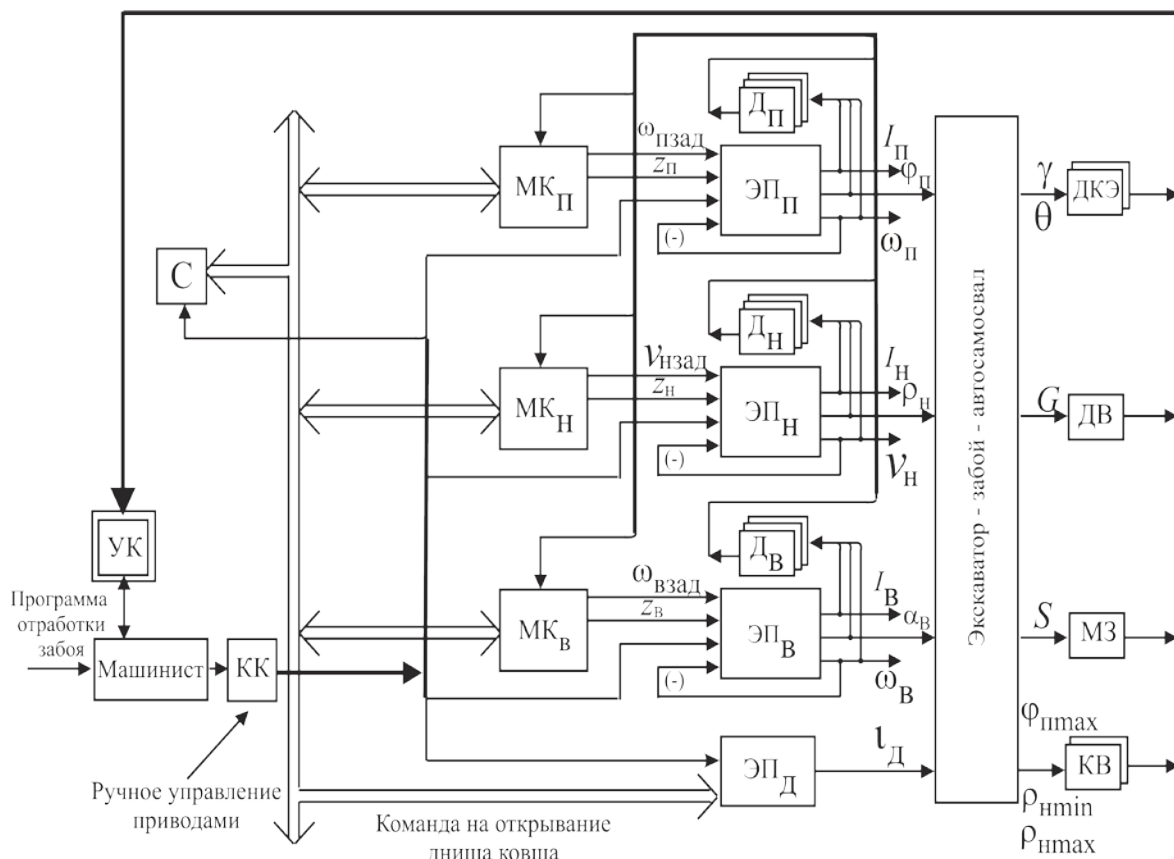


Рис. 1.19. Структурная схема компьютерной системы управления процессом экскавации мехлопаты

На схеме приняты следующие обозначения:

УК – управляющий персональный или промышленный компьютер;

С – сирена (звуковой сигнал);

КК – командоконтроллеры ручного управления электроприводами экскаватора;

МК_П, МК_Н, МК_В – микропроцессорные контроллеры электроприводов подъема, напора и вращения соответственно;

ЭП_П, ЭП_Н, ЭП_В – электроприводы подъема, напора и вращения, содержащие каждый из них САР скорости и тока, механический тормоз и схему управления соответственно;

Д_П, Д_Н, Д_В – датчики тока, скорости и перемещения приводов подъема, напора и вращения соответственно;

ДКЭ – датчики крена экскаватора;

ДВ – датчик веса горной массы в ковше;

МЗ – машинное зрение, обнаруживающее появление в забое характерных ситуаций;

КВ – конечные выключатели, срабатывающие при предельном положении рукояти по углу подъема и выдвижению;

ЭП_Д – электропривод открывания днища ковша.

Микропроцессорные контроллеры главных электроприводов выполняют функции программных задатчиков скорости движения $\omega_{Пзад}$, $v_{Нзад}$, $\omega_{Взад}$ соответствующих рабочих механизмов (формирование заданных значений скорости для каждой операции цикла и управления заданием при выполнении функций защиты и блокировки) и формирователей дискретных сигналов $Z_{П}$, $Z_{Н}$, $Z_{В}$ управления соответствующими тормозами, возбуждением двигателей и элементами световой сигнализации, а также осуществляют обмен информацией с управляющим компьютером.

Основные функции управляющего компьютера:

- Хранение программ отработки блока для различных забоев. Каждая такая программа содержит: а) последовательность координат начальных точек копания и координаты точки разгрузки

ковша, определяемых на основании параметров ведения горных работ в забоях; б) последовательность команд включения и останова электроприводов экскаватора в текущем цикле экскавации;

- Управление последовательностью операций в цикле;
- Управление звуковым сигналом;
- Защита и блокировка процесса экскавации;
- Вычисление длительности и величин установившихся скоростей движения приводов для операций переноса ковша, передаваемых микропроцессорным контроллером для формирования программ изменения скоростей движения рабочих механизмов;
- Определение текущих значений количества совершенных циклов экскавации и количества отгруженной горной массы;
- Визуализация информации о ходе процесса экскавации, состоянии экскаватора и забоя;
- Документирование истории процесса управления.

Алгоритм управления процессом экскавации мехлопаты представлен на рис. 1.20. Перед началом цикла экскавации машинист выбирает программу отработки блока забоя в соответствии с его параметрами, устанавливает ковш в точку начала копания и задает системе следующие параметры:

$T_{пл}$, T_k , $T_{пер1}$, T_r , $T_{пер2}$ – длительность операций планирования подошвы забоя, собственно копания, переноса ковша в точку разгрузки, разгрузки ковша, переноса ковша в точку очередного планирования подошвы забоя соответственно;

$I_{пз1}$, $I_{пз2}$ – заданные значения токов электродвигателя подъема, определяющие моменты начала коррекции скоростей напора и подъема при копании соответственно;

$G_{грз}$ – вес горной массы в ковше при его полном заполнении;

K_p , K_I – коэффициенты пропорциональности в уравнениях коррекции скорости напора в функции соответственно выдвижения рукоятки и тока двигателя подъема при копании;

$\omega_{пmax}$, $v_{нmax}$, $\omega_{вmax}$ – максимальные (номинальные) скорости движения приводов подъема, напора и поворота;

$f_p(\varphi_n)$ – функция задания выдвижения рукояти в зависимости от угла ее поворота, обеспечивающая движение зубьев ковша по горизонтали при планировании подошвы забоя (в начальной фазе копания);

$\varphi_{ПЛ}$ – угол поворота рукояти в момент окончания планирования подошвы забоя, отсчитываемый от ее вертикального положения при опущенном ковше;

φ_K – угол поворота рукояти в момент прекращения копания;

$\varepsilon_{П}, \varepsilon_{В}, a_H$ – максимальные (номинальные) ускорения (замедления) приводов соответственно подъема, поворота и напора;

n_3 – число циклов отработки блока забоев.

После выбора машинистом режима «Автомат.» и нажатия кнопки «Пуск» система осуществляет автоматическое управление процессом экскавации. Последний прерывается всякий раз после окончания загрузки автосамосвала и прекращается после отработки блока забоя.

Оптимизация процесса копания обеспечивается управлением скоростью привода напора в функции угла поворота рукояти и тока двигателя подъема и 50%-ным снижением скорости привода подъема при обходе скального включения (вторичном заглублении ковша).

Оптимизация процесса транспортирования ковша достигается синхронной работой приводов подъема, напора и поворота на предельных скоростях и ускорениях. Алгоритм управления переносом ковша включает в себя следующие действия:

1. Определить для каждого привода обрабатываемые перемещения по выражениям:

а) для переноса ковша на разгрузку:

$$\Delta\varphi_{П} = \varphi_2 - \varphi_K; \quad \Delta\rho_H = \rho_2 - \rho_K; \quad \Delta\alpha_B = \alpha_2 - \alpha_1; \quad (1.19)$$

б) для переноса ковша в забой:

$$\Delta\varphi_{П} = \varphi_3 - \varphi_2; \quad \Delta\rho_H = \rho_3 - \rho_2; \quad \Delta\alpha_B = \alpha_3 - \alpha_2. \quad (1.20)$$

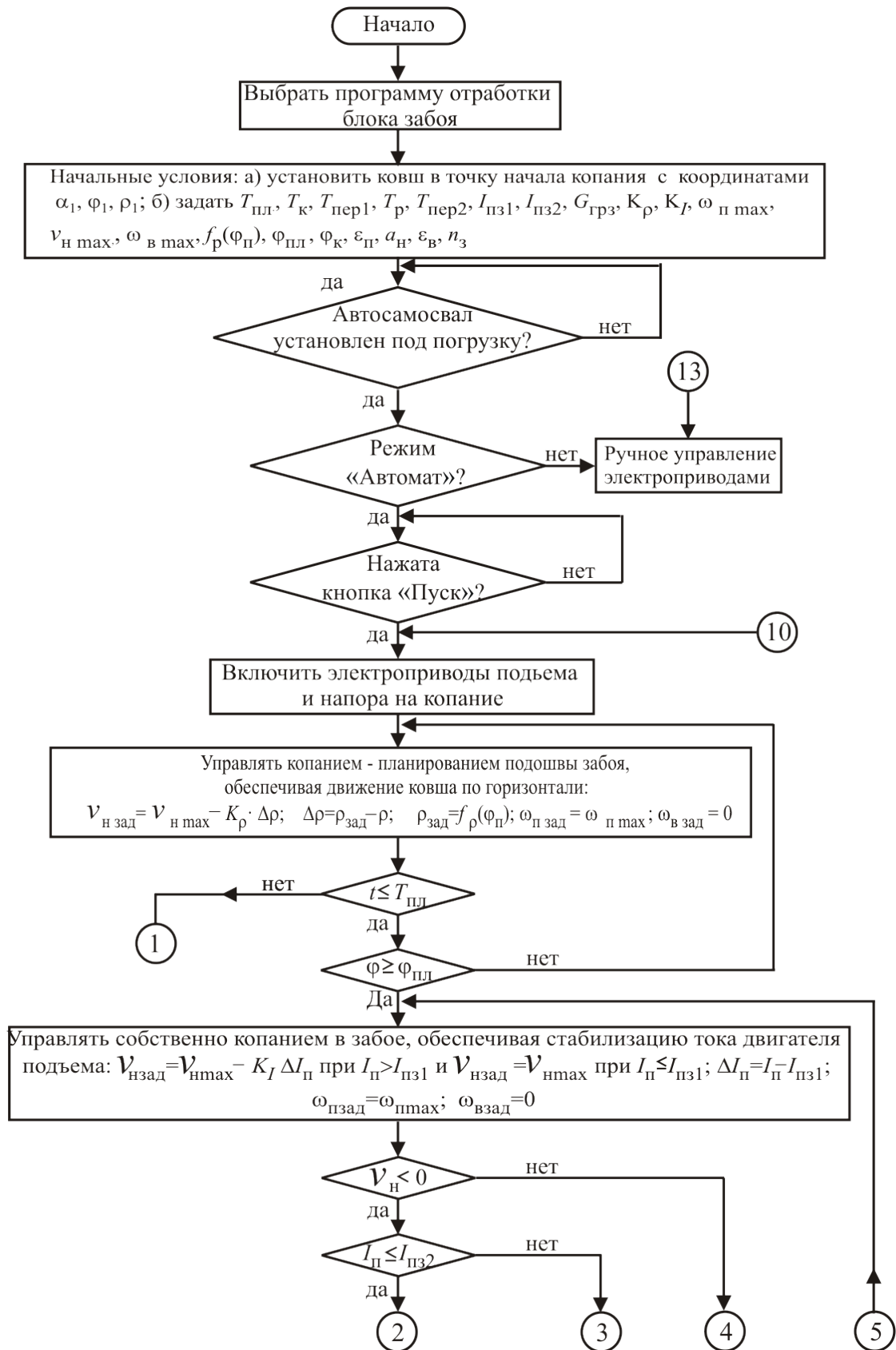


Рис. 1.20. Алгоритм управления процессом экскавации
мехлопаты

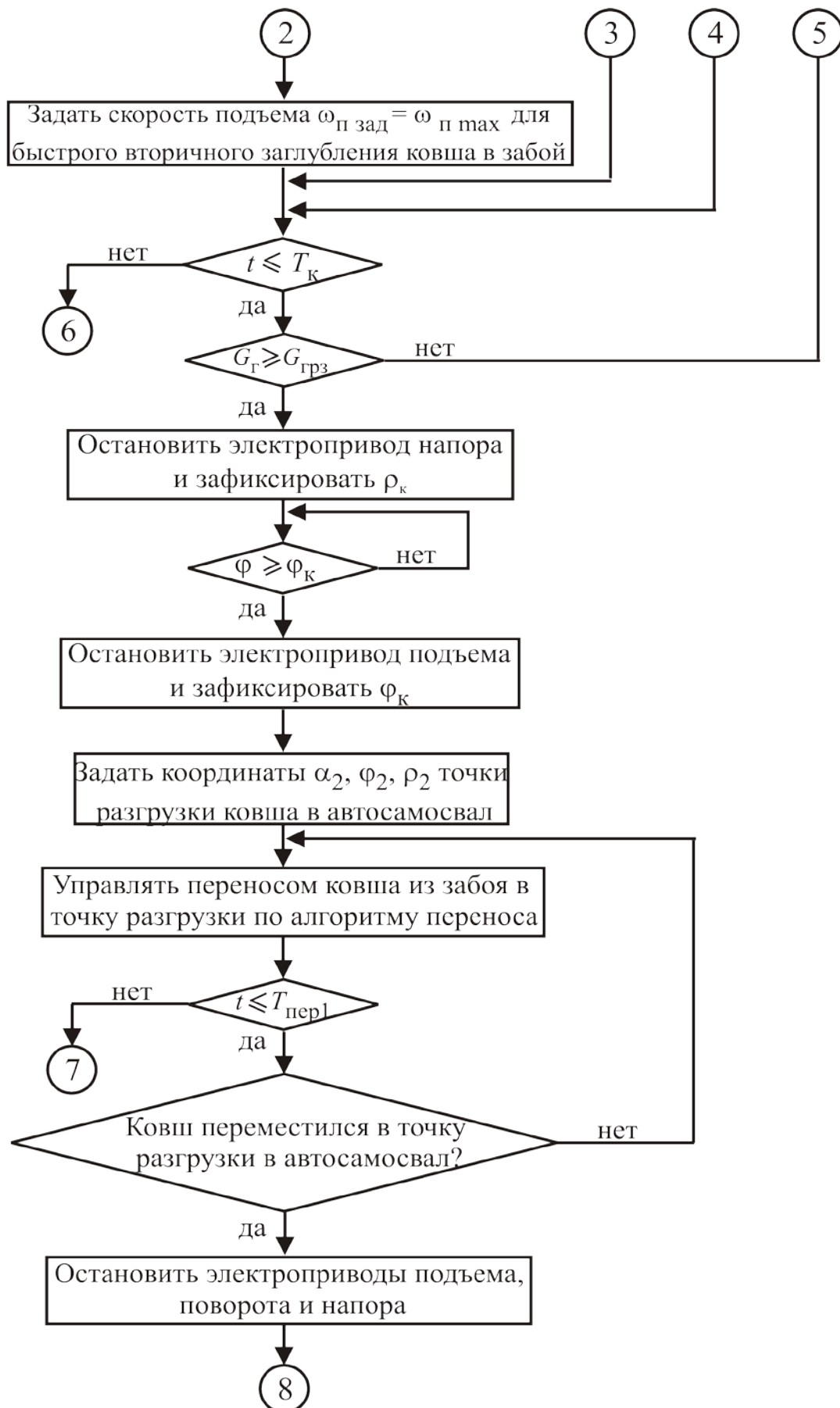


Рис. 1.20. Продолжение

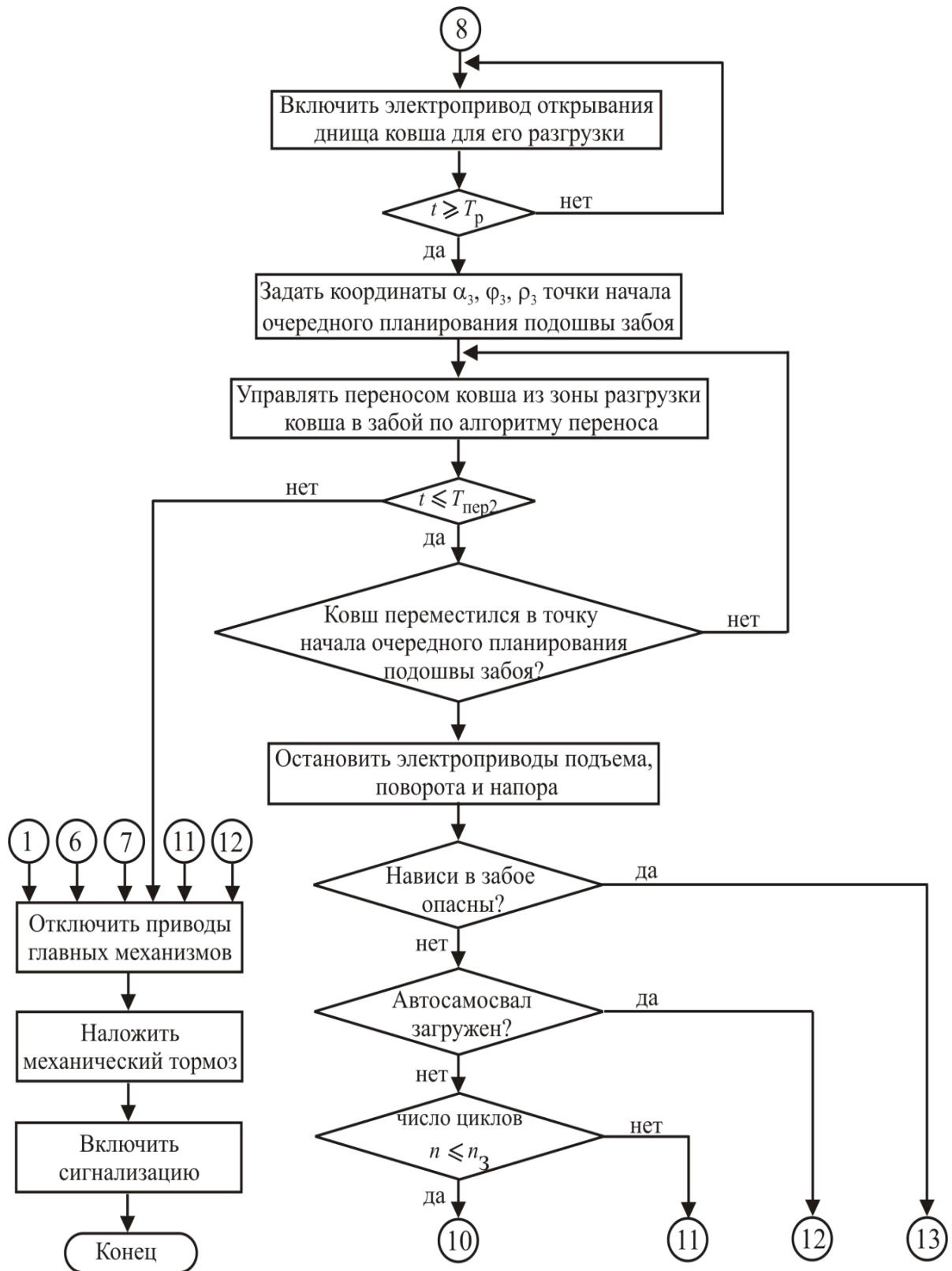


Рис. 1.20. Окончание

2. Вычислить время работы каждого привода на максимальных значениях скорости и ускорения:

$$\left. \begin{aligned} T_{\Pi} &= \frac{\Delta\varphi_{\Pi}}{\omega_{\Pi\max}} + \frac{\omega_{\Pi\max}}{\varepsilon_{\Pi}}, \\ T_{\text{H}} &= \frac{\Delta\rho_{\text{H}}}{v_{\text{H}\max}} + \frac{v_{\text{H}\max}}{a_{\text{H}}}, \\ T_{\text{В}} &= \frac{\Delta\alpha_{\text{В}}}{\omega_{\text{В}\max}} + \frac{\omega_{\text{В}\max}}{\varepsilon_{\text{В}}}. \end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

3. Определить длительность операции переноса ковша (время синхронной работы приводов) путем сравнения вычисленных $T_{\Pi}, T_{\text{H}}, T_{\text{В}}$ как время работы привода, выполняющего лимитирующую операцию (наиболее продолжительную):

$$T = \max(T_{\Pi}, T_{\text{H}}, T_{\text{В}}). \quad (1.22)$$

4. Задать приводу, выполняющему лимитирующую операцию, максимальную скорость установившегося движения. Установившиеся скорости движения двух других приводов вычислить из выражений (1.21) при выполнении условия (1.22), т.е. задавая им время работы, равное длительности операции переноса ковша.

5. Вычислить моменты начала замедления каждого привода из выражений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi_{\Pi} - \Delta\varphi_{\Pi}(t) &= \frac{\omega_{\Pi\text{уст}}^2}{2\varepsilon_{\Pi}}, \\ \Delta\rho_{\text{H}} - \Delta\rho_{\text{H}}(t) &= \frac{v_{\text{Hуст}}^2}{2a_{\text{H}}}, \\ \Delta\alpha_{\text{В}} - \Delta\alpha_{\text{В}}(t) &= \frac{\omega_{\text{Вуст}}^2}{2\varepsilon_{\text{В}}}. \end{aligned} \right\} \quad (1.23)$$

6. Формировать управляющие сигналы – задания скоростей движения приводам подъема, напора и поворота в функции времени соответственно $\omega_{\Pi\text{зад}}, v_{\text{Hзад}}, \omega_{\text{Взад}}$ по линейному закону в виде равнобрабочих трапеций. При этом процесс разгона приво-

да заканчивается в момент достижения равенства фактической и рассчитанной установившейся скорости его движения, а процесс замедления каждого привода начинается в моменты выполнения условий (1.23).

Операции 1–4 алгоритма управления переносом ковша выполняет управляющий компьютер, а операции 5, 6 – микропроцессорные контроллеры.

При появлении опасных нависей в забое, обнаруживаемых системой машинного зрения, управляющий компьютер отключает приводы рабочих механизмов, включает механические тормоза и звуковой сигнал и переводит систему на режим ручного управления. Машинист устраняет угрозу обрушения забоя, управляя соответствующим образом рабочими механизмами экскаватора при помощи командоконтроллеров.

Система обеспечивает автоматическое управление движением ковша в пространстве забоя при отработке заданного блока с данной точки стояния в забое, автоматический контроль параметров процесса экскавации (перемещения, скорости, крен и т.д.), автоматическую защиту и блокировку процесса экскавации при превышении длительности операций цикла заданных значений, предупредительную сигнализацию о появлении опасных ситуаций в забое и аварийную – о срабатывании защит.

1.2.5. Программное управление прямым переносом ковша драглайна

Система автоматического программного управления переносом ковша обеспечивает:

- Сокращение длительности переноса ковша и, как следствие, повышение производительности экскаватора;
- Ограничение динамических нагрузок на рабочих механизмах и, как следствие, повышение надежности работы оборудования;
- Движение ковша драглайна в рабочей зоне, вследствие чего обеспечивается защита от растяжки канатов, переподъема и перетяги ковша, а также исключается саморазгрузка ковша.

Зоны различного положения ковша драглайна показаны на рис. 1.21.

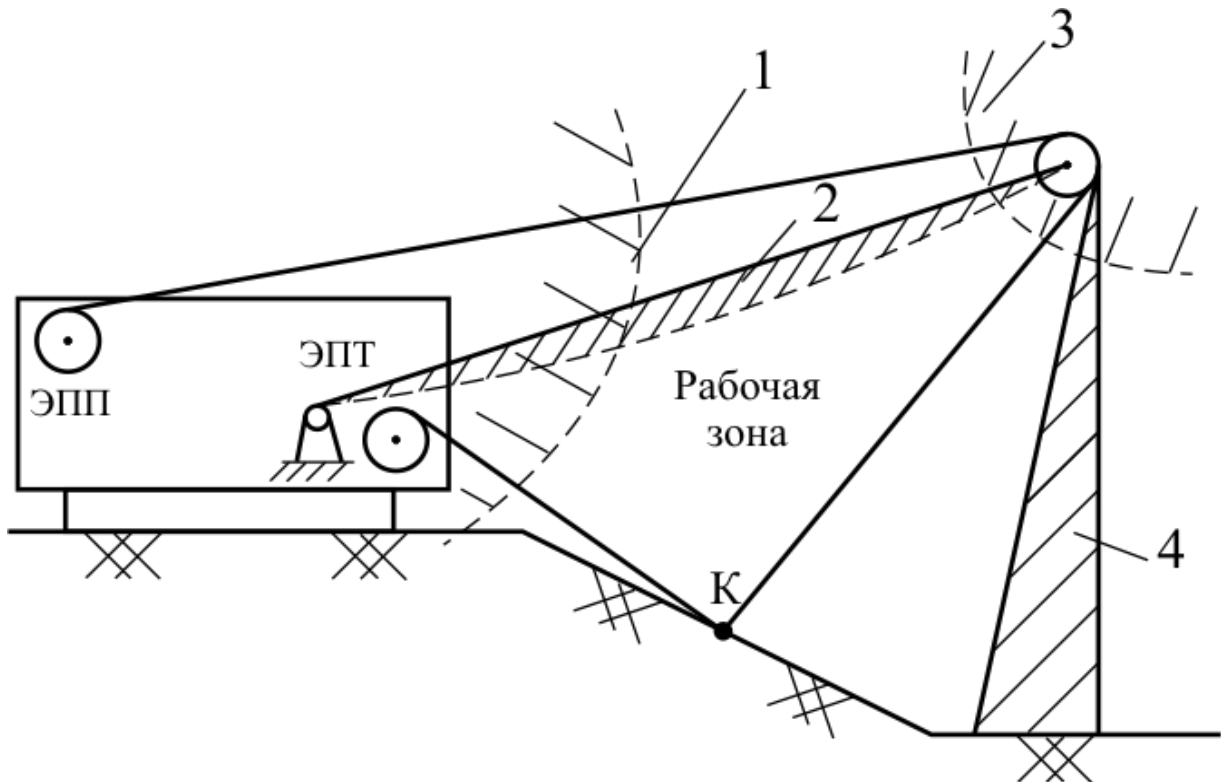


Рис. 1.21. Схема отработки забоя нижним черпанием:
1–4 – зоны соответственно перетяги, растяжки, переподъема, саморазгрузки

Принципы минимизации длительности операции переноса:

1. Длительность работы электроприводов тяги, подъема, поворота в i -м цикле переноса одинакова, т.е. предусматривается совмещение рабочих движений приводов:

$$T_{\Pi i} = T_{Ti} = T_{Vi} = T_i.$$

2. Ускорение всех электроприводов принимается максимальным:

$$\left. \begin{aligned} a_{\Pi} &= a_{\Pi \max} \\ a_T &= a_{T \max} \\ a_V &= a_{V \max} \end{aligned} \right\} \text{или } a_j = a_{j \max},$$

где $j = \Pi, T, V$ – индекс имени электропривода.

3. Скорость электропривода, выполняющего наиболее продолжительную операцию, принимается максимальной, скорости других электроприводов вычисляются.

На рис. 1.22 представлена структурная схема системы программного управления прямым переносом ковша драглайна.

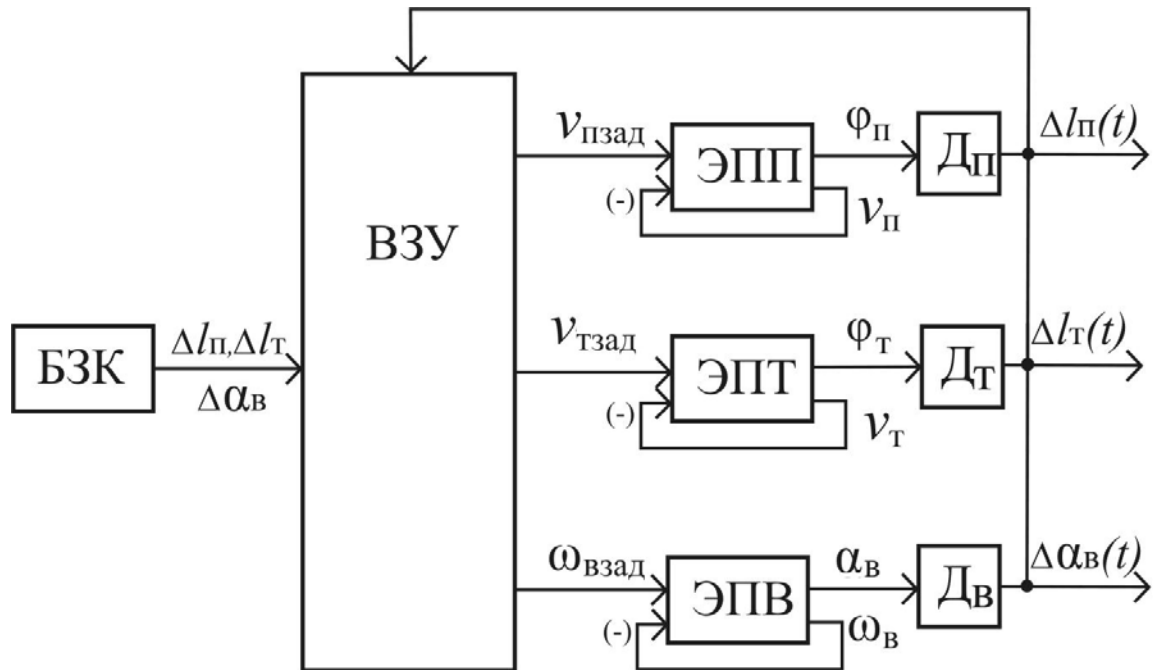


Рис. 1.22. Структурная схема САУ переносом ковша драглайна

На схеме приняты следующие обозначения:

БЗК – блок заданных координат на i -й перенос ковша;

$\Delta l_{\Pi}, \Delta l_{\Gamma}$ – заданные приращения длин канатов подъема и тяги, которые должны быть отработаны приводами в данном переносе ковша;

$\Delta \alpha_{\text{В}}$ – заданное приращение угла поворота платформы экскаватора;

ВЗУ – вычислительное и задающее устройство, формирующее заданные значения линейных скоростей подъема $v_{\Pi\text{зад}}$, тяги $v_{\Gamma\text{зад}}$ и угловой скорости поворота $\omega_{\text{Взад}}$;

ЭПП, ЭПТ, ЭПВ – электроприводы рабочих механизмов соответственно подъема, тяги и поворота экскаватора;

ДП, ДТ, ДВ – датчики перемещений рабочих механизмов;

φ_{Π}, v_{Π} – угловое перемещение и скорость подъема;
 $\varphi_{\Gamma}, v_{\Gamma}$ – угловое перемещение и скорость тяги;
 $\alpha_{\text{В}}, v_{\text{В}}$ – угловое перемещение и скорость поворота;
 $\Delta l_{\Pi}(t), \Delta l_{\Gamma}(t), \Delta \gamma_{\text{В}}(t)$ – текущие значения приращений длин канатов и угла поворота экскаватора.

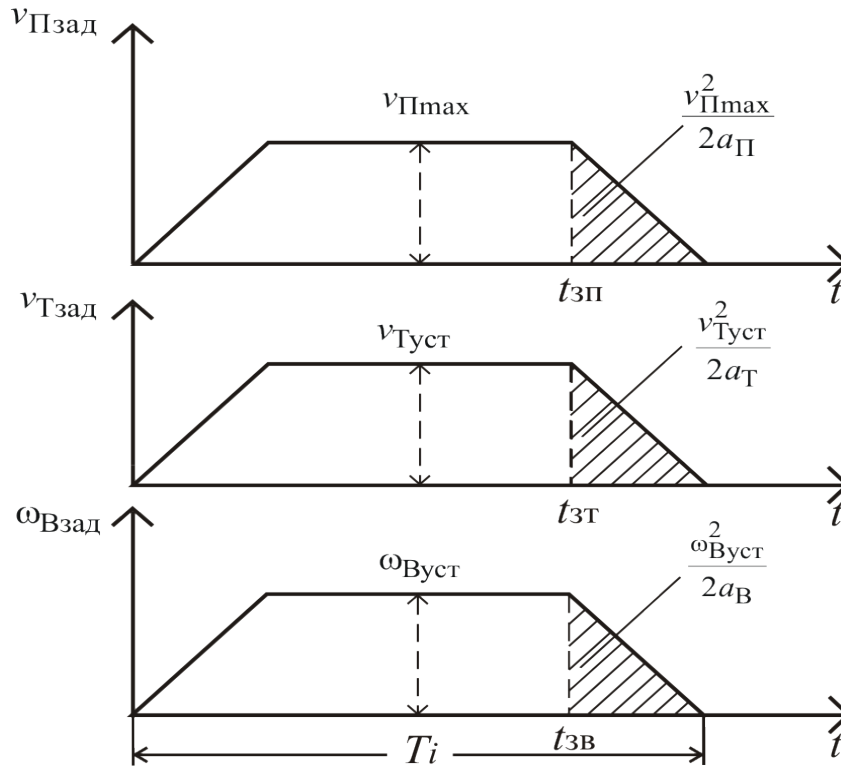


Рис. 1.23. Диаграммы заданных скоростей движения электроприводов подъема, тяги и поворота при выполнении операции переноса ковша с забоя на разгрузку

Алгоритм работы ВЗУ:

1. Вычисляют длительность работы каждого привода для i -го переноса по выражению

$$T_{ji} = \frac{v_{j\text{max}}}{a_j} + \frac{\Delta l_{ji}}{v_{j\text{max}}}, \quad (1.24)$$

где $a_j, v_{j\text{max}}$ – максимальные значения ускорения и скорости электропривода.

2. Сравнивают вычисленные значения T_{Π}, T_T, T_B и за длительность i -го переноса принимают максимальное из них:

$$T_i = T_{ji\max}, \quad (1.25)$$

где $T_{ji\max}$ – максимальная длительность работы одного из приводов в i -м переносе.

3. Вычисляют установившиеся значения скоростей для других приводов, подставляя в выражение (1.21) величину T_i .

4. Момент начала замедления каждого привода t_{zji} в i -м переносе определяют из выражения

$$\Delta l_{ji} - \Delta l_{ji}(t) = \frac{v_{ji\text{уст}}^2}{2a_j}. \quad (1.26)$$

1.2.6. Автоматизация роторных экскаваторов

Основными направлениями автоматизации роторных экскаваторов (РЭ) являются:

- Автоматическое управление процессом экскавации (копанием);
- Автоматическое программное управление РЭ (управление установочными операциями);
- Создание АСУ роторными комплексами, включающими в себя экскаватор – конвейерная линия – отвалообразователь.

В качестве источников эффективности автоматизации РЭ следует отметить следующие:

- Рост производительности на 10–15 %;
- Экономия электроэнергии за счет оптимизации процесса копания на 5–10 %;
- Повышение устойчивости забоя вследствие обеспечения требуемых параметров забоя и, следовательно, рост безопасности ведения горных работ.

Рассмотрим технологические основы автоматизации РЭ. Технология отработки забоя вертикальными многорядными стружками с подступами роторным экскаватором с выдвижной стрелой показана на рис. 1.24.

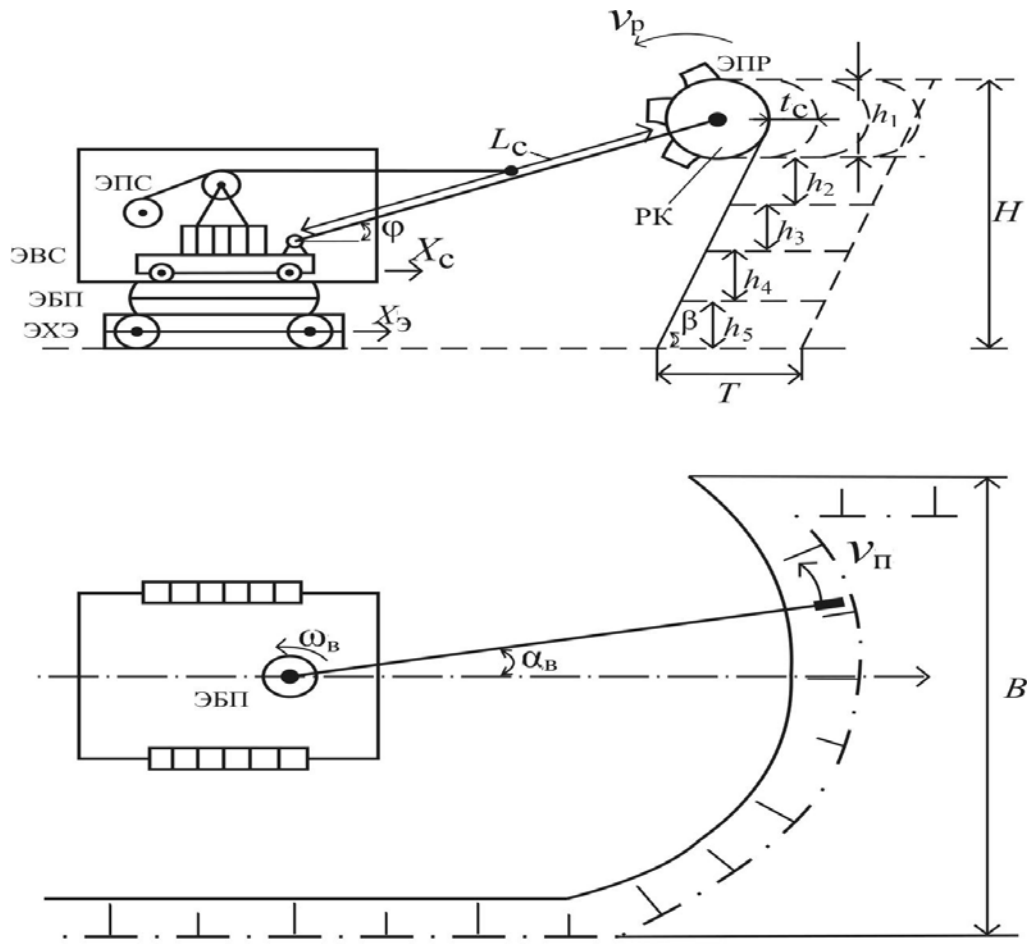


Рис. 1.24. Технологическая схема отработки забоя

На схеме приняты следующие обозначения:

- Исполнительные механизмы (приводы):

ЭПС, ЭВС, ЭБП, ЭПР, ЭХЭ – электроприводы механизмов экскаватора соответственно подъема и выдвижения стрелы, боковой подачи и вращения роторного колеса, хода экскаватора;

φ – угол подъема стрелы;

x_c – выдвижение стрелы;

$x_{\text{Э}}$ – перемещение экскаватора;

α – угол поворота горизонтальной плоскости;

- Технологические параметры процесса экскавации:

$B, T, H, h, t_c, b_c, \beta$ – ширина, глубина и высота блока забоя; высота подступа; толщина стружки; ширина стружки; угол торцевого откоса;

- Режимные параметры процесса резания:

v_{Π} – скорость боковой подачи ротора:

$$v_{\Pi} = \omega_B \cdot R_K, \quad (1.27)$$

где ω_B – угловая скорость поворота платформы экскаватора;

$R_K = L_C \cdot \cos \varphi$ – радиус копания;

L_C – длина стрелы.

Окружная скорость роторного колеса (скорость резания):

$$v_P = \omega_P \cdot R_P, \quad (1.28)$$

где ω_P – угловая скорость ротора;

R_P – радиус роторного колеса.

Траектории резов в вертикальной плоскости показаны на рис. 1.25. Вектор абсолютной скорости движения ковша равен

$$\vec{v}_K = \vec{v}_{\Pi} + \vec{v}_P.$$

Ширина стружки определяется из выражения

$$b_C = \tau \cdot v_{\Pi} = \frac{2\pi / Z_K}{\omega_P} \cdot v_{\Pi} = \frac{2\pi \cdot R_P / Z_K}{v_P} \cdot v_{\Pi} = K \cdot \frac{v_{\Pi}}{v_P}, \quad (1.29)$$

где τ – время запаздывания формирования ширины стружки;

Z_K – число ковшей;

$K = \frac{2\pi R_P}{Z_K}$ – коэффициент пропорциональности.

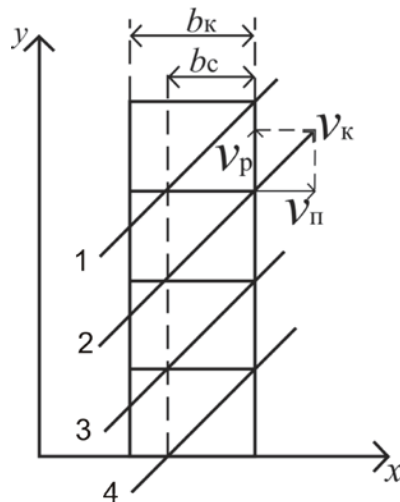


Рис. 1.25. Линии резов 1–4 забоя ковшами роторного колеса

Из анализа (1.29) вытекает, что ширина стружки определяется отношением скоростей подачи и резания.

Траектории резов в горизонтальной плоскости:

- Для РЭ с невыедливой стрелой (рис. 1.26) резание осуществляется с постоянным радиусом и переменной толщиной стружки ($t_c = \text{var}$).



где t_0 – толщина стружки при $\alpha = 0$.

Для экскаваторов с невыедливой стрелой основным возмущающим воздействием является серповидность стружки, влияние которой на производительность РЭ может быть скомпенсировано изменением скорости боковой подачи;

- Для РЭ с выдвливой стрелой траектории резов в горизонтальной плоскости имеют вид, показанный на рис. 1.27. Радиус резания будет переменный, а толщина стружки постоянной:

$$R_1 \neq R_2;$$

$$t_c = t_0 = \text{const}.$$

Рис. 1.27. Траектории резов с постоянной толщиной стружки

и переменным радиусом копания

Производительность РЭ определяется выражением: $Q = b_C \cdot t_C \cdot v_{\Pi}$, из которого следует, что равенство производительностей экскаваторов с выдвижной и невыедвжной стрелой $Q_{BC} = Q_{HBC} = \text{const}$ может быть достигнуто при изменении скорости боковой подачи ротора для экскаватора с невыедвжной стрелой по закону

$$v_{\Pi} = \frac{v_{\Pi 0}}{\cos \alpha}, \quad (1.31)$$

где $v_{\Pi 0}$ – скорость боковой подачи ротора при $\alpha = 0$.

Характер изменения скорости боковой подачи для диапазона изменения $\alpha = \pm \frac{\pi}{3}$ по закону (1.31) показан на рис. 1.28.

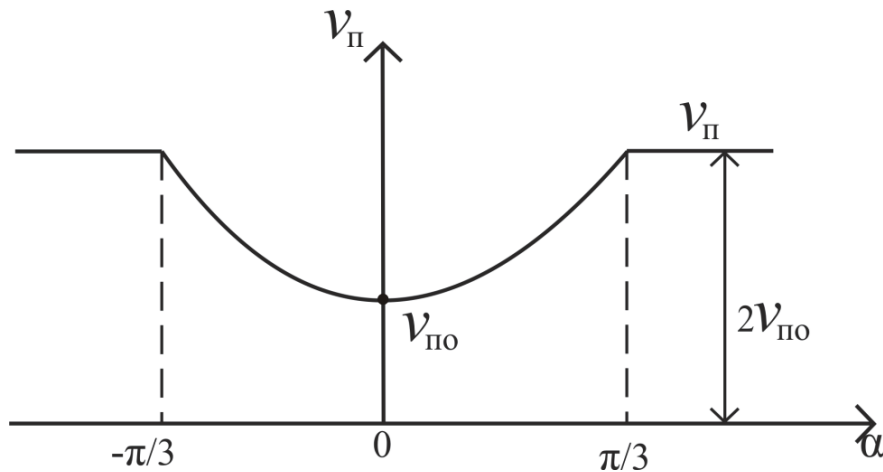


Рис. 1.28. Зависимость $v_{\Pi} = f(\alpha)$ для экскаваторов с невыедвжной стрелой

Автоматическое управление процессом копания РЭ

Автоматическое управление процессом экскавации обеспечивается применением на экскаваторах специальных САУ копанием.

РЭ как объект управления копанием может быть представлен схемой, показанной на рис. 1.29.

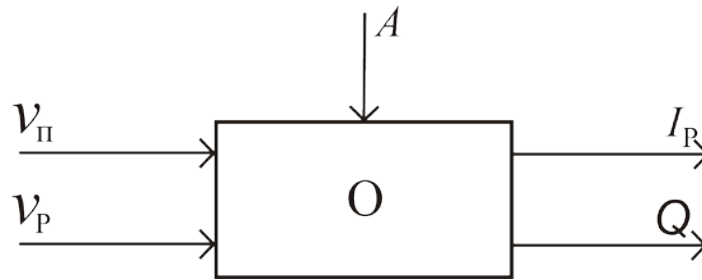


Рис. 1.29. Схема РЭ как объекта управления копанием:
 I_R – ток электродвигателя роторного колеса; A – возмущающие воздействия; Q – производительность экскаватора

В результате исследования установлено, что РЭ как объект управления копанием характеризуется следующими свойствами:

1. Пульсации регулируемого параметра, обусловленные эксцентриситетом роторного колеса, механическими колебаниями стрелы, входами – выходами ковша (рис. 1.30). Для ограничения влияния высокочастотных пульсаций на процесс управления в САУ следует обеспечить фильтрацию регулируемого параметра, т.е. управлять по его среднему значению I_{Pcp} .

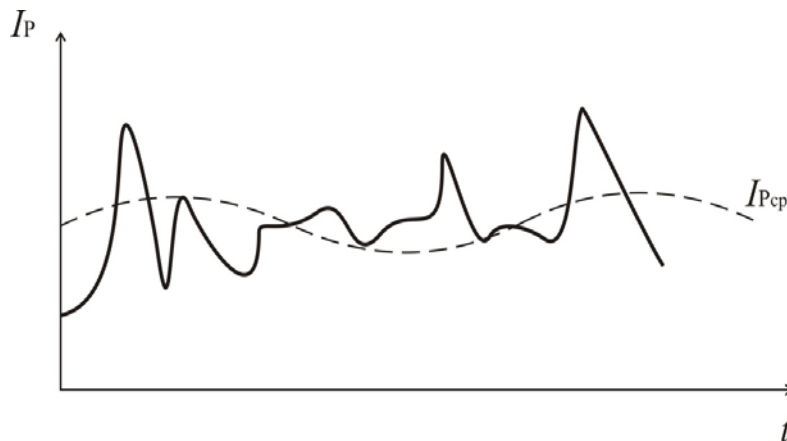


Рис. 1.30. Пульсации тока электродвигателя ротора в процессе копания

2. Непостоянство передаточного коэффициента объекта, обусловленное изменением физико-механических свойств горных пород, нарушением геометрии забоя и др.

$$k_O = \frac{I_R}{v_{\Pi}} \text{ или } \frac{Q}{v_{\Pi}}. \quad (1.32)$$

Для обеспечения требуемого качества процесса управления в системе должна быть предусмотрена стабилизация передаточного коэффициента.

3. Серповидность толщины стружки для РЭ с невыдвижной стрелой. Компенсация изменения толщины стружки на производительность экскаватора может быть обеспечена путем коррекции скорости боковой подачи по закону

$$v_{\Pi} = \frac{v_{\Pi 0}}{\cos \alpha}.$$

4. Наличие запаздывания в системе, обусловленного:

а) временем формирования ширины стружки:

$$\tau_1 = \frac{2\pi / Z_k}{\omega_p}; \quad (1.33)$$

б) способом измерения производительности экскаватора:

$$\tau_2 = \frac{L}{v_k}, \quad (1.34)$$

где L – расстояние установки датчика производительности;

v_k – скорость движения ленты конвейера роторной стрелы.

Учет этого свойства выдвигает требование компенсации транспортного запаздывания в САУ копанием.

5. Изменение в широком диапазоне сопротивляемости пород резанию (см. A на рис. 1.29). Учет этого фактора выдвигает требование автоматического ограничения нагрузки или производительности в соответствующей САУ копанием.

В качестве САУ процесса копания для различных РЭ рекомендуются системы автоматического регулирования, представленные в табл. 1.1.

Таблица 1.1

САР процесса копания роторных экскаваторов

Конструкция стрелы	Регули-	Пара-	Рекомендуемая

	руемый пара- метр	метры ограни- чения	САР
1. Невыдвижная стрела, с $Q = 630 \text{ м}^3/\text{ч}$	I_p	Q	Комбинированная САР нагрузки ро- тора (малые экс- каваторы)
2. Невыдвижная стрела, с $Q = 1250 \text{ м}^3/\text{ч}$	Q	I_p	Комбинированная САР производи- тельности РЭ (средние экскава- торы)
3. Выдвижная стрела, с $Q > 1250 \text{ м}^3/\text{ч}$	Q	I_p	САР производи- тельности по от- клонению (мощ- ные экскаваторы)

Для малых экскаваторов с невыдвижной стрелой рекомендуется к применению комбинированная САР нагрузки ротора (рис. 1.31). На схеме приняты следующие обозначения:

РН – ПИ-регулятор нагрузки (тока I_p);

БСПК – блок стабилизации передаточного коэффициента системы;

ДУ1, ДУ2 – делительные устройства для ввода в систему $1/k_0, 1/\cos \alpha$;

× – множительный элемент;

ЭБП, ЭПР – электроприводы соответственно боковой подачи и вращения ротора;

КОНВ – конвейер роторной стрелы;

БОП – блок ограничения производительности экскаватора;

Ф – фильтр измеренного значения тока электродвигателя ротора;

$D_\alpha, D_{v_{II}}, D_Q, D_{I_p}$ – датчики соответственно угла поворота стрелы, скорости боковой подачи, производительности экскаватора, тока электродвигателя ротора;

$I_p, I_{pизм}, I_{pзад}$ – ток электродвигателя ротора, его измеренное и заданное значения;

$U_{рн}$ – выходной сигнал регулятора нагрузки;

$M_{ср}$ – статический момент на валу ротора;

$Q, Q_{зад}$ – производительность экскаватора фактическая и заданная;

ΔI_{pQ} – сигнал коррекции заданного тока электродвигателя ротора по производительности экскаватора.

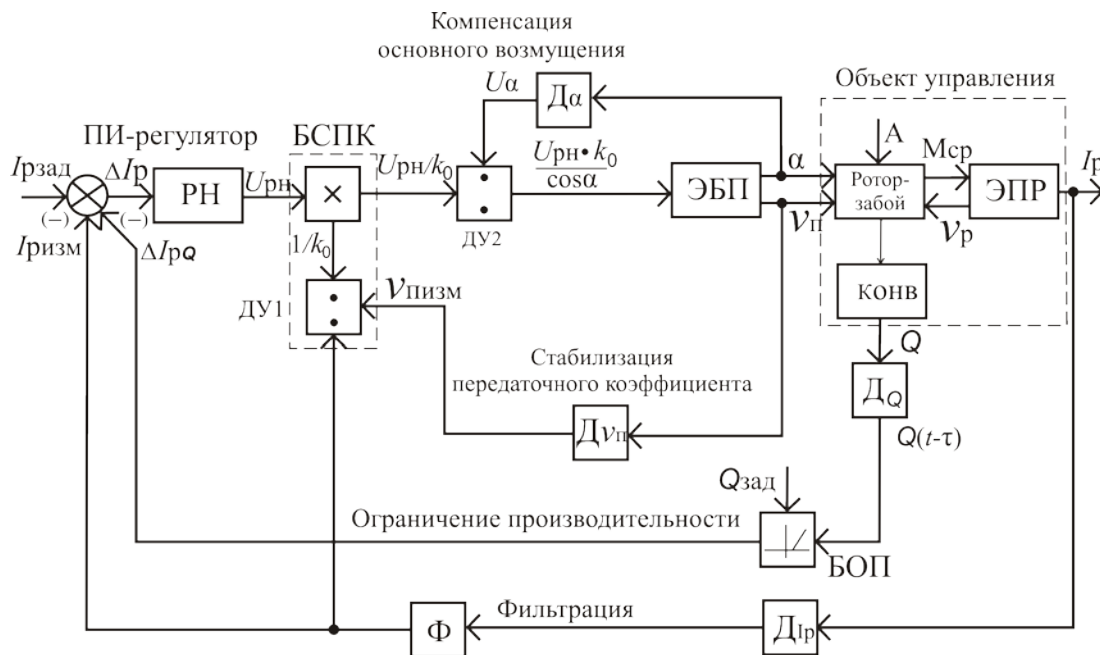


Рис. 1.31. Комбинированная САУ нагрузки ротора с автоматическим ограничением по производительности РЭ

Система обеспечивает:

- Стабилизацию тока электродвигателя ротора по закону $I_p = I_{pзад} = \text{const}$;
- Автоматическое ограничение производительности экскаватора $Q \leq Q_{зад}$;
- Автоматическую коррекцию выходного сигнала регулятора по углу α (компенсация серповидности стружки);
- Стабилизацию передаточного коэффициента системы;
- Фильтрацию регулируемого параметра $I_p(t)$.

Комбинированная САР производительности РЭ показана на рис. 1.32.

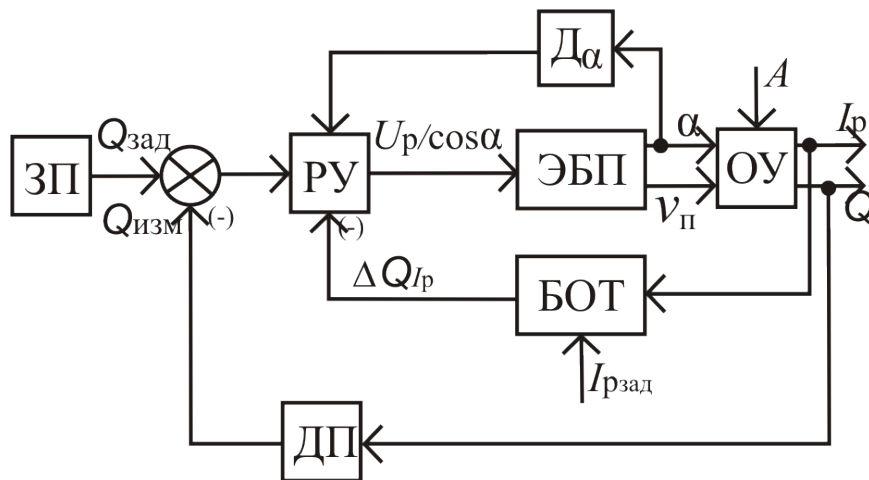


Рис. 1.32. Структурная схема комбинированной САР производительности для средних РЭ

На схеме приняты следующие обозначения:

ЗП, ДП – задатчик и датчик производительности экскаватора;

РУ – регулирующее устройство, включающее в себя ПИ-регулятор и блоки последовательной и параллельной коррекции. Параллельная коррекция по углу α обеспечивает компенсацию влияния серповидности стружки на процесс экскавации, а последовательная коррекция, представленная интегро-дифференцирующим звеном, компенсирует влияние запаздывания на процесс регулирования;

ЭБП – электропривод боковой подачи;

ОУ – объект управления, включающий в себя роторное колесо с забоем, электропривод ротора и конвейер стрелы;

БОТ – блок ограничения тока электродвигателя ротора;

D_α – датчик угла поворота стрелы в горизонтальной плоскости.

Система обеспечивает:

- Поддержание заданной производительности по заданному закону $Q = Q_{\text{зад}} = \text{const}$;

- Ограничение нагрузки ротора по закону $I_p \leq I_{p\text{зад}}$;
- Компенсацию влияния серповидности стружки на производительность экскаватора по закону $U_p / \cos \alpha$;
- Компенсацию влияния транспортного запаздывания на процесс регулирования.

САР производительности РЭ в функции удельной энергоёмкости процесса копания показана на рис. 1.33.

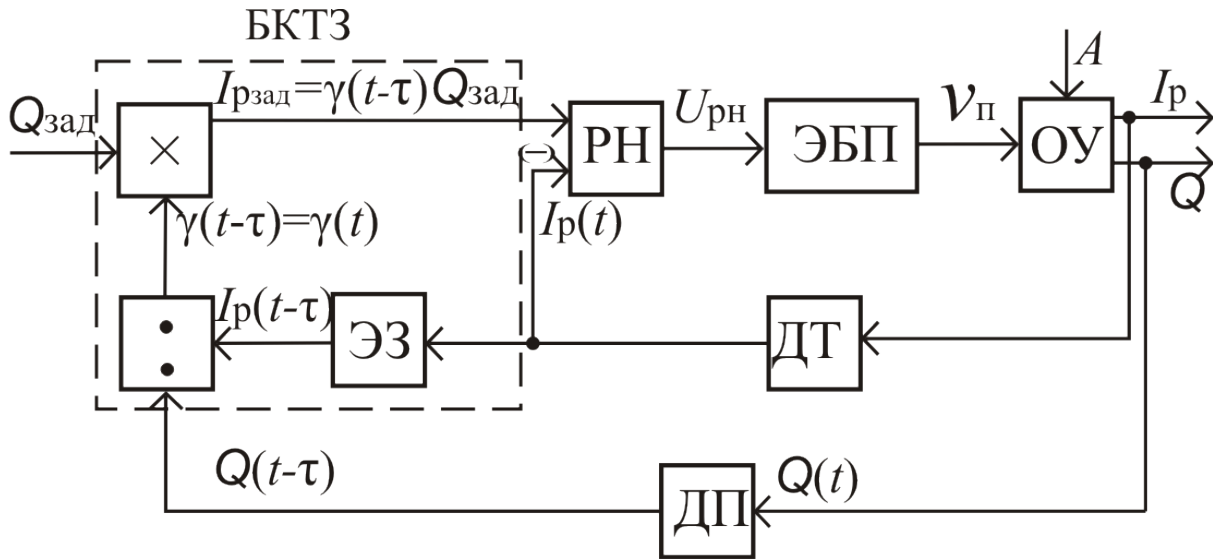


Рис. 1.33. САР производительности для мощных роторных экскаваторов

Введем следующие определения энергоёмкости процесса копания:

- Мгновенная удельная энергоёмкость $\gamma = \frac{I_p}{Q}$;
- Интегральная удельная энергоёмкость a , кВт·ч/м:

$$a = \frac{\int_0^t P_p(t) dt}{\int_0^t Q(t) dt} = k \int_0^t \gamma(t) dt, \quad (1.35)$$

где $P_p(t)$ – мощность, потребляемая электродвигателем ротора в процессе копания. При постоянной скорости ротора потребляемая мощность электродвигателя ротора пропорциональна его току: $P_p \equiv I_p$.

Удельные электрические затраты показывают количество энергии, потребляемое экскаватором для выемки одной единицы продукции.

На схеме (см. рис. 1.33) приняты следующие обозначения:

ДП, ДТ – датчики производительности экскаватора и тока электродвигателя ротора;

ЭЗ – элемент запаздывания;

РН – регулятор нагрузки ротора;

БКТЗ – блок компенсации транспортного запаздывания;

«×», «:» – множительный и делительный элементы.

Система обеспечивает выполнение следующих функций:

- Компенсацию транспортного запаздывания с помощью блока БКТЗ, формирующего задание нагрузки ротора в функции заданной производительности экскаватора и удельной энергоемкости процесса копания;
- Авторегулирование нагрузки ротора по закону

$$I_P = I_{P_{\text{зад}}} = \text{const};$$

- Поддержание производительности экскаватора на заданном уровне по закону

$$Q = Q_{\text{зад}} = \text{const}.$$

Автоматическое программное управление роторным экскаватором (АПУРЭ)

АПУ РЭ – это управление движением ротора в пространстве забоя по заданной программе в течение отработки определенного блока забоя.

Жесткие требования к траектории движения ротора в пространстве забоя не предъявляются, поэтому системы АПУ РЭ строят на принципе координатно-ступенчатого (позиционного) управления, при котором задают не траекторию движения, а только координаты опорных точек этой траектории. Координатами ротора являются угловые перемещения и выдвигание стрелы: α , φ , x_C .

На рис. 1.34 показан характер траектории движения ротора в горизонтальной плоскости.

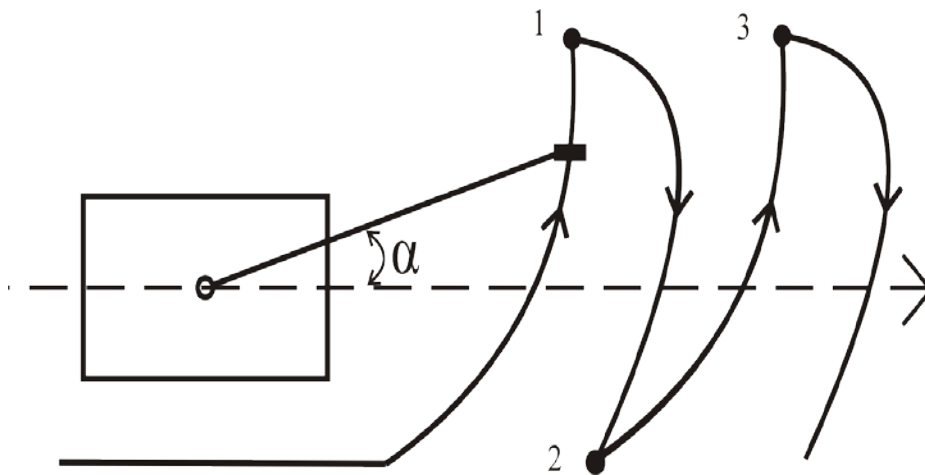


Рис. 1.34. Траектория движения ротора в горизонтальной плоскости при отработке забоя вертикальными многорядными стружками: 1, 2, 3 – опорные точки траектории с координатами α_1, x_{C_1} ; α_2, x_{C_2} ; α_3, x_{C_3}

Заданные перемещения ротора отрабатываются следящими исполнительными приводами с постоянной скоростью.

Применение систем АПУ РЭ позволяет обеспечить требуемые параметры и устойчивость забоя (углы откосов, высоту забоя, ширину заходки и др.), сократить длительность установочных операций и, как следствие, повысить производительность экскаватора. Последнее достигается благодаря совмещению работы исполнительных приводов.

Классификация систем программного управления (СПУ) приведена на рис. 1.35.

В качестве примера на рис. 1.36 представлена цифровая система автоматического программного управления роторным экскаватором ЭРГ-1600, имеющим выдвижную стрелу. Система работает по жесткому (неизменному в процессе работы) алгоритму с управлением в абсолютных координатах.



Рис. 1.35. Схема классификации систем АПУ РЭ

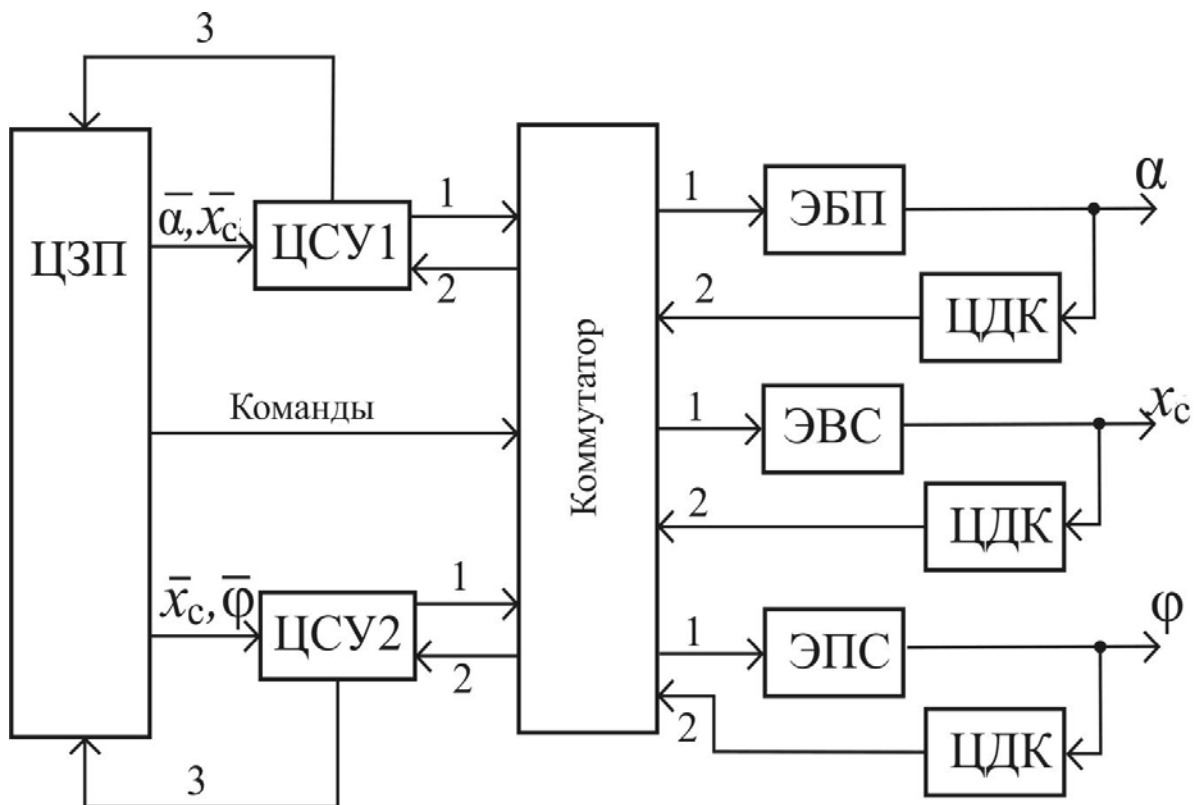


Рис. 1.36. Структурная схема цифровой СПУ экскаватором ЭРГ-1600

На схеме приняты следующие обозначения:

ЦЗП – цифровой задатчик программ (программоноситель – привод – считывающее устройство);

ЦСУ – цифровое сравнивающее устройство. По результатам сравнения заданных и фактических кодов координат ЦСУ по каналу 1 управляет соответствующими электроприводами по принципу вкл/выкл, а по каналу 3 – приводом программоносителя.

Коммутатор, в соответствии с командами от ЦЗП, формирует контуры соответствующих следящих систем исполнительных приводов, задает направление и скорость их движения;

ЭБП, ЭВС, ЭПС – исполнительные приводы боковой подачи ротора, выдвижения и подъема стрелы;

ЦДК – цифровой датчик координаты (шифратор);

α , x_C , φ – цифровые коды заданных координат опорных точек траектории движения ротора в пространстве забоя.

Наличие двух сравнивающих устройств и коммутатора позволяет системе осуществить управление движением ротора одновременно по двум координатам, т.е. обеспечить совмещение операций.

2. АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА

2.1. Основные направления и эффективность автоматизации конвейерного транспорта

Основные направления автоматизации конвейерного транспорта (КТ) можно представить следующими системами:

- Системы дистанционно-автоматического управления (СДАУ), обеспечивающие автоматическое управление пуском/остановом конвейеров в линии, автоматический контроль и защиту конвейеров, функции сигнализации, связи и информационные;
- Автоматические системы регулирования (АСР), предназначенные для обеспечения требуемых режимов работы конвейеров путем изменения скорости движения и натяжения лент, производительности подбункерных питателей;
- Автоматизированные системы управления КТ (АСУ КТ), выполняющие функции СДАУ и АСР с существенным расширением информационных возможностей, обеспечивающие техническую диагностику и оптимизацию режима работы конвейерного транспорта.

Источниками эффективности автоматизации КТ являются:

- Высвобождение оперативного персонала;
- Повышение безопасности труда, обеспечиваемое прежде всего возможностью экстренного останова конвейеров с любой точки трассы, предупредительной сигнализацией перед пуском конвейерных линий и др.;
- Экономия электроэнергии и снижение расхода лент вследствие сокращения времени работы конвейеров вхолостую, стабилизации загрузки лент конвейеров, поддержания на требуемом уровне натяжения лент.

2.2. Автоматическое регулирование загрузки ленточных конвейеров

Пульсации грузопотоков, поступающих от источников, приводят к недоиспользованию конвейеров по производительности, т.е. средняя производительность $Q_{\text{ср}}$ конвейера может быть значительно ниже номинальной $Q_{\text{ном}}$ (рис. 2.1).

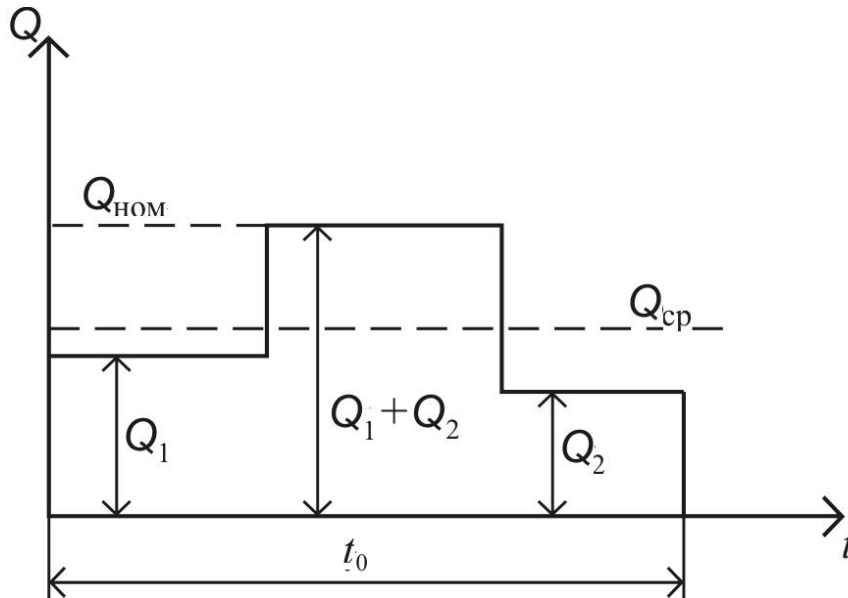


Рис. 2.1. Пример графика нагрузки конвейера, принимающего грузопотоки Q_1 и Q_2 от двух источников

Коэффициент использования конвейера по производительности определяется по выражению

$$k_{\text{И}} = \frac{Q_{\text{ср}}}{Q_{\text{ном}}}. \quad (2.1)$$

При постоянной скорости движения ленты конвейера из уравнения (2.1) можно получить выражение

$$k_{\text{И}} = \frac{q_{\text{ср}}}{q_{\text{ном}}}, \quad (2.2)$$

где $q_{\text{ср}}$, $q_{\text{ном}}$ — средняя и номинальная погонная загрузка ленты конвейера.

При неполной загрузке фактический пробег ленты конвейера всегда будет больше номинального при одном и том же количестве транспортированного материала:

$$L_{\text{ср}} = \frac{G}{q_{\text{ср}}} > L_{\text{ном}} = \frac{G}{q_{\text{ном}}}, \quad (2.3)$$

где G – количество транспортированного материала.

При автоматическом управлении загрузкой ленты конвейеров по принципу поддержания на заданном уровне погонной загрузки обеспечивается:

- Увеличение срока службы ленты конвейера:

$$\Delta T_{\text{С}} \% = \frac{1 - k_{\text{И}}}{k_{\text{И}}} \cdot 100 \%, \quad (2.4)$$

- Экономия электроэнергии:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{С}} \% = \frac{1 - k_{\text{И}}}{k_{\text{И}} \cdot k_{\text{Т}}} \cdot 100 \%, \quad (2.5)$$

где $k_{\text{Т}} = \frac{q_{\text{ном}}}{q_{\text{л}}}$ – коэффициент тары; $q_{\text{л}}$ – погонный вес ленты (вес 1 м ленты).

Автоматическое управление загрузкой лент конвейеров может быть реализовано применением различных САР, рассмотренных ниже.

Стабилизирующая САР погонной загрузки (рис. 2.2) поддерживает последнюю на заданном уровне по закону

$$q = q_{\text{зад}} = \text{const}. \quad (2.6)$$

На схеме приняты следующие обозначения:

ЗДН, ДПЗ, ЗПЗ – задатчик, датчик и регулятор погонной нагрузки;

РПН – автоматический регулятор погонной нагрузки;

РЭП – регулируемый электропривод конвейера;

ТО – тяговый орган (лента);

ГПУ – грузоприемное устройство;

$v_{\text{л1}}$, $v_{\text{л2}}$ – скорость движения ленты на приводном барабане и в точке загрузки;

$q, q_{\text{зад}}, q_{\text{изм}}$ – погонная загрузка ленты соответственно фактическая, заданная и измеренная;
 $v_{\text{Л0}}$ – начальная скорость движения ленты;
 $Q_{\text{ВХ}}$ – входной грузопоток;
 $U_{\text{Р}}$ – выходной сигнал регулятора.

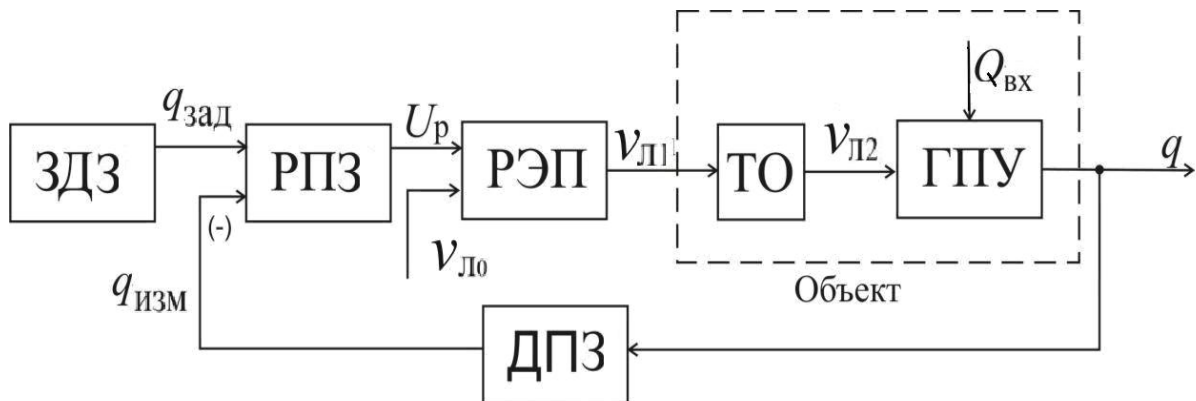


Рис. 2.2. Стабилизирующая САР погонной загрузки ленты конвейера

На рис. 2.3 показаны точка 1 приложения управляющего воздействия и точка 2 измерения погонной загрузки.

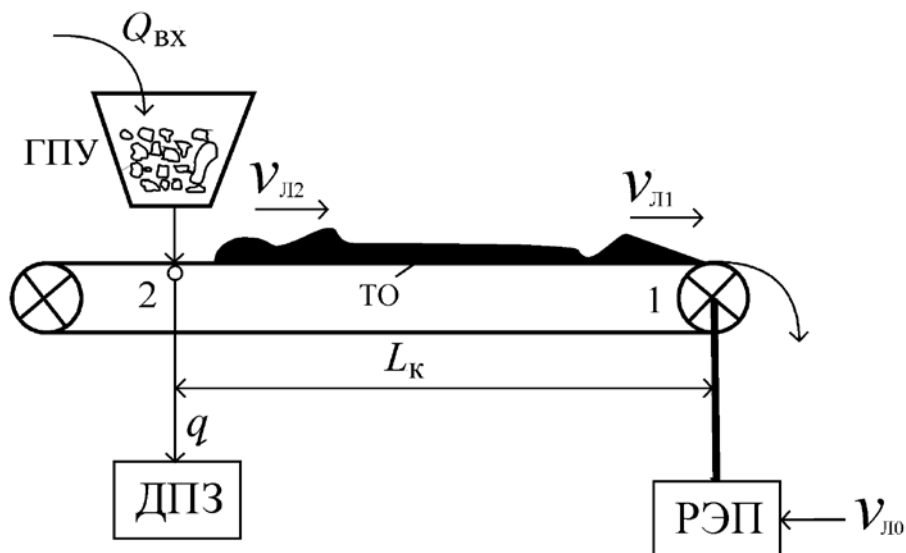


Рис. 2.3. Расположение элементов САР на кинематической схеме конвейера

Вследствие удаления точки 1 от точки 2 на расстояние L_K возникает запаздывание в системе, определяемое выражением

$$\tau = \frac{L_K}{v_{УПР}}, \quad (2.7)$$

где $v_{УПР}$ – скорость распространения в ленте упругой волны.

С учетом упругости, распределенности массы и запаздывания передаточная функция тягового органа (ленты) может быть записана в виде

$$W_{TO} = \frac{v_{Л2}(p)}{v_{Л1}(p)} = \frac{e^{-p\tau}}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}. \quad (2.8)$$

К недостаткам рассмотренной САР погонной загрузки следует отнести следующие:

- Большая частота изменения скорости движения ленты и, как следствие этого, повышенные динамические нагрузки, понижающие срок службы ленты;
- Наличие запаздывания в контуре регулирования и, следовательно, сложность обеспечения требуемых показателей качества процесса регулирования.

Двухканальная трехпозиционная САР погонной нагрузки показана на рис. 2.4.

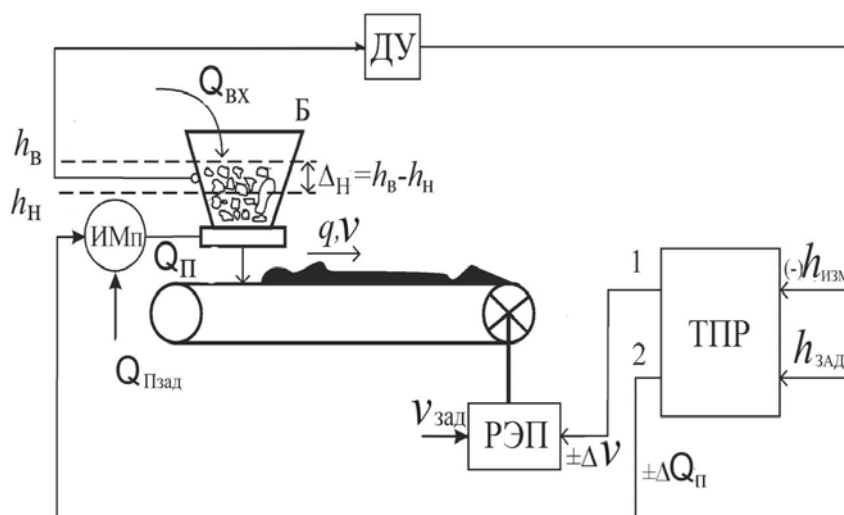


Рис. 2.4. Структурная схема трехпозиционной САР погонной загрузки ленты конвейера

В системе используется бункер Б с регулируемым по производительности питателем ИМп и конвейер с регулируемым электроприводом РЭП. В качестве управляющего устройства используется трехпозиционный регулятор ТПР с двумя каналами управления 1 и 2, формирующими ступенчатое изменение скорости ленты Δv и производительности питателя ΔQ_{Π} в функции уровня материала в бункере h , измеряемого датчиком уровня ДУ.

Статическая характеристика регулятора системы приведена на рис. 2.5.

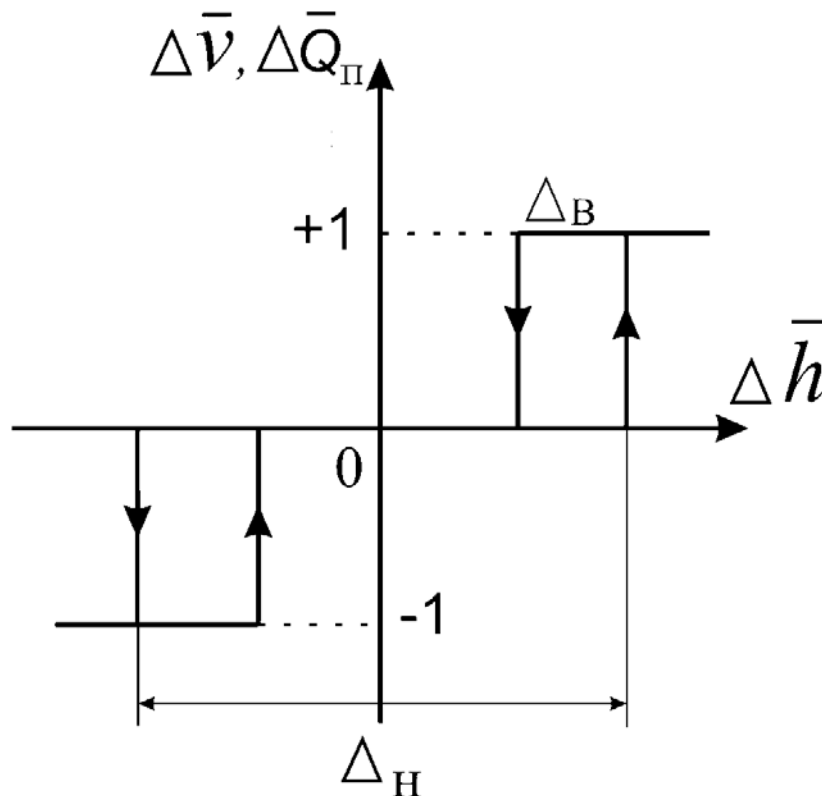


Рис. 2.5. Статическая характеристика трехпозиционного регулятора: Δ_B , Δ_H – зоны возврата и нечувствительности регулятора

Принимая в качестве номинальных (заданных) величин значения уровня материала в бункере $h_{\text{зад}} = h_0$, скорости ленты $v_{\text{зад}} = v_0$ и производительности питателя $Q_{\text{пзад}} = Q_{\text{по}}$, получим в относительных единицах сигналы на входе и выходе регулятора в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \bar{h} &= \frac{h - h_0}{h_0}, \\ \Delta \bar{v} &= \frac{v - v_0}{v_0}, \\ \Delta \bar{Q}_{\Pi} &= \frac{Q - Q_{\Pi 0}}{Q_{\Pi 0}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

При изменении входного грузопотока изменяется уровень материала в бункере. При этом система изменяет скорость ленты и производительность питателя согласно выражениям:

$$\left. \begin{aligned} v &= v_0 \pm \Delta v, \\ Q_{\Pi} &= Q_{\Pi 0} \pm \Delta Q_{\Pi} \end{aligned} \right\}, \quad (2.10)$$

поддерживая тем самым приблизительно к заданной погонную загрузку ленты конвейера.

2.3. Автоматическое регулирование натяжения лент конвейеров

Автоматическое управление натяжением ленты конвейера позволяет обеспечить работу его привода без пробуксовки, которая может вызвать быстрый износ и даже возгорание ленты, и исключить длительные перенапряжения ленты, снижающие срок ее службы.

Автоматическое регулирование натяжения сбегавшей ветви $S_{сб}$ ленты может быть обеспечено применением различных САР натяжения:

- Программной САР с изменением натяжения в функции времени: $S_{сб} = f(t)$;
- Следящей САР с изменением натяжения сбегавшей ветви в функции натяжения ленты в точке набегания на приводной барабан: $S_{сб} = \varphi(S_{нб})$;
- Стабилизирующей САР, поддерживающей натяжение на постоянном заданном уровне: $S_{сб} = S_{сб\text{зад}} = \text{const}$.

Функциональная структура программной САР натяжения представлена на рис. 2.6. Автоматическое натяжное устройство представляет собой САР натяжения сбегающей ветви.

На схеме обозначено:

1, 2, 3 – отклоняющий, натяжной и приводной барабаны;

ПЗ – программный задатчик натяжения ленты, обеспечивающий на время пуска конвейера увеличение задания в 1,3–1,5 раза по сравнению с заданием для установившегося режима работы;

ДН, РН – датчик и регулятор натяжения ленты;

ПН – привод натяжного устройства.

В качестве датчика натяжения $S_{сб}$ могут быть использованы магнитострикционные и динамометрические преобразователи, измеряющие усилия в элементе механической связи привода ПН с барабаном 2.

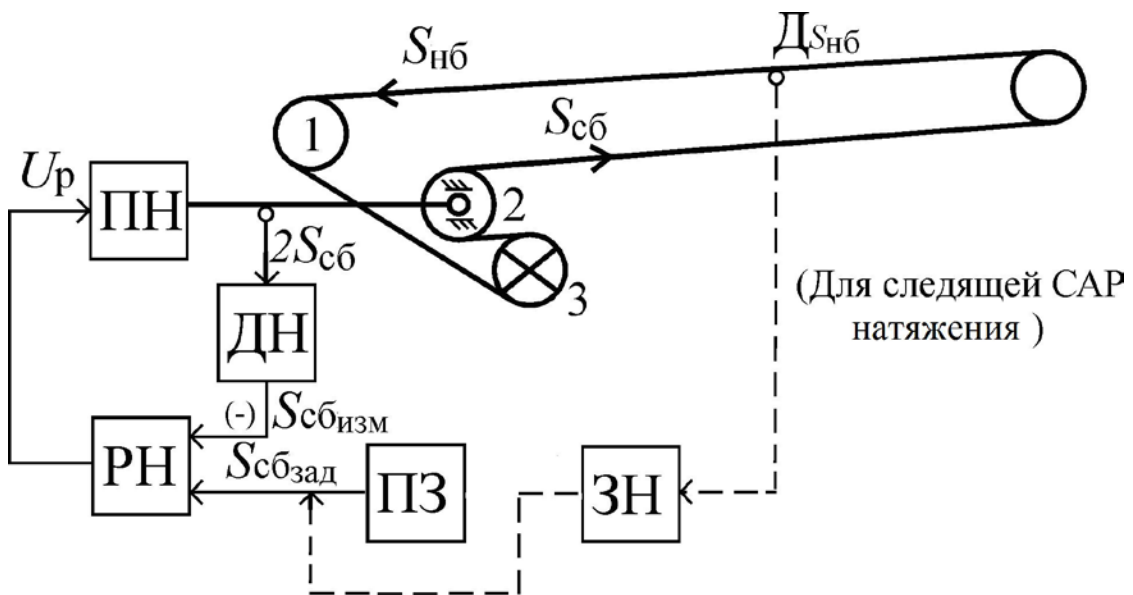


Рис. 2.6. Программная САР натяжения лены

Для реализации следящей САР натяжения следует в рассмотренной системе (см. рис. 2.6) заменить программный задатчик ПЗ на задатчик натяжения ЗН, формирующий сигнал задания в виде функции:

$$S_{\text{сбзад}}(t) = \frac{S_{\text{нб}}(t)}{e^{\mu\alpha}}, \quad (2.11)$$

где μ – коэффициент трения ленты с барабаном;

α – угол обхвата лентой приводного барабана 3.

Следящая САР является наиболее эффективной системой автоматического управления натяжением ленты. Однако ее реализация затруднена вследствие отсутствия надежного датчика натяжения набегающей ветви ленты.

2.4. Системы дистанционно-автоматического управления конвейерными линиями

Основные функции, выполняемые системами дистанционно-автоматического управления конвейерными линиями (СДАУ КЛ):

- Автоматический пуск/останов КЛ по команде оператора;
- Автоматическое управление натяжным устройством, тормозом, оросительным устройством, сиреной на каждом конвейере;
- Экстренный останов КЛ с любой точки трассы;
- Автономное управление маршрутами КЛ оператором;
- Автоматический контроль и защита конвейеров:
 - от недопустимого снижения скорости ленты (≥ 25 % от $v_{\text{ном}}$);
 - схода и обрыва ленты;
 - заштыбовки мест перегрузки;
 - недопустимого проскальзывания ленты по приводному барабану;
 - перегрева приводных барабанов и подшипников;
 - аварийного натяжения лент;
 - затяжного пуска каждого из конвейеров линии;
- Сигнализация звуковая предупредительная (предпусковая), аварийная и оперативная звуковая и световая;

- Информация, предоставляемая оператору, о работающих маршрутах либо количестве включенных конвейеров и о причинах их аварийного отключения;
- Связь двухсторонняя телефонная и оперативно-кодовая со звуковыми сигналами.

Обобщенная структурная схема действующих в настоящее время аппаратных СДАУ КЛ представлена на рис. 2.7.

На схеме приняты следующие обозначения:

К1, К2, К3 – конвейеры;

БУ – блок управления конвейером;

ПУ – пульт управления конвейерной линией;

Т – телефонная трубка;

С – сирена;

ЛС – линия связи четырехпроводная;

$\bar{K}$ – вектор сигналов аналоговых и дискретных датчиков (вектор контролируемых параметров конвейера);

$\bar{Y}$ – вектор дискретных сигналов управления конвейером (вектор сигналов управления приводами и исполнительными устройствами конвейера).

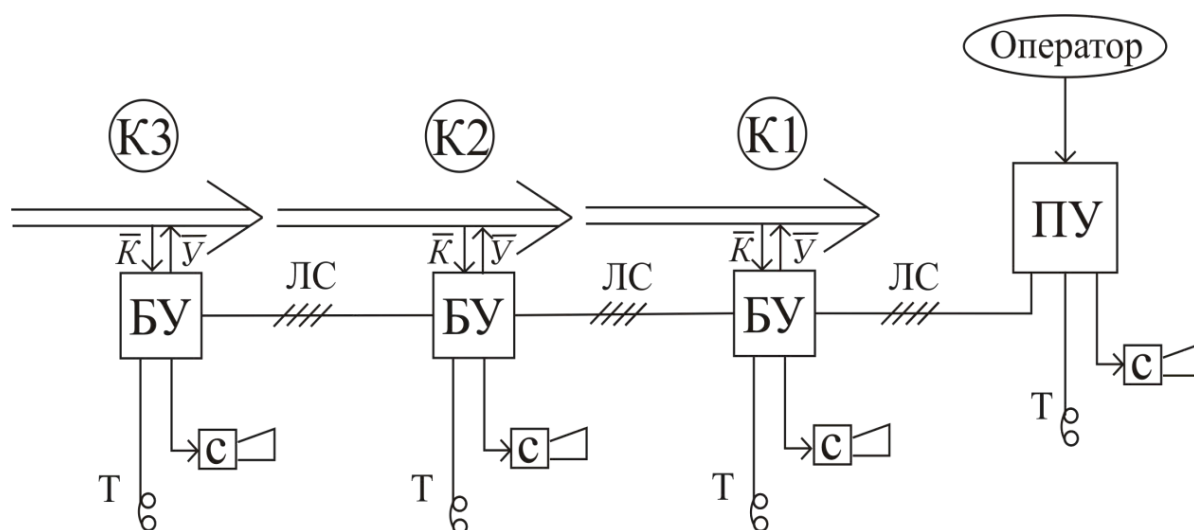


Рис. 2.7. Обобщенная структура аппаратной СДАУ КЛ

На рис. 2.8 показаны компоненты (сигналы) векторов $\bar{K}$ и $\bar{Y}$.

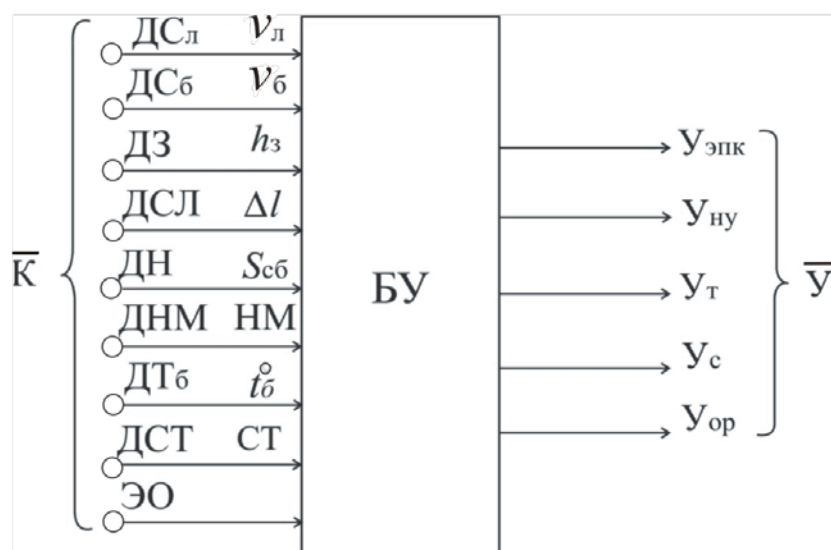


Рис. 2.8. Входные и выходные сигналы блока управления конвейером

На схеме обозначено:

$v_{л}$, $v_{б}$, $h_{з}$, Δl , $S_{сб}$, НМ, $t_{б}^{\circ}$, СТ, ЭО – сигналы датчиков контролируемых параметров конвейера соответственно скорости ленты ДС_л, скорости барабана ДС_б, заштыбовки ДЗ, схода ленты ДСЛ, натяжения сбегавшей ветви ленты ДН, наличия материала на ленте НМ, температуры барабана ДТ_б, состояния тросов ленты ДСТ, экстренного останова конвейера ЭО;

$У_{эпк}$, $У_{ну}$, $У_{т}$, $У_{с}$, $У_{ор}$ – дискретные сигналы управления приводами конвейера и исполнительными устройствами соответственно: электроприводом конвейера, электроприводом натяжного устройства, электромагнитом привода тормоза, сиреной и электромагнитным клапаном орошения.

Для технической реализации аппаратных систем дистанционно-автоматического управления КЛ отечественные производители поставляют на рынок:

- Комплектную аппаратуру автоматизации для разветвленных КЛ типа УКЛ и неразветвленных КЛ типа АУК 1М;
- Датчики скорости типа ДКС и БКВ, заштыбовки ДЗ, кабель-тросовые выключатели КТВ-2, датчики схода ленты КСЛ-2 и др.;

- Локальные устройства автоматизации конвейеров, в частности: устройство контроля скорости и проскальзывания ленты УКПС, устройство контроля скорости УКС, устройство контроля и информации УКИ, реле контроля уровня заполнения емкостей РКУ и др.

Повышение эффективности конвейерного транспорта на современном этапе его развития обеспечивается широким внедрением компьютерных информационных технологий на базе микропроцессорной техники.

Применение компьютерных систем для дистанционного управления конвейерными линиями позволяет:

- Сократить состав аппаратуры автоматизации за счет использования многофункциональных микропроцессорных контроллеров;

- Повысить надежность работы и реализовать самодиагностику системы автоматизации. Это позволяет увеличить пропускную способность конвейерных линий;

- Реализовать дополнительные функции управления, в частности: стабилизировать погонную загрузку и осуществить ускоренный пуск протяженной линии в случае оснащения конвейеров регулирующими электроприводами, а также применения управляемых усредняющих бункеров. Это позволяет сократить износ лент и расход электроэнергии при неравномерных грузопотоках;

- Существенно увеличить объем и качество информации о работе конвейеров, предоставляемой оператору (диспетчеру) компьютером. Это позволяет оператору выбрать и реализовать оптимальную стратегию управления конвейерным транспортом: максимально сократить простои источников грузопотоков и минимизировать затраты на транспортирование единицы массы груза.

Управляющая часть компьютерной системы управления конвейерной линией представляет собой сеть микропроцессорных контроллеров (МК), сопряженных с управляющим компьютером оператора. При этом каждый МК решает задачи локального управления отдельным конвейером. Верхний уровень системы

управления – это автоматизированное рабочее место оператора. Управляющий компьютер решает задачи оптимизации, координированного управления конвейерами и визуализации их функционирования.

Структура компьютерной системы управления неразветвленной конвейерной линией, ленточные конвейеры которой имеют нерегулируемые электроприводы, натяжные устройства и тормоза дискретного действия, представлена на рис. 2.9. На схеме приняты следующие обозначения:

УК – управляющий компьютер (персональный или промышленный);

МБУ – микропроцессорный блок управления конвейером;

МК – микропроцессорный контроллер;

МС, МЗ – модули соответственно контроля скорости и завала ленты;

МП – модуль питания;

RS 485 – интерфейсный модуль;

ЗС, СС – звуковой и световой сигнализаторы;

RS 232/485, RS 485/232 – встроенный в компьютер преобразователь интерфейсов;

П, ПН, ПТ – пускатели соответственно электродвигателей конвейера и натяжной лебедки и электромагнита тормоза;

Т – электромагнитный тормоз;

М – электродвигатель конвейера;

НУ – натяжное устройство (электродвигатель – редуктор – лебедка);

ДС, ДЗ, ДЛ, ДН, ДО, ДТ, ДЭ – датчики соответственно скорости, завала и схода ленты, аварийного натяжения ленты, экстренного останова конвейера, включения тормоза, срабатывания электрической защиты.

В качестве датчика скорости используется типовой датчик ДКС, представляющий собой синхронный тахогенератор, приводимый в действие движущейся лентой. Датчик ДЗ – электронный, а датчики ДЛ (КСЛ-2), ДН (динамометр с двумя контактами, первый из которых срабатывает при недопустимо низком, а второй – при недопустимо высоком натяжении ленты), ДТ (концевой выключатель) и ДЭ (реле срабатывания электрозащиты) являются электроконтактными датчиками дискретного действия.

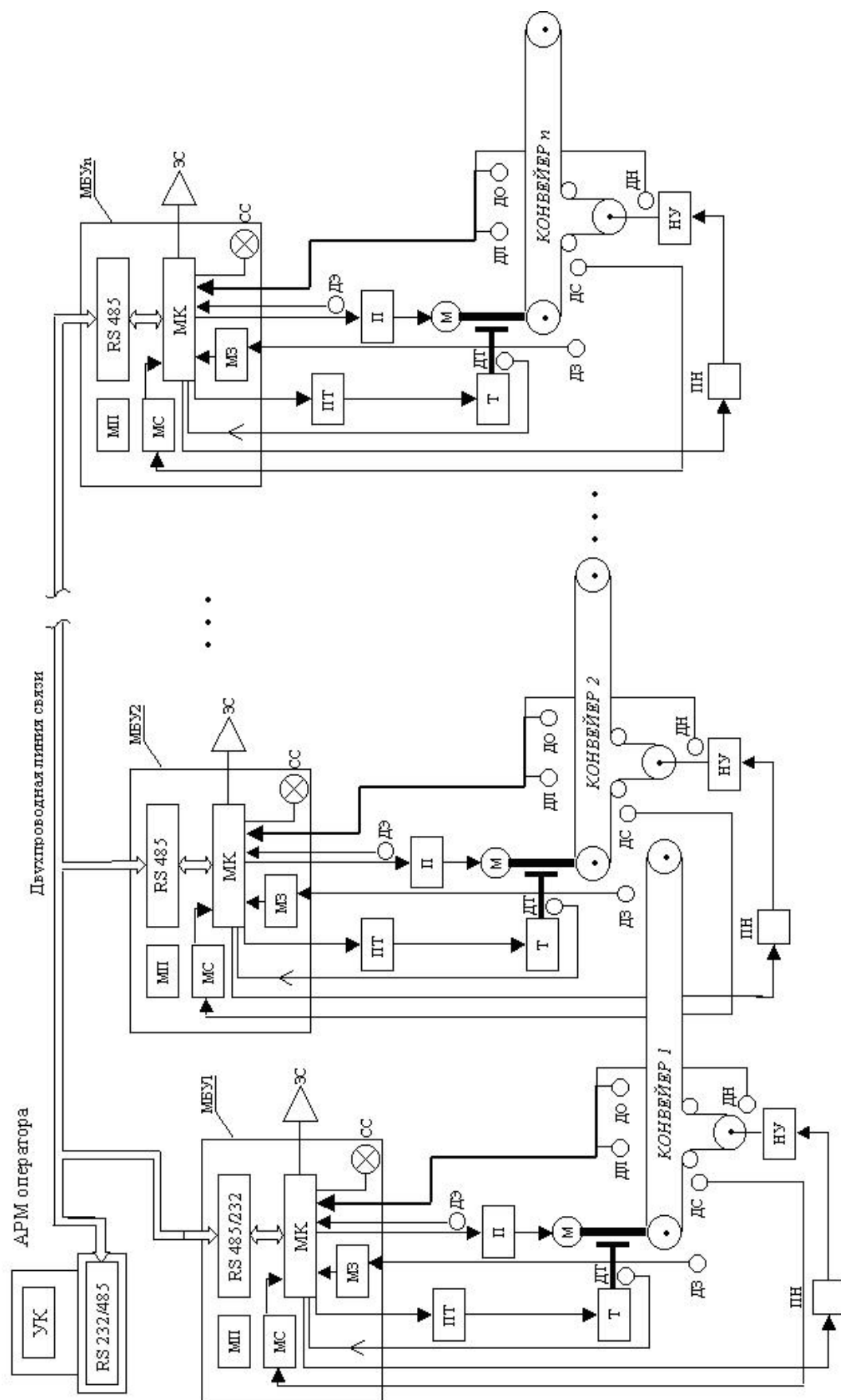


Рис. 2.9. Структурная схема компьютерной системы автоматизации конвейерной линии

Для формирования дискретных сигналов контроля скорости и завала ленты используются модули МС и МЗ (рис. 2.10). Модуль скорости формирует два выходных сигнала: первый из них $U_{\text{вых1}}$ используется для управления тормозом при пуске/останове конвейера, а второй $U_{\text{вых2}}$ – для управления последовательным пуском конвейеров линии и аварийного отключения конвейера при недопустимом снижении скорости движения ленты. Модуль завала ленты формирует сигнал $U_{\text{вых}}$ на отключение конвейера при достижении уровня заполнения ленты заданного значения.

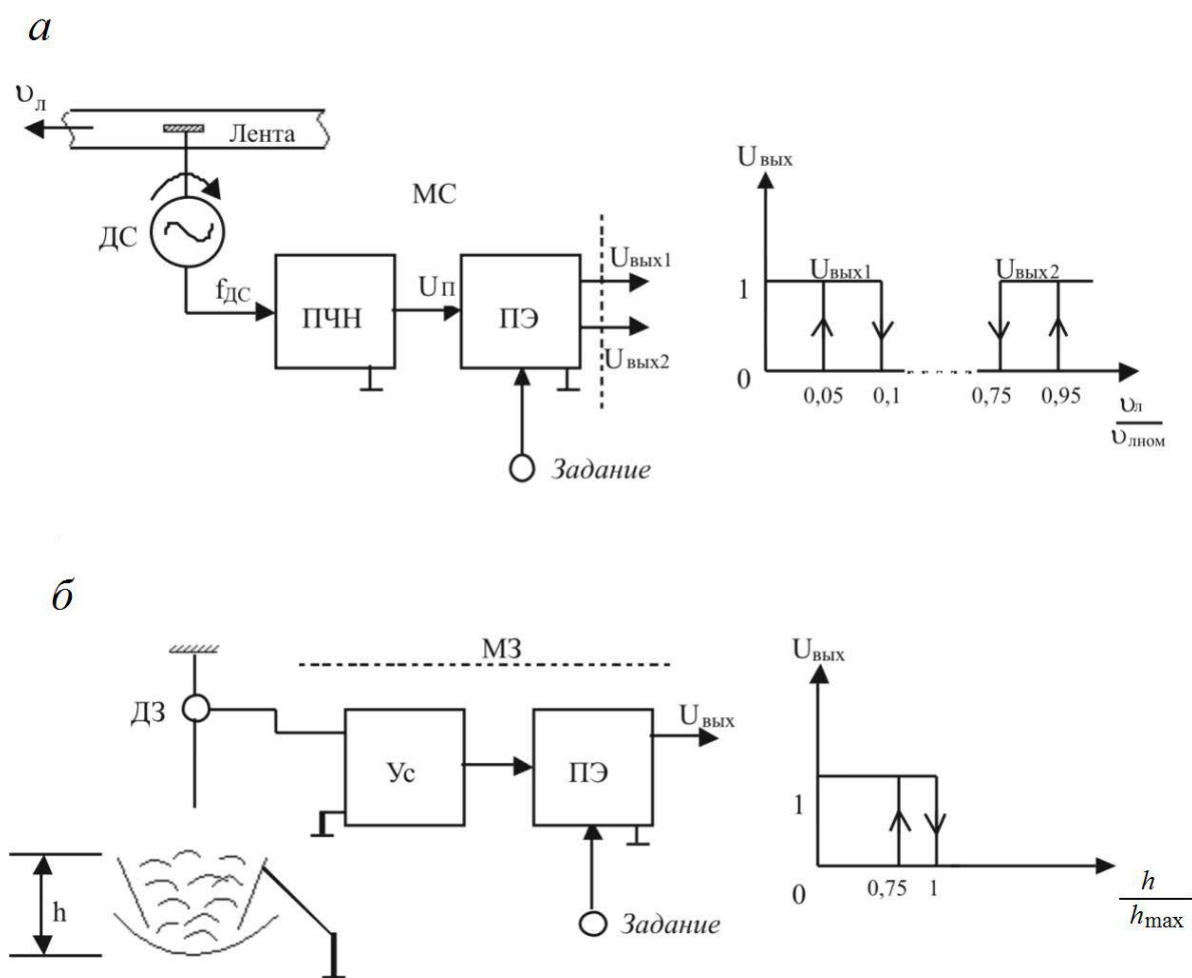


Рис. 2.10. Структура и статические характеристики каналов контроля скорости движения ленты (*а*) и завала конвейера в точке перегрузки (*б*)

На схеме приняты следующие обозначения:
 ДС, ДЗ – датчики скорости и завала ленты;

ПЭ – пороговый элемент;

ПЧН – преобразователь частоты в напряжение;

U_C – усилитель;

$f_{ДС}$ – частота выходного напряжения ДС;

$U_{П}$ – постоянное напряжение на выходе ПЧН, пропорциональное $f_{ДС}$;

$v_{Л}$, $v_{Л\text{ ном}}$ – фактическая и номинальная скорости движения ленты;

h , $h_{\text{зад}}$ – фактический и заданный уровни заполнения ленты материалом в точке перегрузки.

Цифровой канал связи управляющего компьютера с микроконтроллерами конвейеров включает в себя встроенный в компьютер преобразователь интерфейсов RS 232/485, интерфейсные модули RS 485 микропроцессорных блоков управления и линию связи – витую пару проводников.

Система управления, включающая в себя датчики, вычислительную сеть и пусковую аппаратуру, обеспечивает выполнение следующих требований.

- Управление:
 - выбор режима управления: дистанционно-автоматический от компьютера оператора или местный от микропроцессорных блоков конвейера;
 - автоматический последовательный пуск/останов конвейеров в линии в функции скорости с корректировкой по времени;
 - автоматическое управление натяжным устройством каждого конвейера путем увеличения натяжения ленты на время пуска на 30–50 % от рабочего натяжения;
 - автоматическое управление тормозом каждого конвейера в функции скорости ленты: тормоз включается при скорости $0,05 v_{Л\text{ ном}}$ и ниже, а при скорости ленты $0,1 v_{Л\text{ ном}}$ и выше отключается;
 - экстренный останов конвейерной линии с любой точки трассы по команде эксплуатационного персонала воздействием на датчик экстренного останова;
- Автоматическая защита конвейеров путем отключения аварийного конвейера и всех последующих за ним в направлении против грузопотока в следующих ситуациях:

- снижение скорости ленты на 25 % от номинального значения;
- аварийное натяжение ленты;
- завал ленты в точке перегрузки;
- сход ленты, вызывающий сброс с конвейера транспортируемого материала;
- срабатывание электрической защиты в пускателе конвейера;
- затянувшийся пуск конвейера (время пуска превышает заданное значение);
- Контроль, сигнализация, индикация:
 - непрерывное измерение скорости движения ленты каждого конвейера;
 - контроль времени звучания предупредительной и аварийной сигнализации и времени пуска каждого конвейера;
 - предупредительная звуковая сигнализация по линии перед ее включением в работу либо пуском любого конвейера;
 - местная сигнализация о режиме управления (световая) и аварийном отключении конвейера (обезличенная звуковая и световая с указанием причины аварийного отключения);
 - индикация на мониторе оператора мнемосхемы конвейерной линии с анимацией движения элементов конвейеров, расшифровкой причин аварийного отключения конвейеров как в графической форме (изменением цвета конвейера на мнемосхеме), так и в текстовой форме с соответствующими комментариями;

- Документирование истории процесса управления.

Принцип действия системы заключается в следующем. Управляющий компьютер, получив от оператора команду «Пуск линии», используя информацию о состоянии и параметрах работы конвейеров, формирует и передает поочередно команды «Пуск конвейера» микропроцессорным контроллерам, которые обеспечивают реализацию этих команд. Аналогично осуществляется оперативный останов конвейерной линии. Аварийное отключение конвейера осуществляется соответствующим МК по сигналам датчиков этого конвейера. Отключение последующих за аварийным конвейеров выполняется микроконтроллерами по командам управляющего компьютера.

Важнейшими элементами системы управления являются микропроцессорные блоки МБУ, осуществляющие функции локального контроля, управления защиты и сигнализации конвейеров. На рис. 2.11 представлен сравнительно простой, недорогой и надежный вариант реализации МБУ.

Принципиальная схема микропроцессорного блока управления конвейером содержит следующие основные элементы:

H1–H10 – сигнальные светодиоды, включение которых означает:

- H1* – ручной (местный) режим управления (РУЧ);
- H2* – автоматический от УК режим управления (АВТ);
- H3* – аварийное снижение скорости ленты (СС);
- H4* – сход ленты (СЛ);
- H5* – завал конвейера в точке перегрузки (ЗК);
- H6* – экстренный останов (ЭО);
- H7* – аварийное натяжение ленты (АН);
- H8* – срабатывание электрической защиты (СЭЗ);
- H9* – тормоз включен (ТВ);
- H10* – затянувшийся пуск конвейера (ЗП);

K1–K4 – реле управления соответственно пускателями конвейера П, натяжной лебедки ПН, тормоза ПТ и звуковым сигнализатором ЗС;

VT1–VT4 – транзисторы для управления реле *K1–K4*;

A1, A2 – модули контроля соответственно скорости и завала ленты;

DD1, DD2 – микросхемы типа КР1533АП6, представляющие собой 8-разрядные двунаправленные шинные трансляторы;

DD3 – микроконтроллер типа АТ89С51;

ZQ1 – кварцевый резонатор, задающий тактовую частоту МК, равную 11059 кГц;

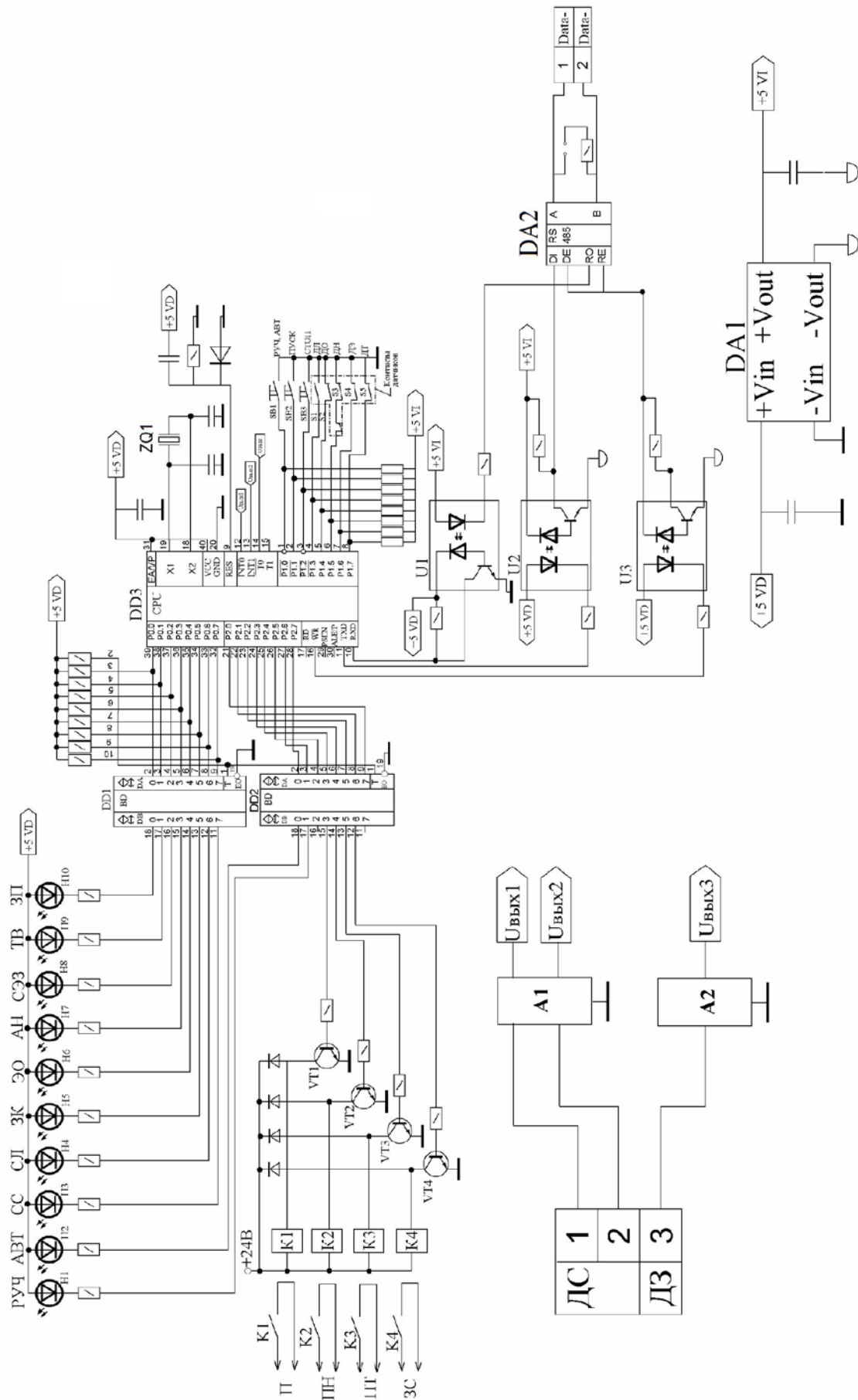
U1–U3 – оптопары типа 6N136 гальванической развязки;

DA1 – микросхема типа Р6АУ-0505;

DA2 – преобразователь интерфейса RS 232/485 на микросхеме ADAM485;

SB1 – кнопка выбора режима управления РУЧ или АВТ;

SB2, SB3 – кнопки местного управления конвейером.



На принципиальной схеме МБУ показано также подключение к МК контактов S1-S5 дискретных датчиков соответственно схода ленты ДЛ, экстренного останова ДО, аварийного натяжения ленты ДН, срабатывания электрозащиты ДЭ и включения тормоза ДТ.

Микроконтроллер, кроме локального управления конвейером, передает УК по его запросу через цифровой канал связи данные о состоянии датчиков, модулей контроля, времени пуска и выбранном режиме управления, которые используются УК для формирования команд управления конвейерами, отображения на экране монитора информации о состоянии линии и документирования процесса транспортирования.

Автоматизированные системы управления конвейерным транспортом

Современные автоматизированные системы управления конвейерным транспортом (АСУ КТ) создают на принципе распределенного управления с двумя уровнями управления:

- Уровень конвейера (контроллерный уровень);
- Уровень конвейерной транспортной системы (диспетчерский/операторский уровень).

Рассмотрим принципы построения распределенной АСУ КТ, включающей в себя следующее технологическое оборудование (рис. 2.12):

- Магистральный конвейер МК с регулируемым электроприводом;
- Промежуточные емкости (бункеры Б1, Б2) с регулируемой по производительности питателями;
- Маршрутные конвейеры К1, К2, ..., К6 (два маршрута М1, М2) с нерегулируемыми электроприводами;
- Источники грузопотоков И1, И2 (две лавы).

Система управления для рассматриваемого примера КТ будет содержать следующие основные элементы (см. рис. 2.12):

- УК – управляющий компьютер;
- ПЛК – программный логический контроллер;
- ПС – промышленная сеть (*ModBus*, *ProfiBus* и т.п.);

- Датчики (на схеме не показаны).

Сигналы в системе управления:

$\bar{K}, \bar{Y}$ – векторы контролируемых параметров (сигналов и датчиков) и управляющих воздействий (сигналов управления);

v, Q – скорость и грузопоток ленты МК;

$Q_{зп1}, Q_{зп2}, Q_{п1}, Q_{п2}$ – грузопотоки (производительности) подбункерных питателей (заданные и фактические);

Q_1, Q_2 – грузопотоки источников И1, И2;

h_1, h_2 – уровни заполнения бункеров Б1, Б2;

$v_{зад}$ – заданная скорость движения ленты МК;

$\bar{Y}_M$ – вектор командных сигналов управления маршрутами движения грузопотоков;

$\bar{Y}_{МК}$ – команды управления магистральным конвейером (пуск/стоп).

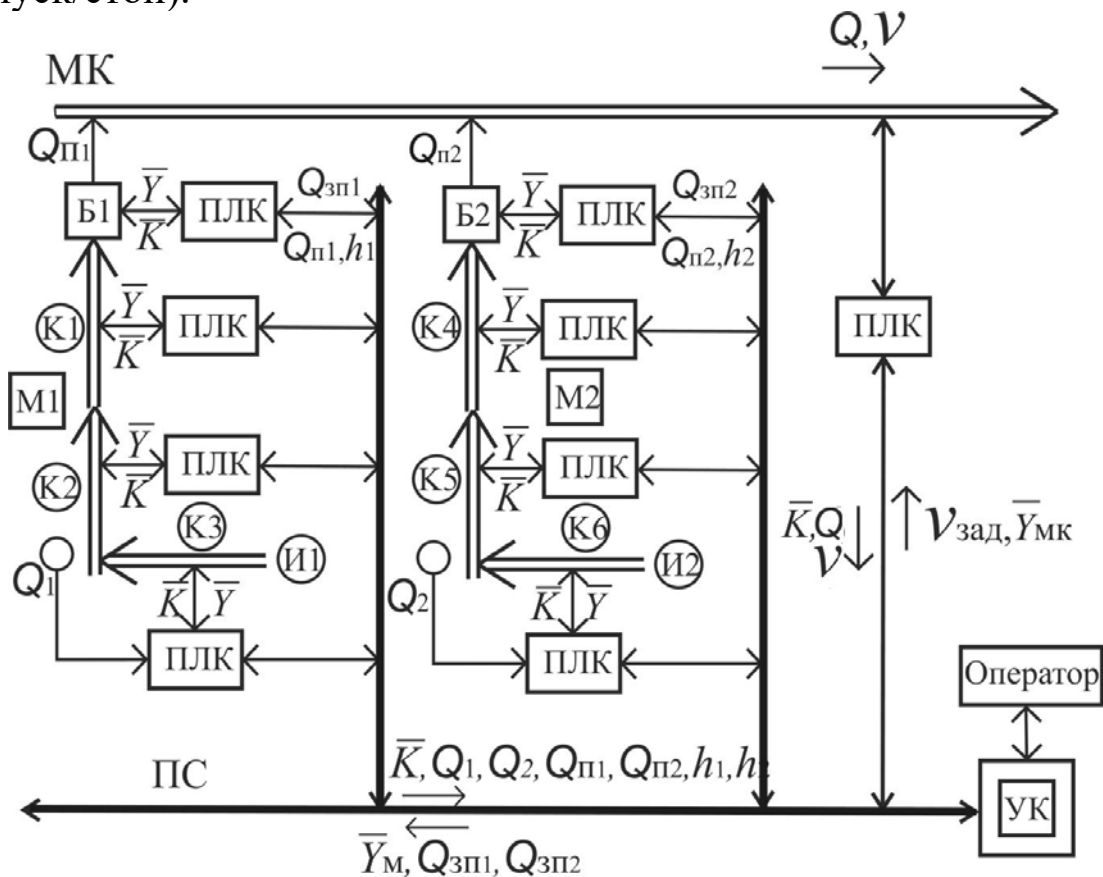


Рис. 2.12. Распределенная АСУ конвейерным транспортом

Система реализует оптимальное управление КТ по критерию минимальных затрат на транспортирование единицы груза за счет регулирования скорости МК и производительности подбункерных питателей и обеспечивает максимальное использование аккумулярующей способности конвейерной линии за счет прогнозирования грузопотоков.

УК, получая информацию от датчиков о состоянии конвейеров, о грузопотоках Q_1, Q_2 , о производительности питателей $Q_{П1}, Q_{П2}$, грузопотоке и скорости магистрального конвейера Q, v , в соответствии с принятым критерием оптимизации работы КТ формирует заданную скорость движения МК и заданные производительности подбункерных питателей $Q_{ЗП1} = Q_{ЗП2}$.

3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ДРОБЛЕНИЯ И СОРТИРОВКИ

3.1. Задачи автоматизации процессов дробления и сортировки

Основные технологические процессы дробильно-сортировочных предприятий по переработке нерудных строительных материалов (производство щебня, гравия, песка) – это дробление, сортировка и транспортировка.

Для дробления применяются щековые, конусные, валковые и молотковые дробилки, для сортировки – грохоты, центрифуги, для транспортировки – питатели тарельчатые, вибрационные и пластинчатые, конвейерные линии, трубы. В комплекс этих машин, образующих поточно-транспортную систему (ПТС), входят приемные, промежуточные и складские бункеры и штабели.

Автоматизация технологических процессов дробильно-сортировочных заводов (баз, фабрик) должна решить следующие задачи:

- Автоматический контроль состояния оборудования, направления грузопотоков, загрузки емкостей, наличия материала в транспортных средствах, запыленности помещений и работы вентиляционных установок;
- Учет работы машин, исходного материала и готовой продукции по фракциям;
- Автоматическое управление пуском и остановкой в заданной последовательности технологического оборудования, процессом отгрузки готовой продукции и системой обеспыливания и аспирации;
- Автоматическое регулирование загрузки дробильно-сортировочных агрегатов и технологических поточных линий, оптимизация режимов работы технологического оборудования;
- Автоматическая защита от перегрева подшипников, перегрузки первичной дробилки, прорыва сит на грохотах, попадания металлических предметов в дробилку, переполнения течек, желобов и бункеров;

- Блокировка и защита в ПТС при повреждении одного из механизмов, предупредительная сигнализация.

На дробильно-сортировочных заводах (ДСЗ) щековые дробилки крупного дробления являются головными агрегатами ПТС по переработке материала. Задача автоматизации такой дробилки сводится к поддержанию заданной производительности ПТС. На конечных стадиях ПТС дробильно-сортировочных заводов используются конусные дробилки мелкого дробления, предназначенные для обеспечения определенного гранулометрического состава готового продукта.

На горных предприятиях в некоторых случаях возникает необходимость в подготовке горной массы перед погрузкой ее на транспортные устройства (скипы, конвейеры). Для этого используют дробильные установки, оснащенные щековыми или конусными дробилками. Автоматика таких дробильных установок должна обеспечивать: а) контроль уровня горной массы в приемном и загрузочном бункерах; б) контроль за параметрами смазки; в) управление пуском двигателей; г) регулирование загрузки дробилки.

В общем случае регулирование загрузки дробилки необходимо, чтобы не допустить возникновения аварийных ситуаций вследствие случайных изменений крепости и крупности горной массы. Такое регулирование может выполняться непрерывно при использовании питателей с регулируемым приводом и дискретно, когда привод питателя нерегулируемый.

3.2. Автоматическое регулирование процесса дробления

Доставляемая из карьера горная масса подвергается на дробильной установке механической обработке.

Процесс дробления как объект управления представлен на рис. 3.1.

Процесс дробления можно оценить по ряду выходных параметров, таких как потребляемые ток I и мощность N приводного двигателя, производительность дробилки Q_d , уровень заполнения камеры дробления h . В качестве управляющих воздействий выступают производительность питателя Q_{Π} , подающего мате-

риал в камеру дробления, и размер разгрузочной щели b . Внешние возмущающие воздействия (крупность D и прочность σ исходного материала) носят случайный характер.

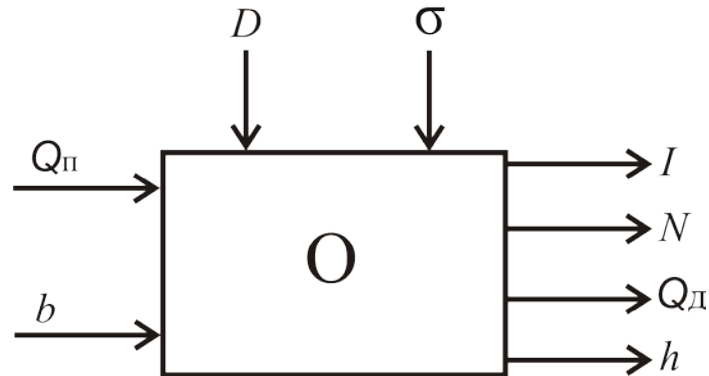


Рис. 3.1. Дробилка как объект регулирования

Главная цель автоматизации процесса дробления сводится к максимальному использованию мощности, передаваемой на дробление, при ограничениях на производительность дробилки и гранулометрический состав дробленого продукта. Простейшие системы управления дробильными агрегатами строятся по принципу стабилизации одного из выходных параметров дробилки. К таким системам относятся одноконтурные САУ уровня заполнения камеры дробления, тока (мощности) приводного двигателя с использованием в качестве управляющего воздействия производительности питателя. САУ уровня горной массы в дробилке позволяет исключить ее переполнение в режиме работы с максимальной производительностью. Однако в такой системе не обеспечивается защита главного двигателя дробилки от перегрузки, невозможно регулировать производительность дробилки.

САУ процессом дробления, построенная на принципе стабилизации тока (мощности) в статорной цепи приводного двигателя дробилки, обеспечивает наибольшую производительность при дроблении прочных материалов. При слабых породах в такой системе управления загрузкой может происходить переполнение (завал) дробилки или приемного устройства, в которое поступают продукты дробления.

Наиболее целесообразным является комбинированное регулирование загрузки дробилки. Вариант САУ процессом дробления, поддерживающий заданное значение весовой производительности щековой дробилки и ограничивающий уровень материала в камере дробления и ток электродвигателя дробилки, представлен на рис. 3.2.

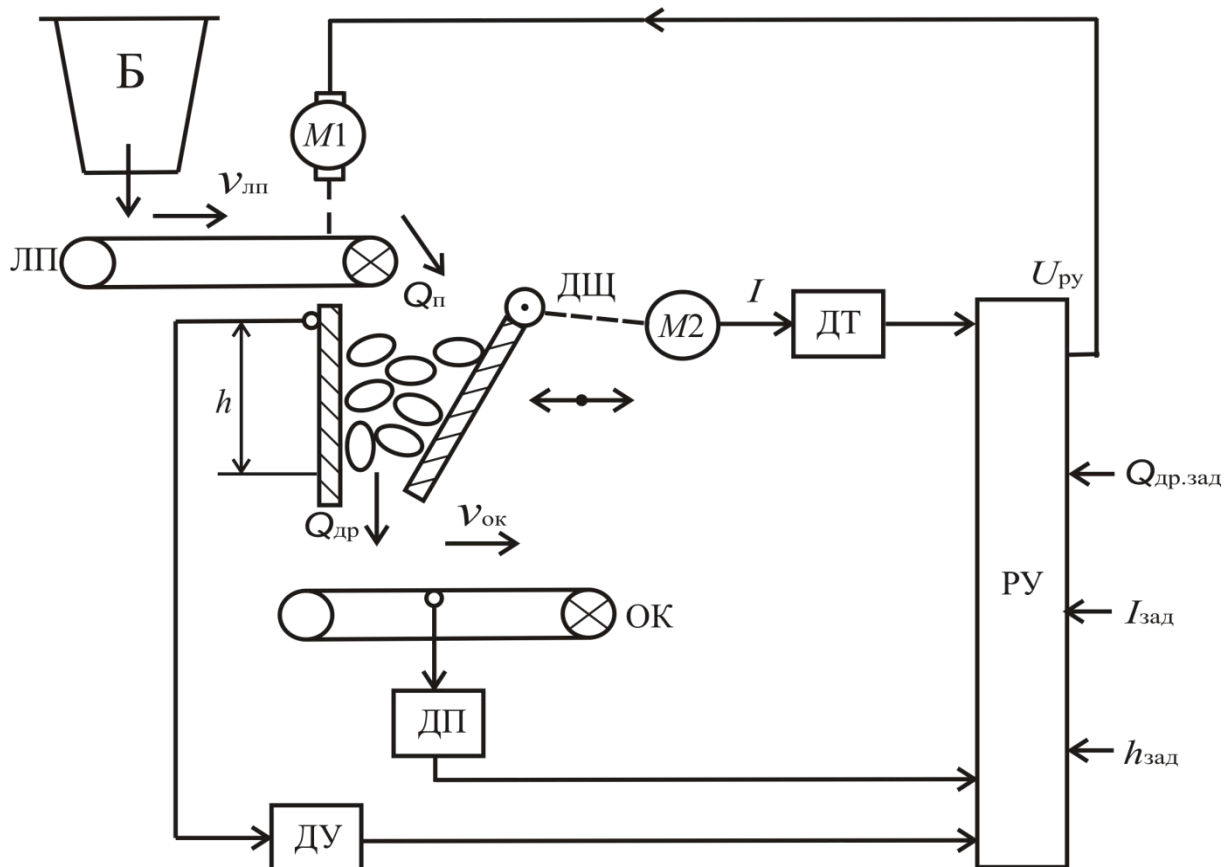


Рис. 3.2. Структурная схема автоматического управления процессом дробления (вариант системы): Б – бункер; ЛП – ленточный питатель с регулируемым приводом; ДЩ – дробилка щековая; ОК – отгружающий конвейер; ДП, ДТ, ДУ – датчики соответственно производительности дробилки $Q_{\text{др}}$, тока двигателя I и уровня h заполнения камеры дробилки; РУ – регулирующее устройство; M1, M2 – электродвигатели питателя и дробилки; $Q_{\text{п}}$ – производительность питателя; $Q_{\text{др.зад}}$, $I_{\text{зад}}$, $h_{\text{зад}}$ – заданные значения соответственно производительности, тока двигателя и уровня заполнения дробилки; $U_{\text{ру}}$ – сигнал регулирующего устройства

Дробильная установка в рассматриваемом варианте включает в себя бункер, ленточный питатель с регулируемым электроприводом постоянного тока, щековую дробилку с нерегулируемым асинхронным электроприводом и отгружающий конвейер. В качестве датчика производительности используются электро-тензометрические конвейерные весы, датчика уровня – фотоэлектрический уровнемер (осветитель с фотодатчиком), датчика тока – датчик нагрузки, чувствительным элементом которого является трансформатор тока, включаемый в статорную цепь асинхронного двигателя дробилки. Регулирующее устройство может быть выполнено на базе магнитного усилителя.

Переходные процессы в дробилке, работающей с постоянной частотой ω и амплитудой A качания щеки, можно описать, используя уравнение материального баланса:

$$\frac{dM}{dt} + Q_{\text{др}} = Q_{\text{п}},$$

где $Q_{\text{др}}, Q_{\text{п}}$ – производительность соответственно дробилки и питателя, т/ч; M – запас материала в дробилке, т.

Запас материала в дробилке обуславливает инерционность аппарата. Дифференциальное уравнение дробилки по параметрам h и $Q_{\text{п}}$ имеет вид

$$T_0 \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = K_0 \Delta Q_{\text{п}},$$

где $T_0 = \gamma S_{\text{ном}} / m = M_{\text{ном}} / Q_{\text{др.ном}}$ – постоянная времени, характе-

ризующая способность дробилки накапливать и расходовать материал; γ – плотность материала, т/м³; $S_{\text{ном}}$ – площадь верхнего сечения пасти дробилки, м²; $m = \frac{\Delta Q_{\text{др}}}{\Delta h}$ – коэффициент пропорци-

ональности, определяемый статической характеристикой дробилки (рис. 3.3); $K_0 = l/m$ – передаточный коэффициент.

Зависимость $Q_{\text{др}} = \varphi(h)$ нелинейна и имеет ограничения по уровню h_{max} и производительности $Q_{\text{др max}}$ при данных частоте вращения вала и амплитуде A колебаний щеки дробилки.

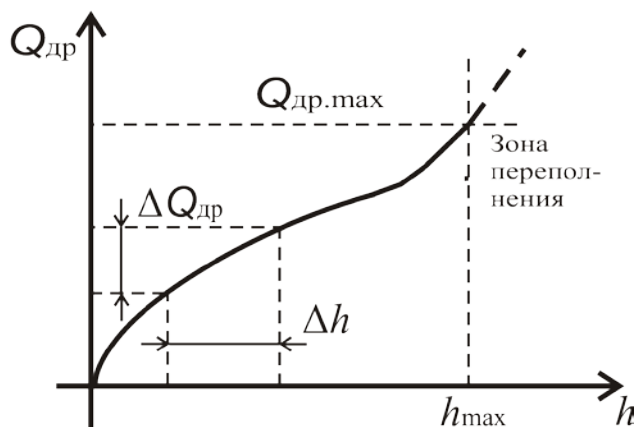


Рис. 3.3. Статическая характеристика щековой дробилки

Передаточная функция щековой дробилки по каналу $Q_{\Pi} - h$ имеет вид

$$W_{01}(p) = \frac{\Delta h(p)}{\Delta Q_{\Pi}(p)} = \frac{K_0}{T_0 p + 1}.$$

Передаточная функция дробилки по каналу $Q_{\Pi} - Q_{\text{др}}$ с учетом запаздывания τ , обусловленного способом измерения $Q_{\text{др}}$ с помощью датчика производительности, установленного на отгружающем конвейере на некотором расстоянии $l_{\text{ДП}}$ от разгрузочной щели дробилки, может быть представлена выражением

$$W_{02}(p) = \frac{\Delta Q_{\text{др}}(p)}{\Delta Q_{\Pi}(p)} = e^{-p\tau},$$

где $\tau = \frac{l_{\text{ДП}}}{v_{\text{ок}}}$, с; $v_{\text{ок}}$ – скорость движения ленты отгружающего конвейера, м/с; $l_{\text{ДП}}$ – расстояние установки датчика ДП.

Алгоритмическая структурная схема системы автоматического регулирования процесса дробления щековой дробилки в линейном представлении приведена на рис. 3.4.

Регулирующее устройство РУ, питатель и электродвигатель дробилки ЭД представлены апериодическими звеньями с соответствующими передаточными коэффициентами и постоянными времени.

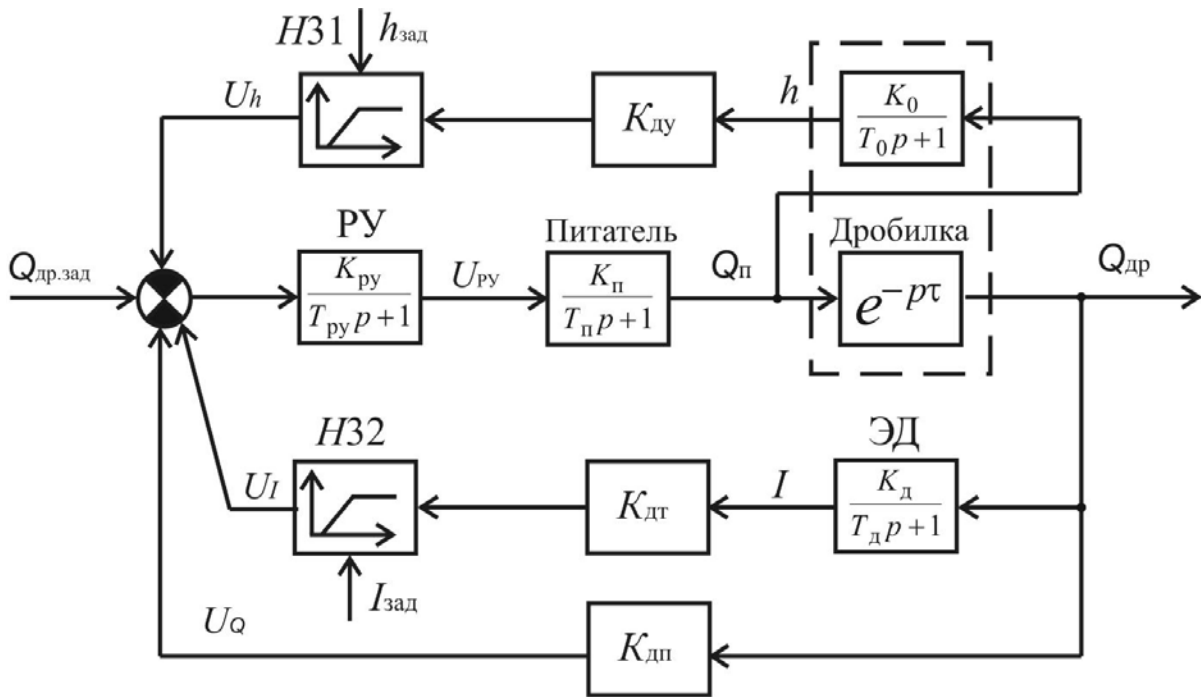


Рис. 3.4. Алгоритмическая структурная схема системы автоматического регулирования процесса дробления

Нелинейные звенья НЗ1 и НЗ2 отражают задержку действия обратных связей по уровню заполнения камеры дробления и току двигателя дробилки при текущих значениях этих параметров ниже их заданных значений. До высоты уровня горной массы $0,6 h_{\max}$ в камере дробления регулирование ведется только по производительности дробилки, при превышении этого уровня – по уровню загрузки и производительности.

При перегрузке двигателя дробилки $I > I_{\text{зад}}$ вступает в действие обратная связь по току и вызывает уменьшение подачи горной массы в дробилку. Таким образом, комбинированная САР процесса дробления обеспечивает требуемую производительность дробилки, защиту ее электродвигателя от перегрузки, исключает переполнение камеры дробления.

3.3. Автоматизация процесса сортировки

Сортировка дробленого материала по фракциям осуществляется виброгрохотами.

Конструктивная схема виброгрохота показана на рис. 3.5.

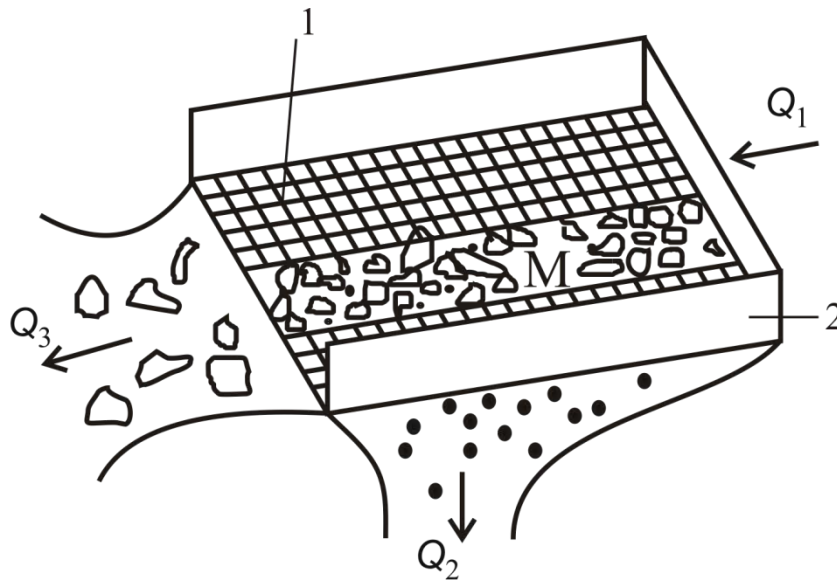


Рис. 3.5. Конструктивная схема виброгрохота:
1 – сито; 2 – короб

Автоматизация виброгрохотов включает в себя следующие задачи:

- Автоматический контроль и защита (отключение привода виброгрохота):
 - при обрыве сит (контроль состояния сит осуществляется при помощи проводников с током, протянутых через сита);
 - снижении угловой скорости дебаланса либо при увеличении зазора между дебалансом и магнитоиндукционным датчиком скорости вследствие растяжения или обрыва подвесок грохота;
- Автоматическое управление:
 - пуском виброгрохота по времени: сигнал на включение последующих машин подается через реле времени с уставкой 10 с, равной продолжительности пуска грохота;
 - орошением в местах перегрузки материала для обеспыливания помещений: вода в форсунки подается в зависимости от скорости движения ленты конвейера и от наличия материала на ней;
- Оптимизация процесса грохочения (сортировки материалов по фракциям) путем автоматического регулирования производительности по питанию грохота из промежуточного бункера либо параметров настройки самого грохота, например угла наклона корпуса с ситом, если грохот питается не из промежуточной емкости, а непрерывно из дробилки.

Рассмотрим принцип оптимизации процесса сортировки продуктов по фракциям (рис. 3.6) и зависимость выхода одного из них

$\gamma_A = \frac{Q_A}{Q}$ от производительности грохота по исходному продукту Q (рис. 3.7).

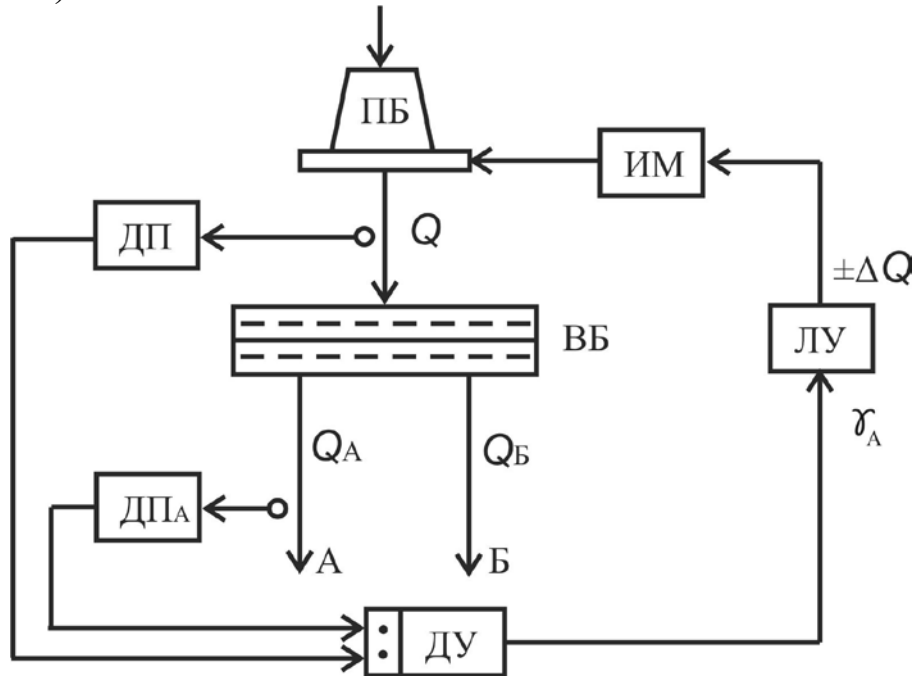


Рис. 3.6. Структурная схема оптимизации процесса сортировки: ДП, ДПА – датчики потоков – производительности по питанию грохота и фракции А; ВБ – виброгрохот; ДУ – делительное устройство; ЛУ – логическое устройство; ИМ – исполнительный механизм; ПБ – промежуточный бункер

В общем случае зависимости γ_A и $\gamma_B = \frac{Q_B}{Q}$ могут иметь вид кривых, показанных на рис. 3.7 сплошной и штрихпунктирной линиями. Общим для них является наличие области нормального режима (в пределах отрезка AK), характеризующейся малым изменением γ в большом диапазоне изменения Q , и области ненормального режима (правее точки K), в которой значения выходов по фракциям резко изменяются – агрегат работает с неполным разделением продуктов.

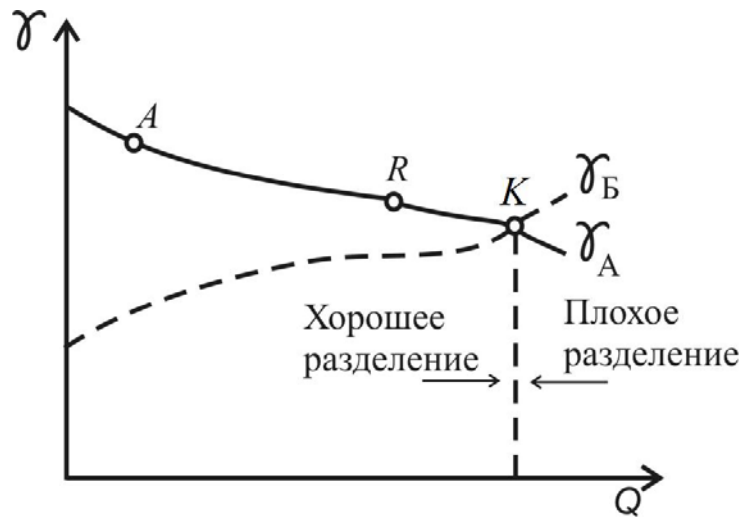


Рис. 3.7. Зависимость выхода фракции A от производительности грохота

Заметим, что в процессе работы агрегата критическая точка K может перемещаться либо под влиянием случайных факторов, либо путем изменения настройки грохота.

Задача оптимизатора сводится к поиску максимально возможной производительности, близкой к точке K (на отрезке RK), при сохранении высокого качества разделения продуктов — обеспечения $\gamma_A \geq \gamma_H$, где γ_H — заданное значение γ_A для области нормального режима. Для этого оптимизатор должен периодически изменять производительность агрегата небольшими скачками ΔQ , измерять величину γ_A и сравнивать ее с предыдущим значением.

Логическое устройство системы (см. рис. 3.6) выбирает направление регулирующего движения (шага) по алгоритму: при $(\gamma_{A+2} - \gamma_{A+1}) = (\gamma_{A+1} - \gamma_A)$ производительность увеличивается на ΔQ ; при $(\gamma_{A+2} - \gamma_{A+1}) \neq (\gamma_{A+1} - \gamma_A)$ — производительность уменьшается на ΔQ , т.е. производительность увеличивается до тех пор, пока приращение γ не изменится.

Рассмотрим уравнения динамики грохота.

Из условия непрерывности потока находим уравнение материального баланса для грохота (см. рис. 3.5):

$$\frac{dM}{dt} + Q_2 + Q_3 = Q_1,$$

где M – запас материала на сите, т; Q_1 – подводимый поток, т/ч; Q_2 – подрешетный отводной поток, т/ч; Q_3 – надрешетный отводной поток, т/ч.

Уравнения статики $Q_2 = f(M)$ и $Q_3 = f(M)$ определяются экспериментально. Примерные графики этих функций показаны на рис. 3.8.

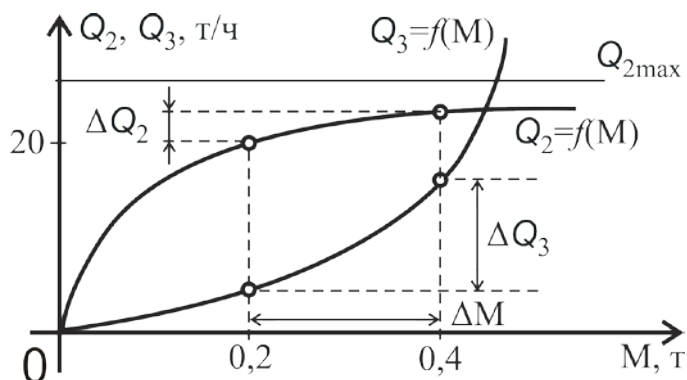


Рис. 3.8. Статические характеристики виброгрохота

Как видно из рис. 3.8, поток Q_2 с увеличением запаса материала на сите быстро возрастает, а затем асимптотически приближается к пределу $Q_{2\max}$, определяемому пропускной способностью отверстий грохота. Поток Q_3 с увеличением M возрастает неограниченно.

При работе грохота с малыми отклонениями нелинейные уравнения можно линеаризовать. Для малых приращений в окрестностях рабочей точки запишем соотношения:

$$\Delta Q_2 = m \Delta M ;$$

$$\Delta Q_3 = n \Delta M .$$

Тогда уравнение в приращениях грохота запишется так:

$$\frac{d\Delta M}{dt} + m\Delta M + n\Delta M = \Delta Q_1 .$$

После элементарных преобразований получим

$$\frac{1}{m+n} \frac{d\Delta M}{dt} + \Delta M = \frac{1}{m+n} \Delta Q_1 .$$

Обозначив $\frac{1}{m+n} = T$, запишем следующее выражение динамики грохота: $T \frac{d\Delta M}{dt} + \Delta M = T\Delta Q_1$.

Из последнего уравнения получим передаточную функцию грохота:

$$W_1(p) = \frac{\Delta M(p)}{\Delta Q_1(p)} = \frac{T}{Tp + 1}.$$

По другим выходным параметрам грохот является также апериодическим звеном первого порядка:

$$W_2(p) = \frac{\Delta Q_2(p)}{\Delta Q_1(p)} = \frac{K_2}{Tp + 1};$$

$$W_3(p) = \frac{\Delta Q_3(p)}{\Delta Q_1(p)} = \frac{K_3}{Tp + 1},$$

где $K_2 = \frac{m}{m+n}$; $K_3 = \frac{n}{m+n}$.

Ввиду того, что статические характеристики грохота нелинейные, численные значения постоянной времени T и передаточных коэффициентов K_2 и K_3 для различных рабочих точек будут разными.

Двухситочный грохот можно представить в виде двух последовательно соединенных апериодических звеньев.

Алгоритмическая структура односиточного грохота показана на рис. 3.9.

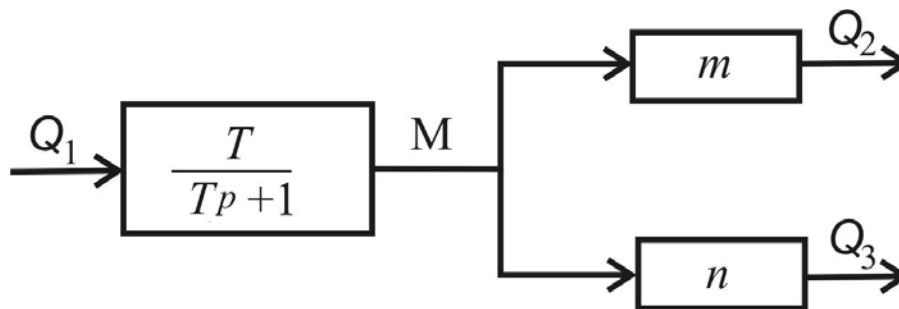


Рис. 3.9. Алгоритмическая структурная схема грохота

3.4. Автоматическая оптимизация дробильно-сортировочного процесса

Машины, входящие в состав дробильно-сортировочных установок, имеют экстремальные статические характеристики, что позволяет оптимизировать технологический процесс.

Рассмотрим оптимизацию дробильно-сортировочного процесса, технологическая схема которого приведена на рис. 3.10.

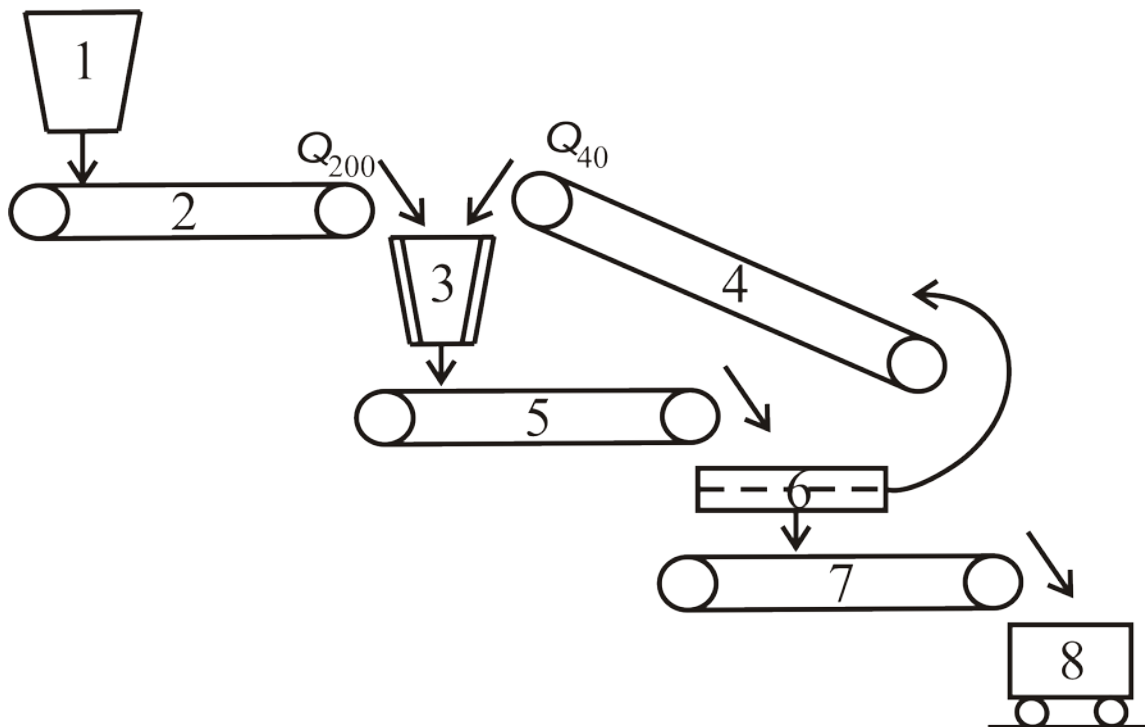


Рис. 3.10. Технологическая схема
дробильно-сортировочного процесса

Исходный кусковый материал крупностью 200 мм из бункера 1 питателем 2 подается в щековую дробилку 3, а из нее конвейером 5 на грохот 6. Мелкий материал из грохота через конвейер 7 поступает в вагонетку готовой продукции 8. Крупный материал фракцией 40 мм, не прошедший через грохот, конвейером 4 подается на повторное дробление в щековую дробилку.

Функциональная схема системы экстремального регулирования процесса дробления показана на рис. 3.11.

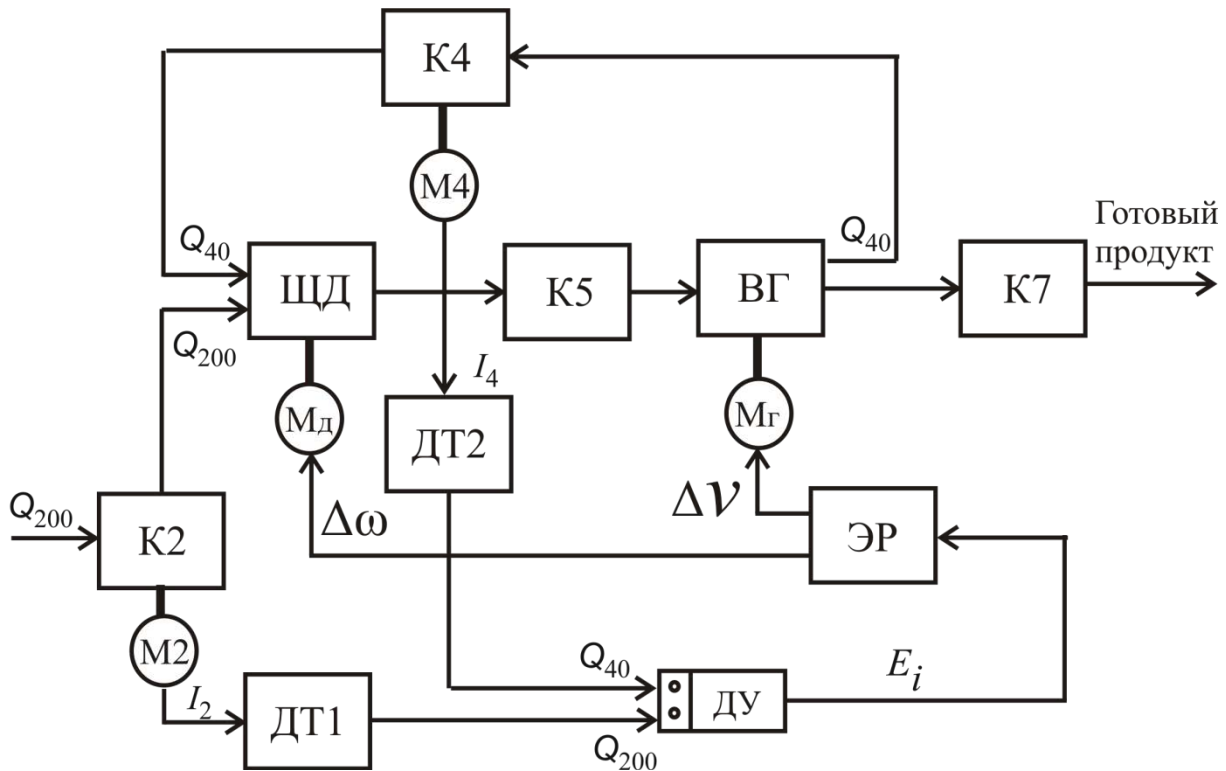


Рис. 3.11. Функциональная схема системы экстремального регулирования дробильно-сортировочного процесса

Показателем экстремума является отношение потока материала крупностью 40 мм (Q_{40}) к потоку исходного материала Q_{200} .

Значения потоков Q_{200} и Q_{40} можно измерить косвенно датчиками ДТ1 и ДТ2 по значениям токов статоров электродвигателей конвейеров К2 и К4. Экстремальный регулятор ЭР при изменяющихся условиях работы и состояний оборудования подбирает частоту вращения ω вала щековой дробилки ЩД и скорость V движения виброгрохота ВГ такими, чтобы значение показателя экстремума E было минимальным.

Поиск и поддержание E на минимуме обеспечивает шаговый экстремальный регулятор ЭР следующим образом. Первым шагом измеряется Q_{40} , вторым – Q_{200} , третьим – определяется значение E_i , четвертым – запоминается E_i , пятым – изменяется значение ω на шаг $\Delta\omega$, шестым–девятым шагами повторяются шаги первый–четвертый, но уже при новом режиме работы щековой дробилки. На десятом шаге новое значение показателя экс-

тремума E_{i+1} сравнивается с предыдущим его значением E_i . Если $E_{i+1} < E_i$, то следующий шаг $\Delta\omega$ будет сделан в том же направлении. При $E_{i+1} > E_i$ знак $\Delta\omega$ изменяется на противоположный. Система совершает колебания около точки экстремума. После прохождения экстремума по параметру ω регулятор таким же образом находит экстремум по ν .

При изменении условий дробления регулятор находит абсолютный минимум E , последовательно определяя локальные минимумы показателя E по параметрам ω и ν .

4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СЫРЬЕВЫХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

4.1. Автоматизация процессов приготовления сырьевой смеси в производстве цемента

4.1.1. Технологические основы и задачи автоматизации

В цементной промышленности применяются мокрый и сухой способы производства цемента. Технологическая схема процесса производства цемента мокрым способом представлена на рис. 4.1.

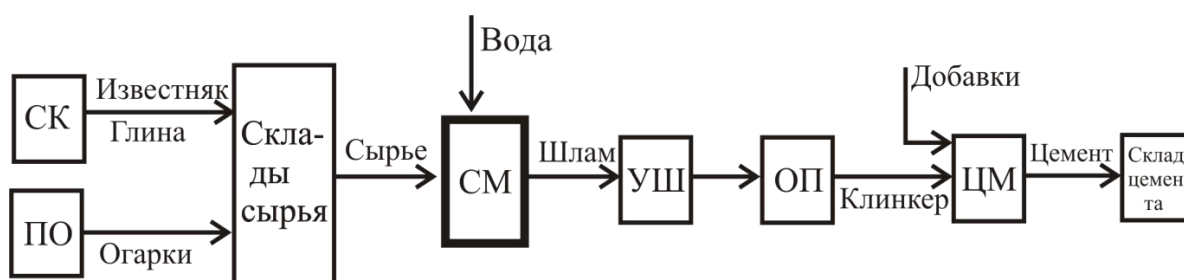


Рис. 4.1. Технологическая схема производства цемента

На схеме обозначено:

СК – строительные карьеры;

ПО – производство огарков;

СМ – сырьевые мельницы;

УШ – усреднители шлама (шлам-бассейны);

ОП – обжиговые печи;

ЦМ – цементные мельницы.

В качестве исходных материалов для процесса обжига и образования клинкера используются искусственно приготовленные смеси из карбонатных и глинистых пород. Измельчение твердых сырьевых материалов осуществляется в шаровых трубных мельницах. Материалы после дробления подаются со склада в сырьевые мельницы с помощью питателей и дозаторов. Одновременно с измельчением до определенной тонкости помола сырьевых ма-

териалов в мельнице осуществляется смешивание известняка и глины с добавками (огарками), необходимыми для улучшения протекания процесса обжига.

Шлам (смесь компонентов с водой) с выхода сырьевых мельниц перекачивается насосами в усреднительные бассейны – сначала в вертикальные шламбассейны и затем в горизонтальные. Сырьевая смесь заданного химического состава определенной влажности и тонкости помола подается в обжиговую вращающуюся печь, где происходят ее спекание и химическое превращение – образуется клинкер.

Завершающий этап получения цемента представляет собой измельчение и смешение клинкера с добавками (гипс, песок) в цементных мельницах.

Цемент от мельниц подается на склад готовой продукции с помощью пневмонасосов (камерных или винтовых).

На большинстве цементных заводов применяется поцеховая структура управления. В этом случае предусматриваются индивидуальные системы автоматического контроля и регулирования для каждого агрегата в каждом цехе (сырьевом, обжига, помола и др.). На группы агрегатов организуются свои общие щиты КИП и автоматики, с которых осуществляется управление агрегатами цеха.

Применение компьютеров позволяет осуществить централизованное управление производством цемента.

Высокое качество цемента может быть достигнуто лишь при условии получения сырьевой смеси заданного химического состава. Поэтому необходимо осуществлять контроль расходов составляющих материалов (известняка, глины и др.), а также поддерживать требуемый химический состав смеси. В сырьевом отделении требуется контролировать и другие параметры. В результате смешения материалов между собой и водой (при мокром способе производства) образуется шлам, влажность которого зависит от количества воды, а вязкость – от состава теста. Влажность шлама изменяется в пределах от 30 до 42 %. С уменьшением влажности (увеличением вязкости) шлам трудно транспортируется по трубам, а с ее повышением растут затраты тепла на испарение влаги в процессе обжига в печи. После измельчения материала необходимо знать тонкость помола шлама, так как пере-

измельчение материалов связано с излишней затратой электроэнергии, а недоизмельчение ухудшит качество клинкера. Поэтому такие параметры шлама, как вязкость, влажность и тонкость помола необходимо не только контролировать, но и поддерживать на заданных уровнях.

Процесс приготовления сырьевой смеси осуществляется на сырьевой мельнице.

Задачи, решаемые системой автоматизации СМ:

- Технологический контроль работы СМ (измерение, регистрация, сигнализация);
- Автоматическое управление процессом помола (управление технологическими параметрами). Эта задача решается применением САР режима работы СМ;
- Дистанционно-автоматическое управление пуском/остановом СМ.

4.1.2. Технологический контроль работы сырьевой мельницы

Технологическая схема процесса приготовления сырьевой смеси показана на рис. 4.2.

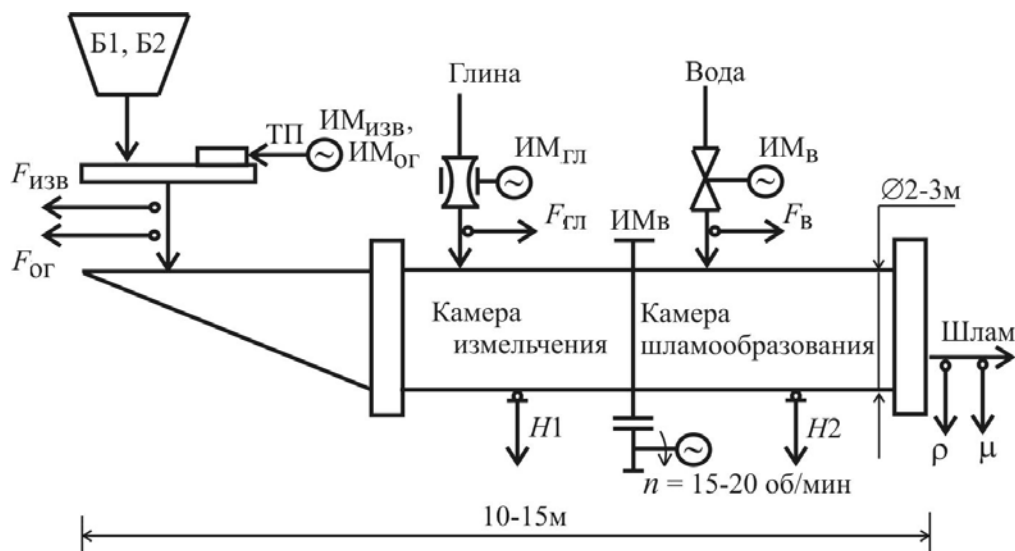


Рис. 4.2. Технологическая схема процесса приготовления сырьевой смеси

На схеме обозначено:

ТП – тарельчатый питатель;

Б1, Б2 – бункера сыпучих материалов (известняка и огарков);

ИМ – исполнительные механизмы.

Контролируемые параметры:

$F_{\text{изв}}$, $F_{\text{ог}}$, $F_{\text{гл}}$, $F_{\text{в}}$ – расход соответственно известняка, огарков, глины и воды;

$H1$, $H2$ – уровни загрузки камер измельчения и шламообразования;

ρ – тонкость помола;

μ – вязкость шлама.

Датчики технологических параметров:

- Индуктивные датчики для косвенного измерения расходов $F_{\text{изв}}$, $F_{\text{ог}}$ по перемещению ножей тарельчатых питателей;
- Индукционные расходомеры $F_{\text{гл}}$, $F_{\text{в}}$ типа ИР-11.

Уровни загрузки камер $H1$, $H2$ измеряют электроакустическими датчиками (микрофон – усилитель), вязкость шлама μ – ротационным вискозиметром, тонкость помола ρ – лабораторным способом с помощью просеивания проб.

Исполнительные механизмы: электродвигательные постоянной скорости.

4.1.3. Автоматическое управление процессом приготовления смеси

Сырьевая мельница (СМ) как объект управления может быть представлена схемой, показанной на рис. 4.3.

Статические характеристики мельницы приведены на рис. 4.3 и 4.4.

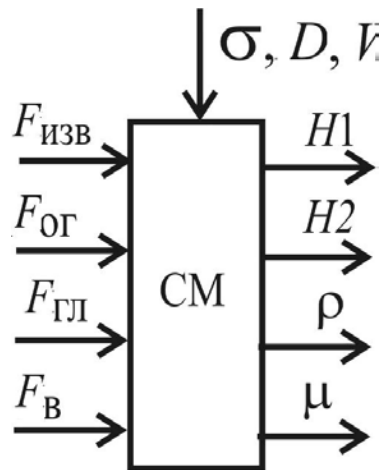


Рис. 4.3. CM как объект управления: σ – прочность сырья;
 D – крупность; W – влажность (%)

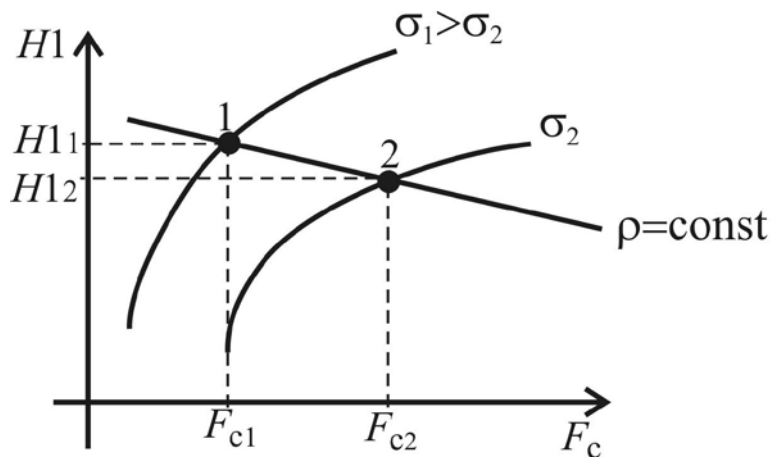


Рис. 4.4. Зависимость уровня загрузки камеры измельчения
 $H1$ от расхода сырья F_c различной прочности σ :

$$F_c = F_{\text{изв}} + F_{\text{ог}} - \text{расход сыпучего сырья}$$

Из анализа рис. 4.4 вытекает, что для поддержания тонкости помола $\rho = \text{const}$ на заданном значении с ростом уровня загрузки камеры следует уменьшать подачу сыпучего материала в мельницу.

Для поддержания постоянной вязкости смеси $\mu = \text{const}$ необходимо с ростом уровня загрузки $H2$ камеры шламообразования увеличивать расход воды (рис. 4.5).

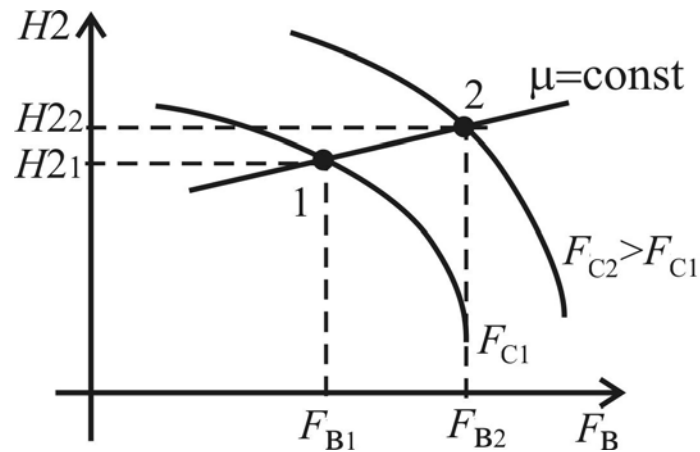


Рис. 4.5. Зависимость загрузки камеры шламообразования от расхода воды для разных расходов сырья

Переходные характеристики СМ при скачке F_C (рис. 4.6) показывают, что все процессы являются аperiodическими с запаздыванием.

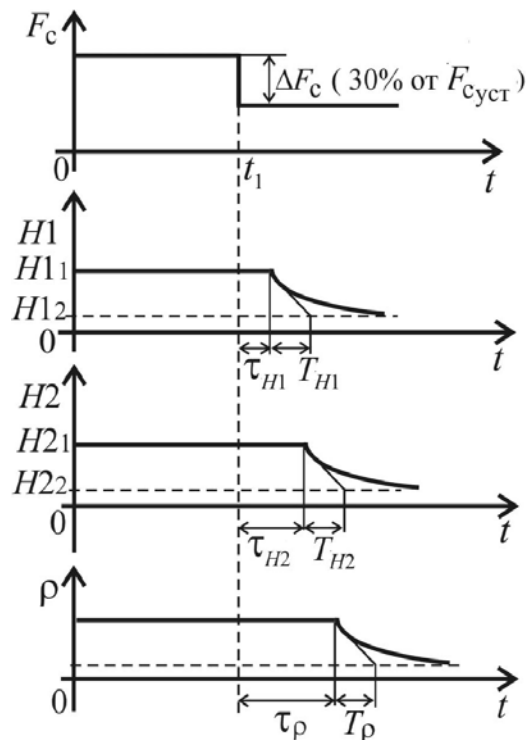


Рис. 4.6. Переходные характеристики СМ при скачке F_C :
 $\tau_{H1} = 3$ мин; $\tau_{H2} = 9$ мин; $\tau_\rho = 18$ мин; $T_\rho \approx T_{H1} \approx T_{H2} = (8 \div 10)$ мин

Переходные процессы СМ при скачке F_B также являются аperiodическими с запаздыванием (рис. 4.7).

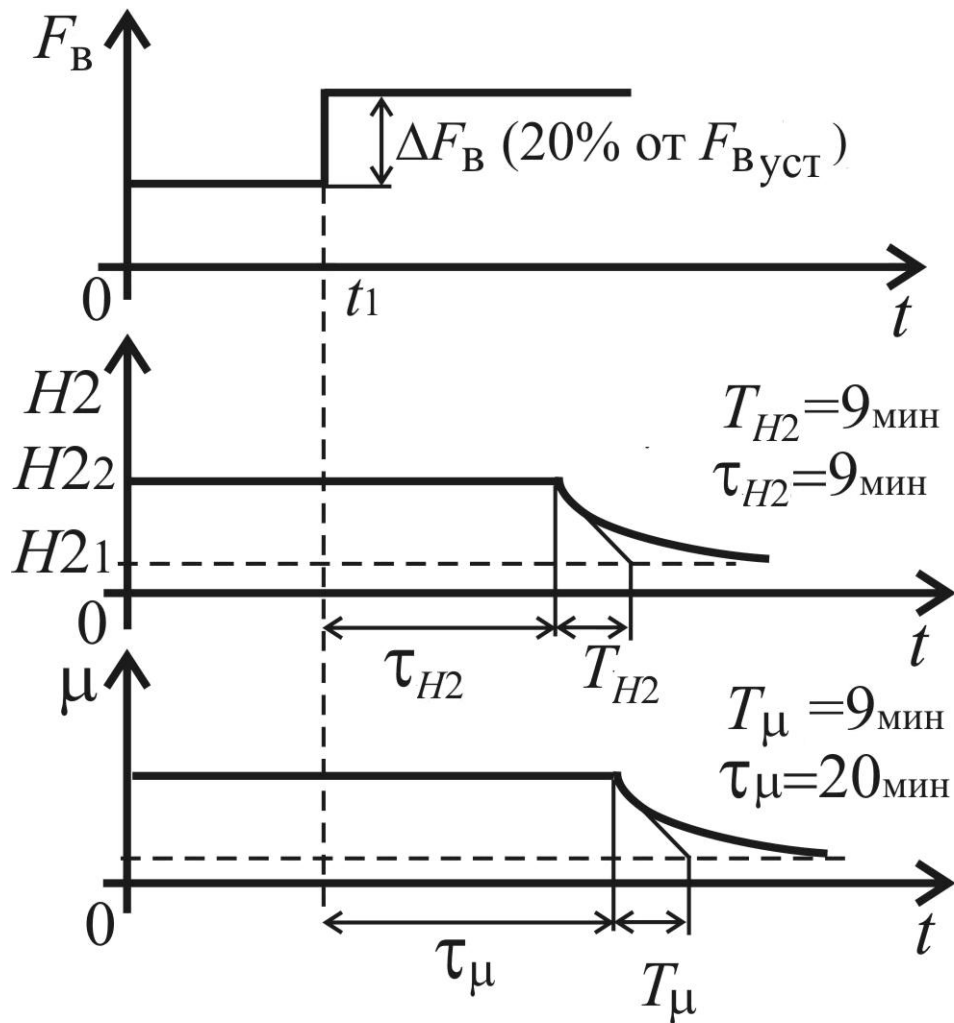


Рис. 4.7. Переходные характеристики СМ при скачке F_B

Из анализа динамических характеристик СМ можно сделать следующие выводы:

- Передаточная функция СМ как объекта управления по любому управляющему каналу $F_C \rightarrow H1, H2, \rho$; $F_B \rightarrow H2, \mu$ может быть представлена выражением $W_i = \frac{k_{oi}}{T_{oi}p + 1} e^{-p\tau_{oi}}$, как апериодическое звено с постоянным запаздыванием;
- Наиболее благоприятными с точки зрения динамики являются каналы управления $F_C \rightarrow H1$; $F_B \rightarrow H2$.

Главной задачей системы автоматического управления процессом помола сырья в мельнице является получение шлама требуемого качества, определяемого заданными значениями вязкости и тонкости помола. В связи с определенной сложностью не-

прерывного измерения показателей качества шлама в настоящее время на действующих сырьевых мельницах задача управления качеством получаемого продукта решается косвенным способом путем стабилизации расходов компонентов смеси с автоматической коррекцией заданий по их расходам в функции загрузки камер мельницы (рис. 4.8).

В схеме САУ процессом помола приняты следующие обозначения:

P_i – промышленный регулятор расхода i -го компонента смеси, где $i = \text{из, ог, гл, в}$;

ИМ – исполнительный механизм (сервопривод);

ТП $_j$ – j -й тарельчатый питатель ($j = 1, 2$) для регулирования расходов известняка и огарков;

ПУ – пережимное устройство для регулирования расхода глины;

К $_л$ – клапан для регулирования расхода воды;

ДР – датчик расхода соответствующего компонента смеси;

ДЗ1, ДЗ2 – датчики уровня загрузки соответственно первой и второй камер мельницы;

БК1, БК2 – блоки автоматической коррекции заданий расходов компонентов смеси;

$F_{\text{изв}0}^{\text{зад}}, F_{\text{ог}0}^{\text{зад}}, F_{\text{гл}0}^{\text{зад}}, F_{\text{в}0}^{\text{зад}}$ – расчетные (исходные) заданные значения расходов компонентов смеси соответственно известняка, огарков, глины и воды;

$F_{\text{изв}}, F_{\text{ог}}, F_{\text{гл}}, F_{\text{в}}$ – управляющие воздействия на объект, формируемые соответствующими контурами регулирования и представляющие собой фактические расходы известняка, огарков, глины, воды;

ΔF_i – сигналы автоматической коррекции, вырабатываемые блоками коррекции БК1, БК2 с целью поддержания параметров шлама на заданном уровне $\mu = \text{const}$, $\rho = \text{const}$;

$F_i^{\text{зад}} = F_{i0}^{\text{зад}} \pm \Delta F_i$ – сигнал коррекции задания по i -му компоненту смеси.

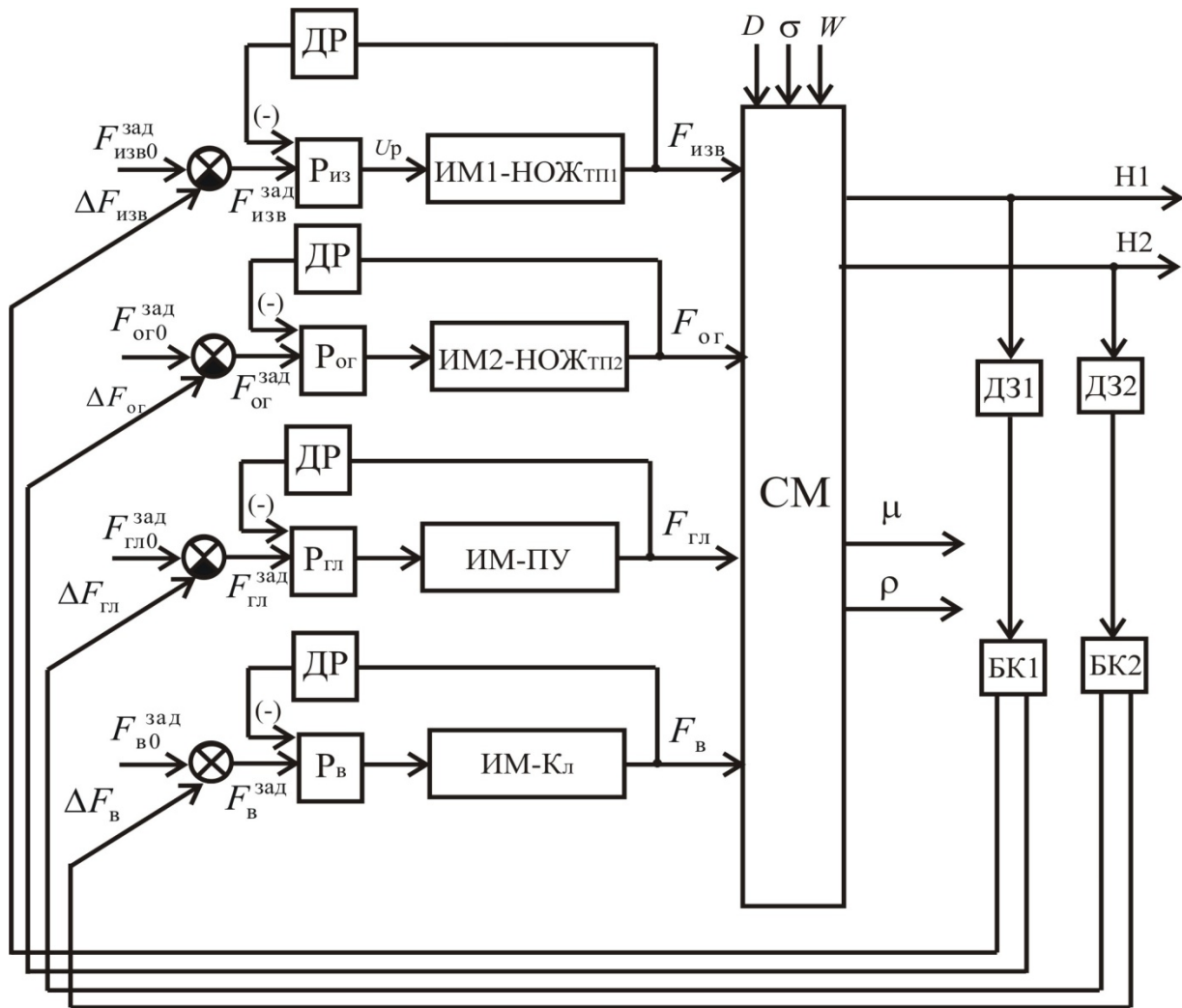


Рис. 4.8. САУ процессом помола

Характеристики блоков коррекции для обеспечения постоянства параметров ρ и μ показаны на рис. 4.9.

САУ выполняет две основные функции:

- Поддержание заданного соотношения компонентов смеси с помощью четырех замкнутых контуров регулирования расходов этих компонентов;
- Автоматическую коррекцию заданий расходов компонентов смеси в функции загрузки камер мельницы с помощью блоков БК1, БК2 для компенсации возмущающих воздействий (D , W , σ), приводящих к изменению качества шлама.

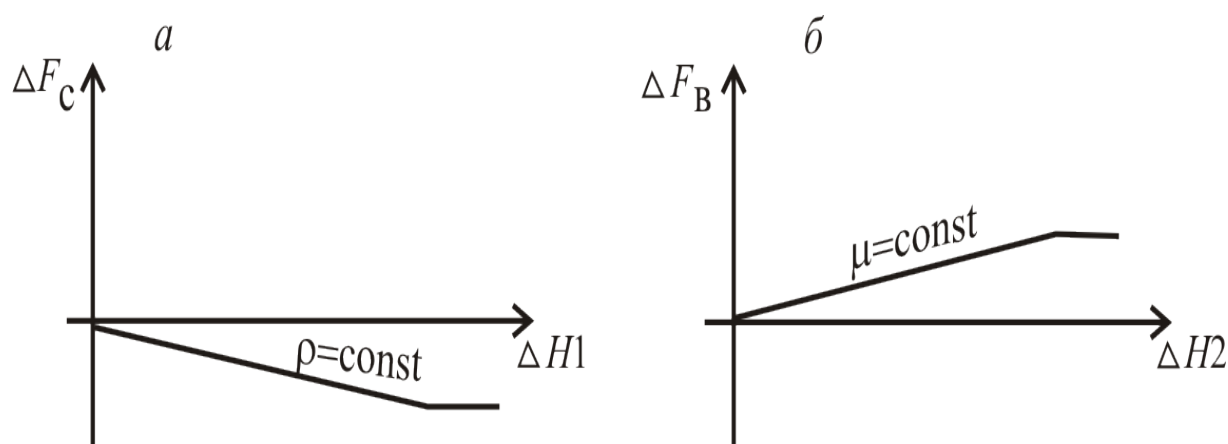


Рис. 4.9. Характеристики блоков коррекции БК1 (а) и БК2 (б)

4.2. Автоматизация процессов приготовления бетонных смесей

4.2.1. Автоматическое управление бетоносмесительной установкой циклического действия

Система управления бетоносмесительной установкой (БСУ) является разомкнутой программной, обеспечивает определенную последовательность операций в цикле в функции времени без контроля фактического выполнения операций процесса.

Структурная схема САУ бетоносмесительной установки представлена на рис. 4.10.

На схеме обозначено:

Ц – цемент, П – песок, Щ – щебень, В – вода;

УУ – управляющее устройство;

СВ – сборная воронка, в которую поступают компоненты смеси – цемент, песок, щебень и вода;

БС1, БС2 – бетоносмесители гравитационного действия;

М1, М2 – исполнительные приводы барабана и механизмы разгрузки БС1;

М3, М4 – исполнительные приводы барабана и механизмы разгрузки БС2;

М5 – исполнительный привод переключателя потока сырья;

НБ – накопительный бункер готовой смеси;

$\bar{U}$ – вектор управляющих сигналов (команд), формируемый УУ, включающий в себя сигналы управления соответствующими исполнительными приводами (U_1, U_2, U_3, U_4, U_5);

P – пусковой импульс (импульсы управления).

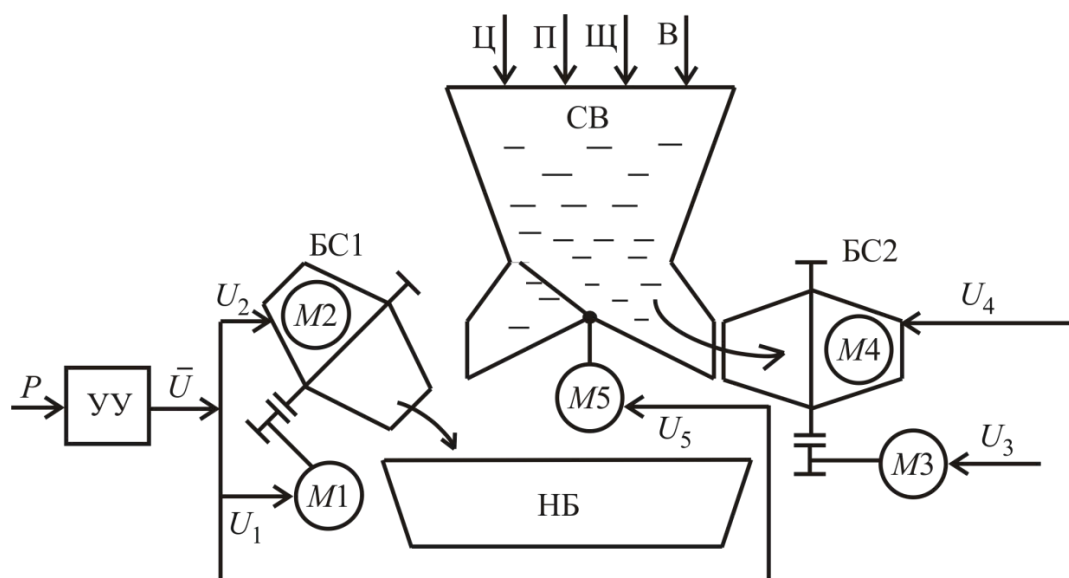


Рис. 4.10. Структурная схема САУ БСУ

Циклограмма работы бетоносмесительной установки представлена на рис. 4.11.

Введение в УУ селектирующего сигнала x позволяет сдвинуть включение бетоносмесителей БС1 и БС2 наполовину периода их работы и обеспечить тем самым управление их загрузкой с помощью одного переключателя потока, а также относительно равномерное заполнение накопительного бункера готовым бетоном.

Полагая, что в исходном состоянии БС1 загружен, а БС2 находится в режиме перемешивания компонентов смеси, при появлении очередного импульса P включатся одновременно приводы $M1$ и $M5$ – начнется загрузка БС1 и перемешивание в нем компонентов смеси. Появление следующего импульса P вызовет аналогичные действия применительно к БС2.

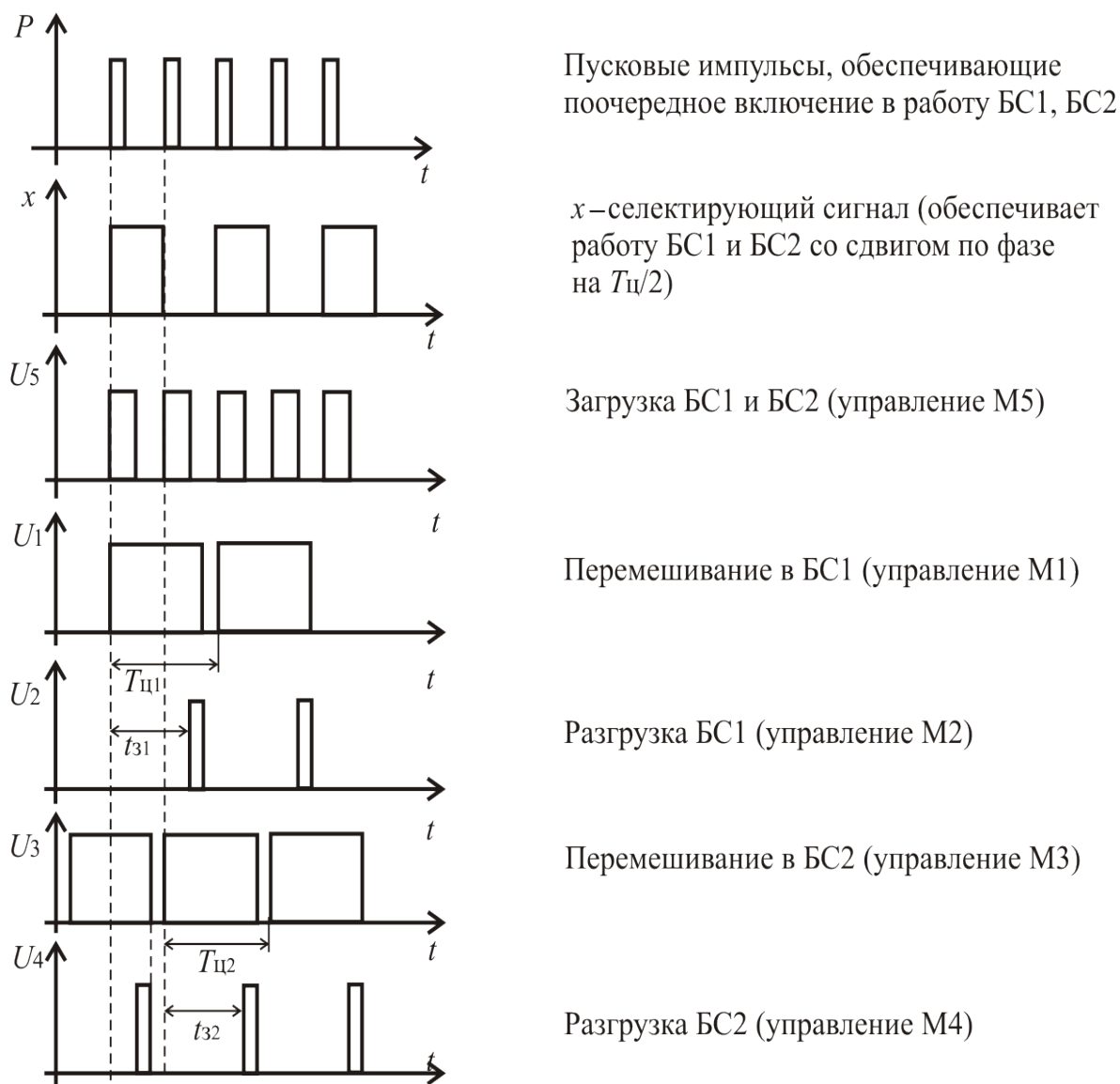


Рис. 4.11. Временные диаграммы работы исполнительных механизмов БСУ: $T_{ц1} = T_{ц2}$ – длительность циклов работы бетоносмесителей; $t_{31} = t_{32}$ – время задержки разгрузки БС1 и БС2 относительно момента начала перемешивания

Используя временные операции логического управления (временные операторы), можно описать алгоритм работы УУ следующим образом:

$$\begin{aligned}
 x &= \text{Int}(0 \rightarrow 1)p; \\
 U_5 &= \text{Ext}_2(px / p\bar{x}); \\
 U_1 &= \text{Ext}_1(px); \\
 U_2 &= D(0 \rightarrow 1)U_1;
 \end{aligned}$$

$$U_3 = Ext_1(p\bar{x});$$

$$U_4 = D(0 \rightarrow 1)U_3,$$

где Ext – оператор увеличения длительности сигнала;

Int – оператор выделения интервала между сигналами;

D – оператор задержки появления сигнала;

$(0 \rightarrow 1)$ – переход сигнала с логического нуля в единицу.

4.2.2. АСУ бетоносмесительным узлом

Автоматизированные системы управления бетоносмесительными узлами могут быть по структуре как централизованными, так и распределенными. Централизованная АСУ имеет одно управляющее устройство – компьютер. Рассмотрим структуру такой системы применительно к технологической схеме бетоносмесительного узла дискретного действия, содержащей следующие системы (рис. 4.12):

- Систему подачи компонентов бетонной смеси со склада (транспортеры + приемные бункера ПБ: 4 линии);
- Систему дозирования (питатели П – весовые бункера ВБ: 4 линии);
- Систему приготовления бетонной смеси (сборная воронка СВ и бетоносмесители БС1, БС2).

В системе используются следующие элементы автоматики:

- Датчики (26 штук):
 - уровня заполнения в ПБ и СВ – вектор параметров $\bar{h}$ (9 датчиков);
 - положения затворов ВБ и СВ – вектор параметров $\bar{l}$ (5 датчиков);
 - веса компонентов в ВБ – вектор $\bar{G}$ (4 датчика);
 - состояния ИМ (приводов транспортеров, питателей, механизмов БС) – вектор $\bar{C}$ (8 датчиков);
- Исполнительные механизмы ИМ (приводы):
 - транспортеров (4 привода);
 - питателей (4 привода);
 - затворов ВБ и СВ (5 приводов);
 - бетоносмесей (4 привода барабанов и механизмов разгрузки);

- Управляющий компьютер УК, получая информацию от датчиков (вектор контроля $\overline{K}$) и используя задание по марке бетона и количеству замесов, формирует вектор управляющих сигналов $\overline{U}$ исполнительными приводами, а также выводит информацию на экран (визуализация процесса), печатает данные по выпуску продукции, расходу компонентов, о простоях и др.

В соответствии с заданной маркой УК формирует рецептуру – весовые дозы компонентов смеси.

Централизованные АСУ характеризуются относительной простотой, которая в конечном счете приводит к низкой надежности работы системы (отказ УК приводит к отказу всей системы), высоким затратам труда и времени на проектирование системы и к большим затратам на кабельные проводки.

Распределенные АСУ бетоносмесительным узлом (цехом) используют для управления технологическим процессом управляющую вычислительную сеть, состоящую из управляющего компьютера УК и программируемых логических контроллеров ПЛК (рис. 4.13). Благодаря этому принципу управления в распределенных АСУ исключаются недостатки централизованных систем: повышается надежность системы, упрощаются алгоритмы и программное обеспечение вследствие разделения задачи управления между УК и ПЛК.

Контроллеры ПЛК осуществляют в рассматриваемой АСУ локальный контроль и управление соответствующими системами подачи, дозирования и приготовления смеси, а управляющий компьютер координирует работу ПЛК, осуществляет визуализацию процесса, регистрацию выпуска готовой продукции и расходов компонентов и аварийных ситуаций.

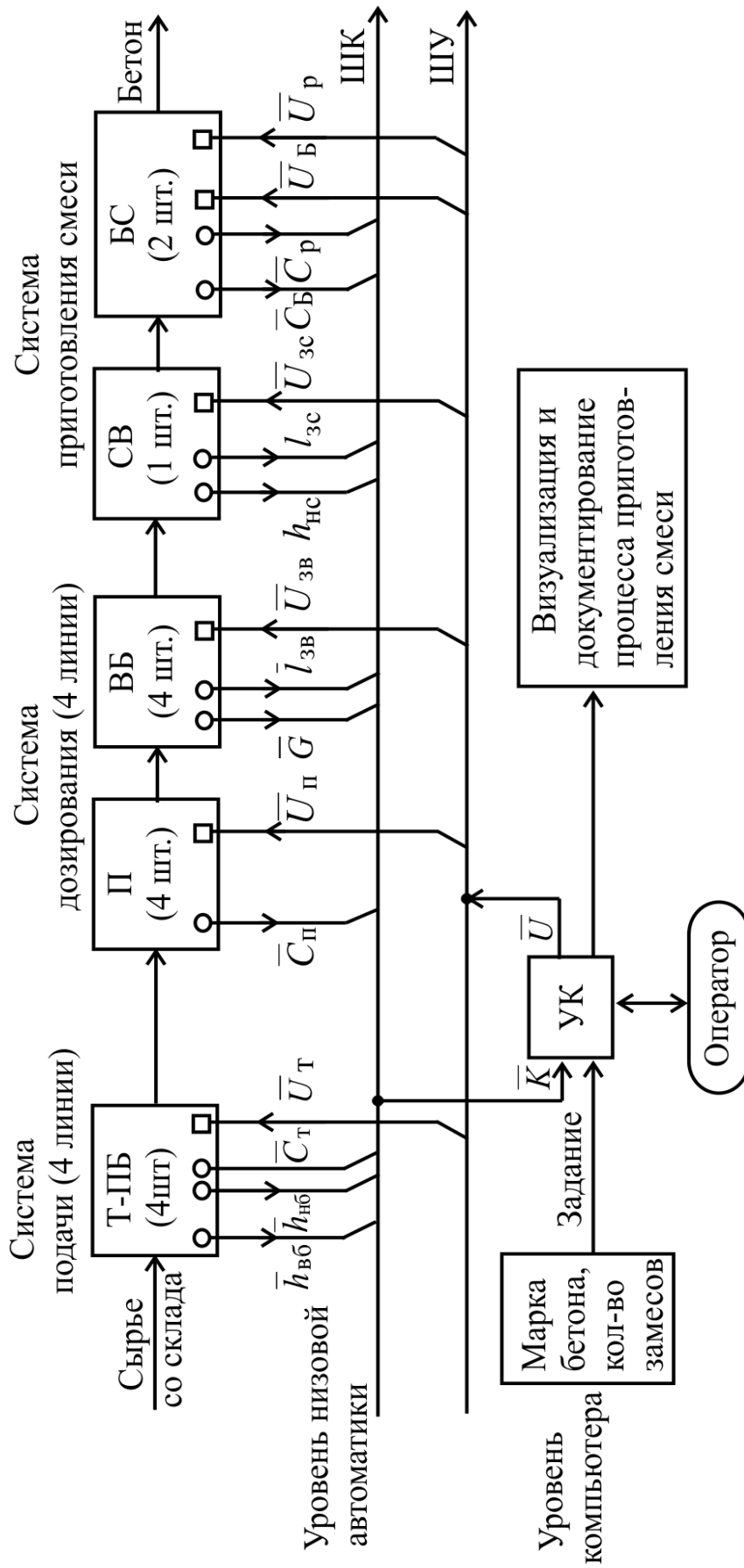


Рис. 4.12. Пример централизованной АСУ бетоносмесительным узлом (цехом) дискретного действия: ШК, ШУ – шины контроля и управления; $\circ$ – датчик; $\square$ – исполнительный механизм (привод)

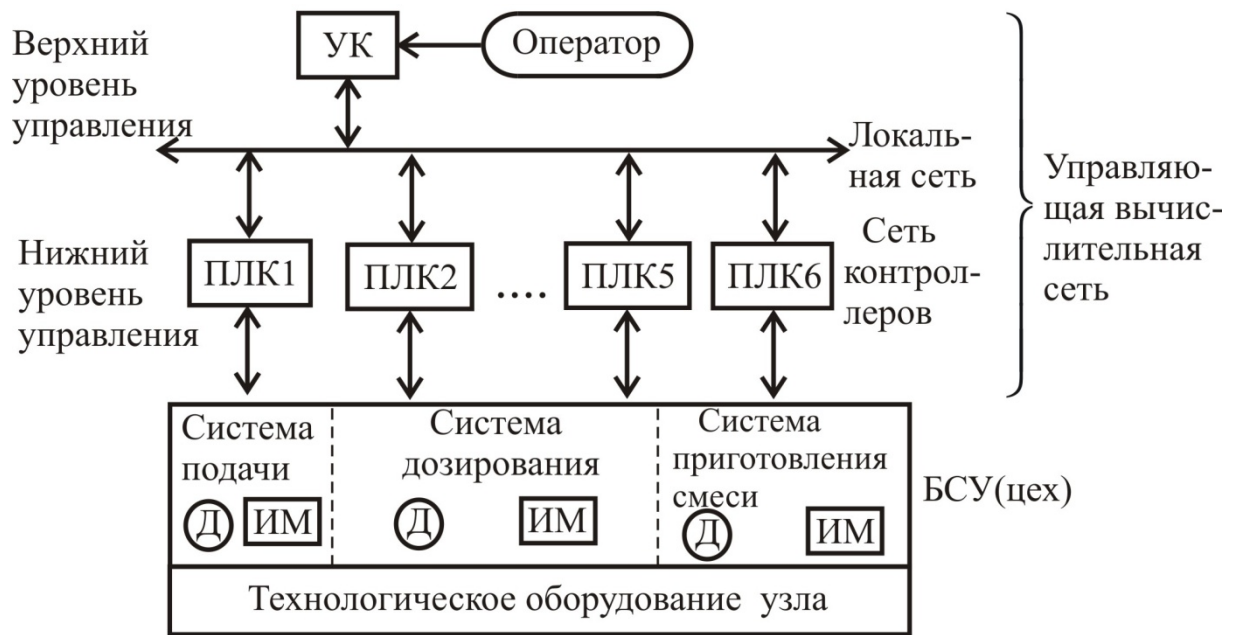


Рис. 4.13. Структура распределенной АСУ бетоносмесительным узлом

5. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ДОЗИРОВАНИЯ И ВЗВЕШИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

5.1. Автоматическое управление дозаторами непрерывного действия

Системы управления такими дозаторами делятся:

- а) на СУ по массе материалов на весовом конвейере дозатора по закону $m = m_{\text{зад}} = \text{const}$ при постоянной скорости ленты $v = \text{const}$;
- б) СУ с управлением по производительности весового конвейера по закону $Q = Q_{\text{зад}} = \text{const}$.

5.1.1. Дозаторы с управлением по массе

Такие дозаторы имеют весовой конвейер с нерегулируемым электроприводом. Замкнутая САР поддерживает заданное значение массы (веса) материала на ленте конвейера.

Расход материала (производительность) поддерживается косвенным способом – путем стабилизации массы материала на ленте весового конвейера:

$$Q = \gamma b h v = m v,$$

где γ – плотность материала;

b – ширина ленты весового конвейера;

h – высота потока вещества на ленте;

v – скорость весового конвейера;

m – масса (вес) дозируемого материала на весовом конвейере.

Обобщенная структура САУ дозатора по массе показана на рис. 5.1.

Дозатор обеспечивает «грубое» дозирование (дозирование с большой погрешностью). Погрешность дозирования определяется отклонением скорости от расчетного значения.

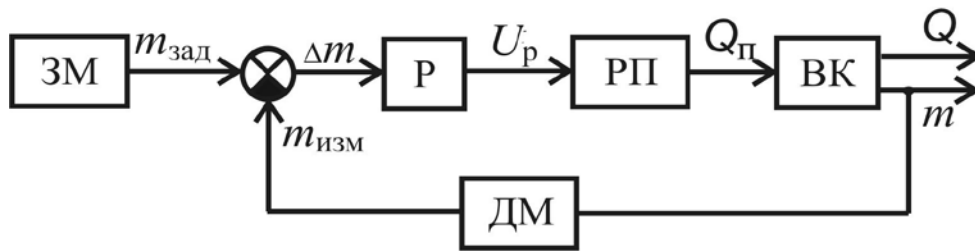


Рис. 5.1. Обобщенная структура САУ дозатора по массе

На схеме обозначено:

ЗМ, ДМ – задатчик и датчик массы;

Р – промышленный регулятор;

РП – регулируемый питатель;

ВК – весовой конвейер;

$m_{\text{зад}}$, $m_{\text{изм}}$, m – масса заданная, измеренная и фактическая;

U_p – выходной сигнал регулятора;

$Q_{\text{п}}$ – производительность питателя;

Q – производительность весового конвейера (дозатора).

В качестве примера САУ дозированием по массе на рис. 5.2 представлен дозатор С313.

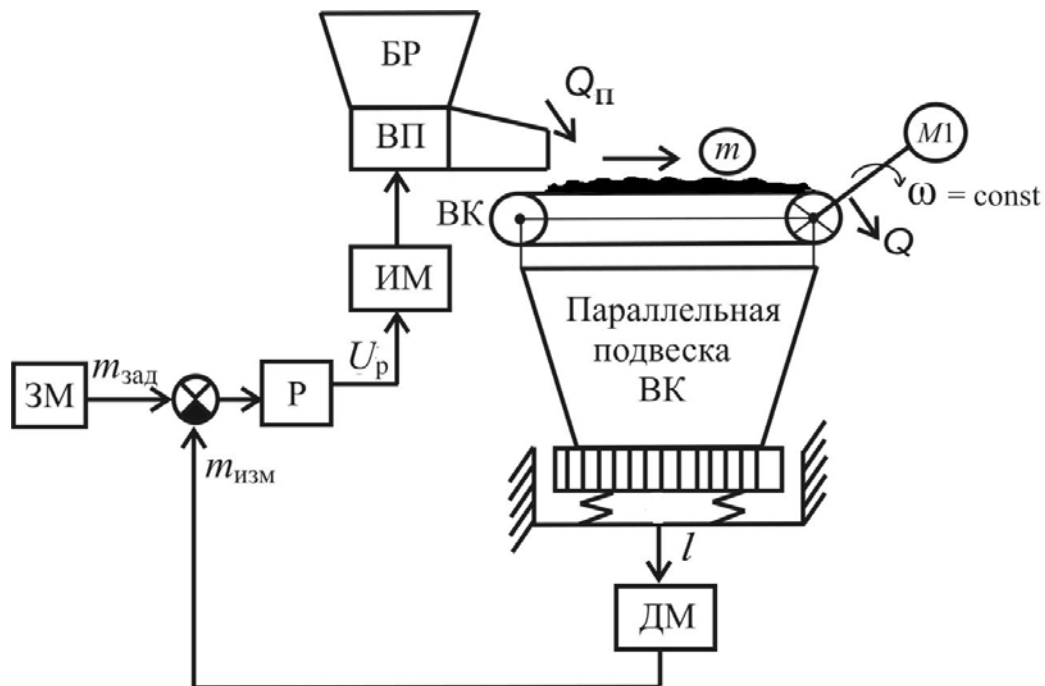


Рис. 5.2. Дозатор С313

На схеме обозначено:

БР – бункер расходный;

ВП – вибропитатель;

ДМ – датчик массы;

ИМ – исполнительный механизм (электромагнитный привод питателя);

$Q_{\text{п}}$ – регулирующее воздействие (производительность вибропитателя);

l – перемещение ВК, пропорциональное массе.

Система поддерживает массу $m = m_{\text{зад}}$, изменяя производительность вибропитателя.

5.1.2. Дозаторы с управлением по производительности

Применяются для точного дозирования. Имеют два регулирующих воздействия:

- Скорость весового конвейера (за счет регулируемого ЭП);
- Производительность питателя.

Обобщенная структура САУ дозатора непрерывного действия с управлением по производительности приведена на рис. 5.3.

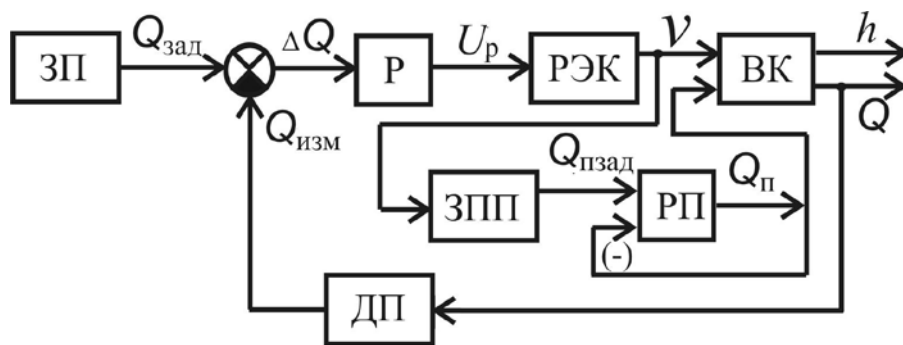


Рис. 5.3. Обобщенная структура САУ дозатора

Система содержит главный (внешний) контур регулирования, включающий в себя задатчик ЗП и датчик ДП производительности весового конвейера ВК, регулятор производительности Р, регулируемый электропривод весового конвейера РЭК и внутренний (следающий) контур регулирования производительности

питателя, в состав которого входят задатчик производительности питателя ЗПП, формирующий задание $Q_{\text{пзад}} = kv$ пропорционально скорости v ленты ВК, и замкнутая САР производительности регулируемого питателя РП.

В качестве примера САУ дозированием по производительности на рис. 5.4 представлена схема дозатора цемента С781.

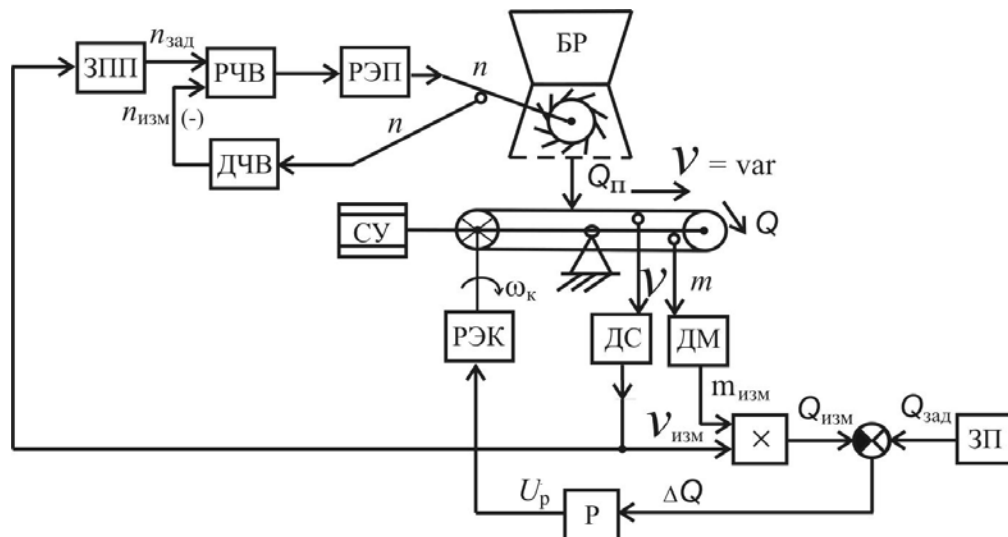


Рис. 5.4. Дозатор С781

На схеме обозначено:

СУ – система уравнивания весового конвейера;

РЭП, РЭК – регулируемые электроприводы барабанного питателя и весового конвейера;

ДМ, ДС, ДЧВ – датчики массы материала, скорости конвейера и частоты вращения барабана;

Р, РЧВ – регуляторы производительности дозатора и частоты вращения барабана (производительности питателя);

ЗПП – задатчик производительности питателя.

Работа дозатора описывается выражениями:

$$Q_{\text{п}} = k_{\text{п}} n;$$

$$n_{\text{зад}} = kv_{\text{изм}};$$

$$Q_{\text{изм}} = m_{\text{изм}} \cdot v_{\text{изм}};$$

$$Q = Q_{\text{зад}}.$$

5.2. Автоматическое управление дозаторами дискретного действия

Дозаторы дискретного действия формируют весовую порцию (дозу) материала.

Схема дозатора со стартостопным управлением показана на рис. 5.5.

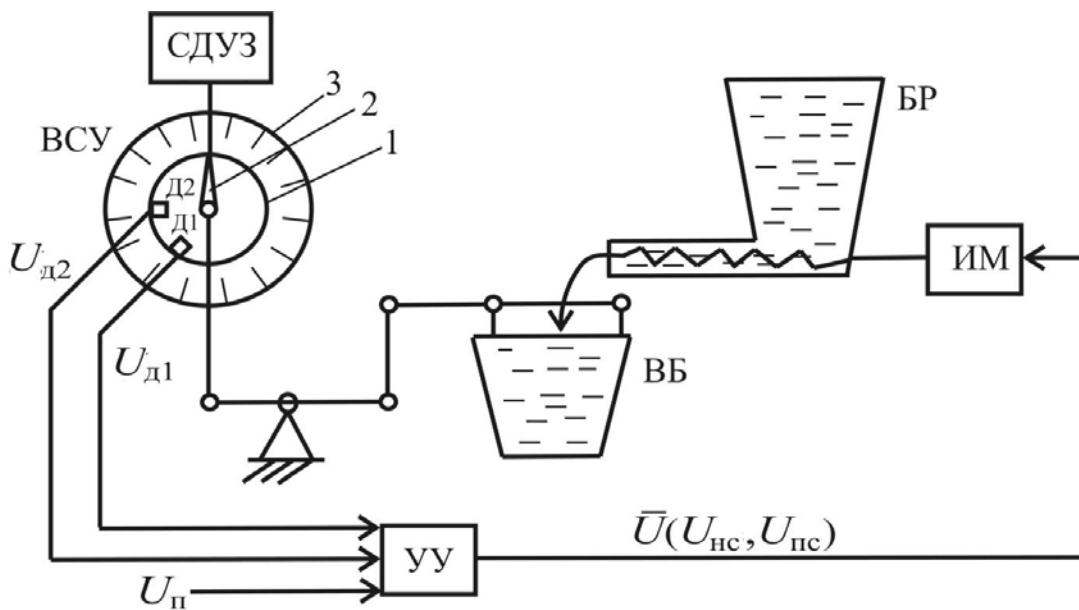


Рис. 5.5. Дозатор дискретного действия со стартостопным управлением

На схеме обозначено:

ВСУ – весоизмерительное устройство;

БР – бункер расходный со шнековым питателем;

УУ – управляющее устройство;

ИМ – исполнительный механизм (привод шнека);

СДУЗ – система дистанционного управления заданием весовой дозы;

1 – неподвижный диск с закрепленными на нем путевыми датчиками Д1, Д2; 2 – подвижный флажок – указатель, угол поворота которого пропорционален измеряемому весу; 3 – шкала.

Диаграммы сигналов системы: пускового напряжения U_{Π} , путевых датчиков $U_{д1}$ и $U_{д2}$, командных $U_{нс}$ и $U_{пс}$ соответственно номинальной и пониженной скорости вращения шнека питателя представлены на рис. 5.6.

Рис. 5.6. Диаграммы сигналов системы управления дозатором

Алгоритм управления шнековым питателем в операторной форме можно записать следующими выражениями:

$$U_{нс} = Int((0 \rightarrow 1)U_{\Pi} \div (0 \rightarrow 1)U_{д1});$$

$$U_{пс} = Mod(Int((0 \rightarrow 1)U_{д1} \div (0 \rightarrow 1)U_{д2})),$$

где *Int* – оператор выделения интервала между сигналами;

Mod – оператор широтно-импульсной модуляции.

Пониженная скорость (скорость досыпки) обеспечивается переводом привода шнека в импульсный режим.

Весовая доза (порция) материала формируется в весовом бункере следующим образом. При появлении импульса U_{Π} устройство УУ включает режим номинальной скорости ИМ, до-

зируемый материал из БР поступает в ВБ и флажок 2 ВСУ начинает поворачиваться. При подходе последнего к датчику Д1 появляется сигнал $U_{д1}$, по которому УУ задает режим пониженной скорости ИМ – идет досыпка дозы. При подходе флажка к датчику Д2 появляется сигнал $U_{д2}$, по которому УУ отключает ИМ. Система СДУЗ позволяет дистанционно поворачивать диск 1 с датчиками, изменяя тем самым заданное значение весовой дозы.

Таким образом, дозатор работает циклически, образуя всякий раз в ВБ порцию материала при появлении очередного пускового импульса.

Автоматический дозатор дискретного действия с цифровым управлением показан на рис. 5.7.

Рассмотрим цифровую систему управления питателем дозатора с относительным отсчетом координаты – массы материала, поступающего в весовой бункер БВ.

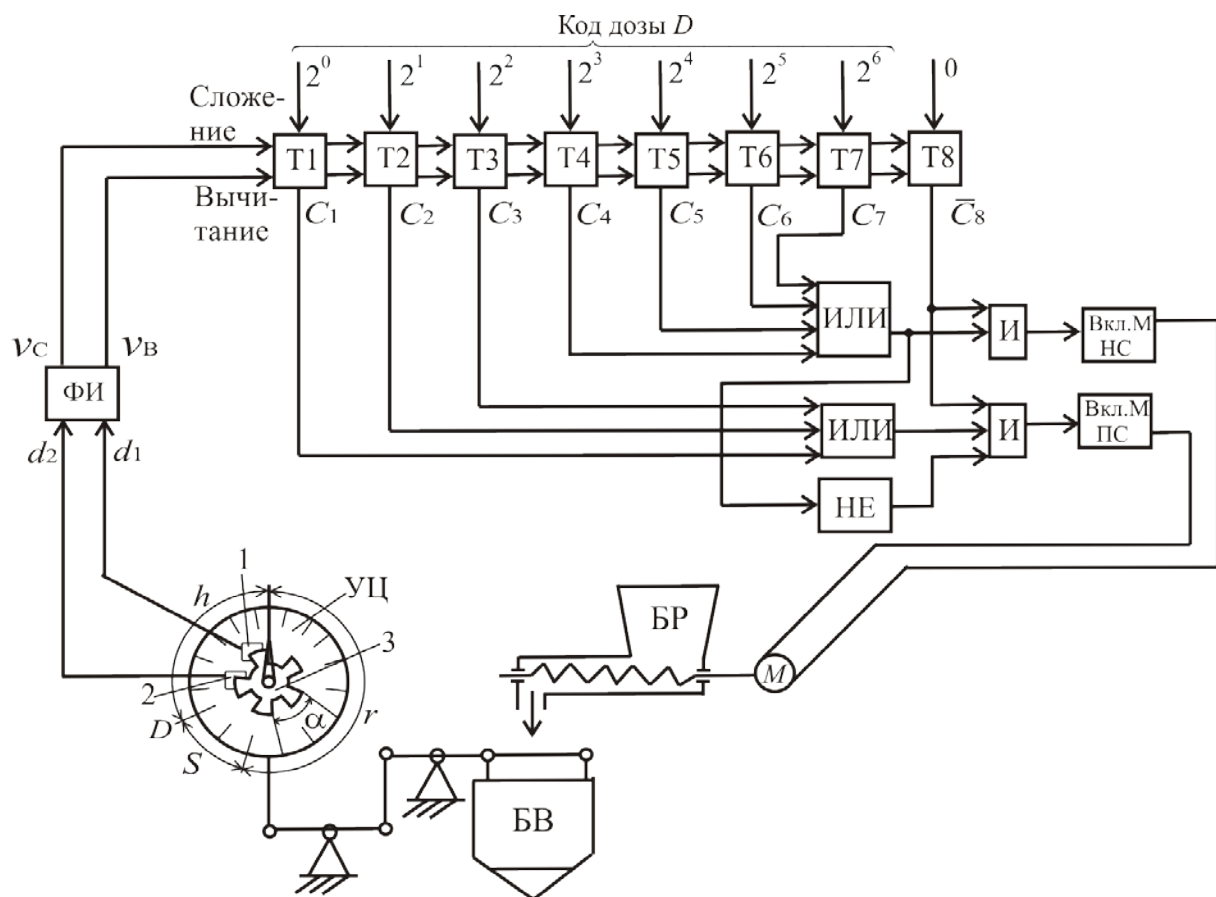


Рис. 5.7. Цифровая автоматическая система управления дозатором

В этой системе для преобразования угла поворота стрелки циферблатного указателя УЦ в унитарный код (последовательность импульсов, число которых соответствует значению контролируемой координаты), используются металлический зубчатый диск 3, непосредственно связанный с осью стрелки, и два автогенераторных датчика 1 и 2, установленных со сдвигом по фазе на четверть шагового интервала α . Сигналы датчиков d_1 и d_2 поступают на входы формирователя импульсов ФИ, который выдает счетные импульсы: при прямом ходе стрелки по каналу вычитания v_B (рис. 5.8, а), при обратном – по каналу сложения v_C (рис. 5.8, б).

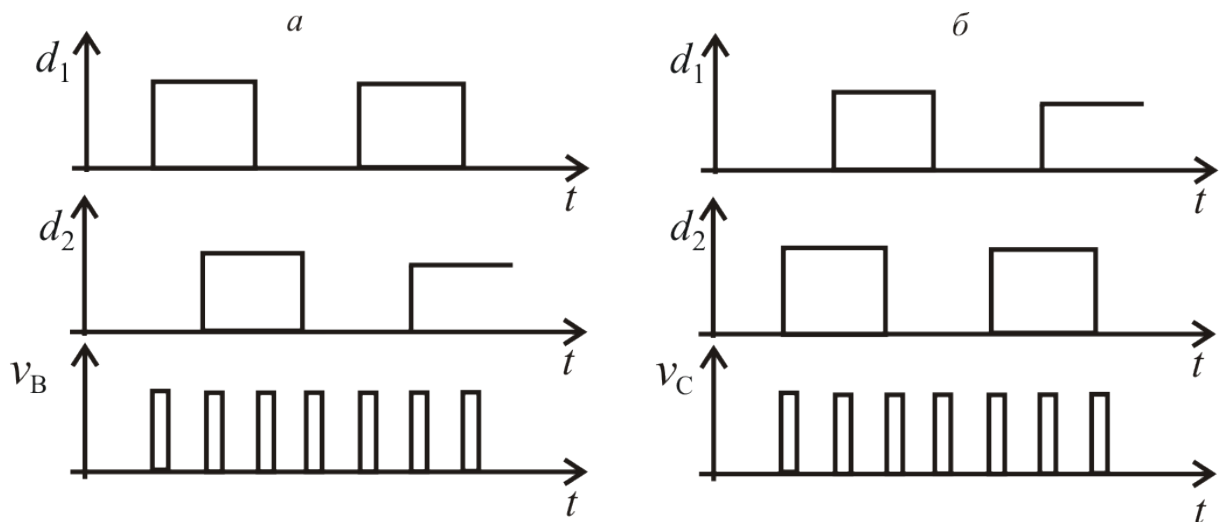


Рис. 5.8. Формирование импульсов при прямом (а) и обратном (б) ходе стрелки

На основании указанных временных диаграмм (см. рис. 5.8) можно записать алгоритмы формирования импульсов унитарного кода:

$$v_B = \overline{d_2} \text{Imp}(0 \rightarrow 1) d_1 \vee d_2 \text{Imp}(1 \rightarrow 0) d_1 \vee d_1 \text{Imp}(0 \rightarrow 1) d_2 \vee \overline{d_1} \text{Imp}(1 \rightarrow 0) d_2;$$

$$v_C = \overline{d_1} \text{Imp}(0 \rightarrow 1) d_2 \vee d_1 \text{Imp}(1 \rightarrow 0) d_2 \vee d_2 \text{Imp}(0 \rightarrow 1) d_1 \vee \overline{d_2} \text{Imp}(1 \rightarrow 0) d_1.$$

Импульсы унитарного кода поступают на вычитающий и суммирующий входы реверсивного двоичного счетчика. Старшие разряды счетчика Т4-Т7 соответствуют зоне r номинального режима загрузки, младшие разряды Т1-Т3 соответствуют зоне s режима досыпки, а дополнительный разряд Т8 – зоне h перегрузки весового бункера (см. рис. 5.7).

В начале каждого цикла дозирования в триггеры основных разрядов вводится в двоичном коде число, соответствующее требуемой дозе материала, а триггер дополнительного разряда устанавливается на нуль.

Алгоритмы формирования командных сигналов номинального режима M_1 и режима пониженной скорости M_2 можно записать так:

$$M_1 = \overline{c_8}(c_4 \vee c_5 \vee c_6 \vee c_7);$$

$$M_2 = \overline{c_8}(c_4 \vee c_5 \vee c_6 \vee c_7)(c_1 \vee c_2 \vee c_3).$$

Когда стрелка циферблатного указателя пройдет зону r , все триггеры старших разрядов переключатся на нуль, а триггеры младших разрядов – на единицу. При этом снимается командный сигнал M_1 и появляется команда M_2 , в результате чего двигатель M питателя включается на пониженную скорость.

Когда стрелка пройдет зону S , все триггеры счетчика переключаются на нуль и двигатель M отключается. Если вследствие динамической перегрузки стрелка окажется в зоне h , то переключается на единицу триггер дополнительного разряда и прекращается управляющее воздействие на двигатель M .

5.3. Автоматические конвейерные весы

Конвейерные весы применяются для решения задач:

- Измерения и индикации мгновенной (текущей) производительности конвейера;
- Учета и регистрации количества транспортируемого материала конвейером за заданное время (интегральной производительности конвейера);
- Дозирования материала при загрузке емкости.

Отечественная промышленность выпускает:

- Тензометрические конвейерные весы (ТКВ), выполненные по компенсационной, тахогенераторной или логометрической схеме;
- Электрогидравлические весы (ЭГВ);
- Электронные конвейерные весы с дистанционной передачей (ЭКВД).

В качестве примера ТКВ рассмотрим конвейерные весы с компенсационной схемой измерения (рис. 5.9).

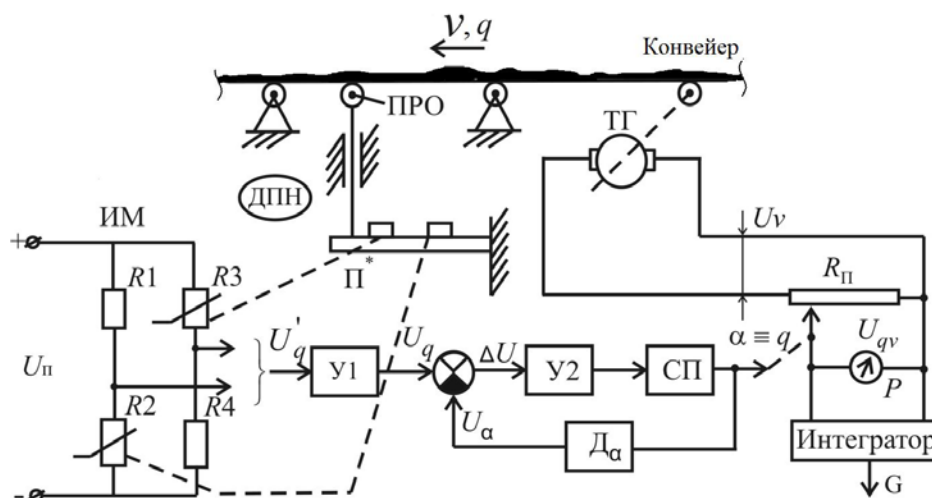


Рис. 5.9. ТКВ с компенсационной схемой измерения

На схеме обозначено:

$R1, R2, R3, R4$ – измерительный мост ИМ с тензорезисторами $R2$ и $R3$, $R1$ и $R4$ – балластные резисторы;

ДПН – датчик погонной нагрузки ленты, содержащий подвижную роликоопору ПРО и пластинчатую пружину П с тензорезисторами;

$U1, U2$ – усилители;

СП – сервопривод;

D_{α} – датчик угла поворота сервопривода;

ТГ – тахогенератор (датчик скорости движения ленты);

R_{Π} – множительный потенциометр;

P – индикатор мгновенной производительности;

q, v – погонная нагрузка и скорость движения ленты;

U_q – сигнал, пропорциональный погонной нагрузке ленты конвейера;

α – угол поворота СП;

U_{qv} – сигнал, пропорциональный мгновенной производительности конвейера;

G – интегральная производительность конвейера.

На выходе потенциометра R_{Π} формируется сигнал, определяющий производительность конвейера:

$$U_{qv} = k_1 qv = Q(t),$$

а на выходе интегратора – сигнал, пропорциональный интегральной производительности (количеству материала, транспортированного конвейером за определенный интервал времени):

$$G = k_2 \int_0^t U_{qv} dt,$$

где k_1, k_2 – коэффициенты пропорциональности.

Интеграторы (рис. 5.10) могут быть выполнены как с электромеханическим счетчиком ЭМС, приводимым в действие серводвигателем M , подключенным к выходу потенциометра, так и с электроимпульсным счетчиком ЭИС, на вход которого подаются счетные импульсы от преобразователя ПНЧ напряжения U_{qv} в частоту f через усилитель – формирователь импульсов УФИ. Достоинством последнего интегратора является простота передачи текущей производительности конвейера в пункт управления.

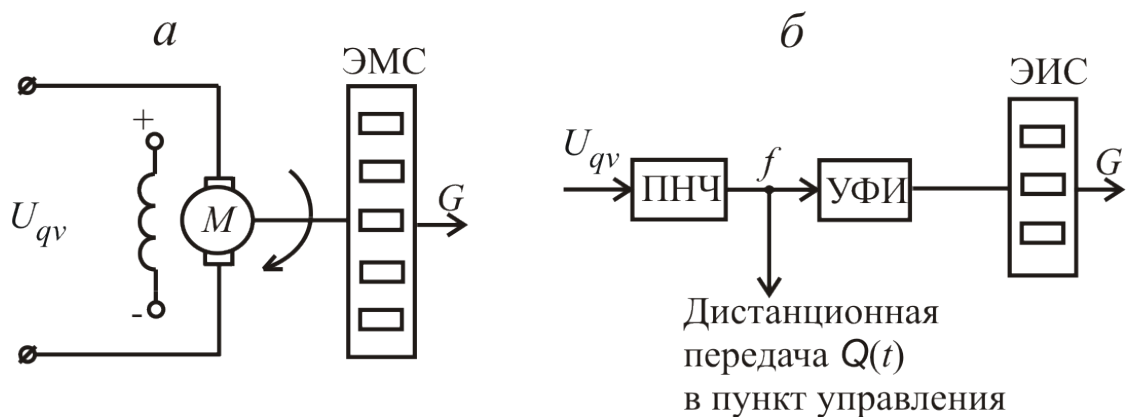


Рис. 5.10. Интеграторы с электромеханическим счетчиком (а) и с электроимпульсным счетчиком (б)

5.4. Автоматические вагонные весы

Рассмотрим схему вагонных тензометрических весов с дискретной компенсацией (рис. 5.11), работающую по принципу поразрядного уравнивания в двоично-десятичном коде.

Измерительный мост весов содержит постоянные резисторы R_2 , R_3 и тензорезисторы R_1 , R_4 , сопротивление которых зависит от нагрузки на упругих элементах 1 и 2. Компенсационный мост содержит постоянные резисторы R_5 - R_8 и переменные резисторы R_9 - R_{14} , сопротивление которых определяется релейно-контактными дешифраторами ДШ-1, ДШ-10 и ДШ-100, связанными с выходами триггеров T_1 - T_{12} трехдекадного двоично-десятичного счетчика импульсов.

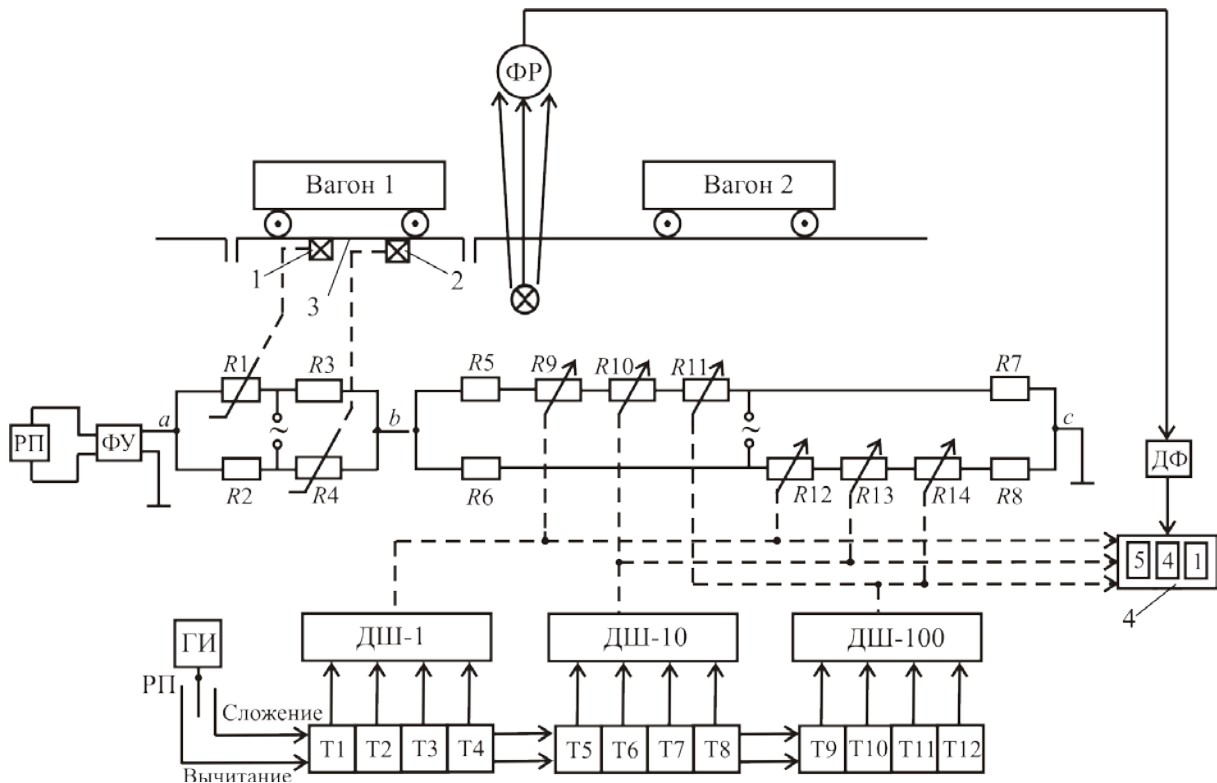


Рис. 5.11. Схема вагонных тензометрических весов с дискретной компенсацией

Поляризованное реле РП, подключенное к выходу фазочувствительного усилителя ФУ, направляет сигналы от генератора импульсов ГИ на суммирующий или вычитающий входы реверсивного счетчика. Автоматическая регистрация массы вагона

с материалом, поступившим на весовую платформу 3, производится в цифропечатающем устройстве 4 по сигналу от дифференцирующего элемента ДФ, связанного с выходом фотореле ФР.

В исходном состоянии схемы весов измерительный и компенсационный мосты сбалансированы, поэтому нет напряжения в диагоналях $a-b$ и $b-c$. При этом все триггеры счетчика импульсов находятся в нулевом положении, а сопротивление резисторов $R9-R14$ полностью выведено. Когда первая пара колес вагона 1 окажется на весовой платформе 3, сопротивления тензорезисторов $R2$ и $R3$ увеличиваются пропорционально нагрузке, действующей на упругие элементы 1 и 2. В результате этого нарушается баланс измерительного моста, в диагонали которого $a-b$ появляется напряжение рассогласования U_R , и фазочувствительный усилитель ФУ включает поляризованное реле РП в режим сложения.

Импульсы от генератора ГИ, поступая на суммирующий вход счетчика, устанавливают определенные триггеры на единицу, вследствие чего происходит переключение контактов дешифраторов ДШ-1, ДШ-10, ДШ-100 и соответствующее увеличение сопротивлений резисторов $R9-R14$. При этом нарушается баланс компенсационного моста, в диагонали которого $b-c$ появляется напряжение U_K , уравновешивающее напряжение рассогласования U_R .

В случае равенства напряжений U_R и U_K реле РП отключается и схема весов будет находиться в устойчивом состоянии, при котором выходные сигналы дешифраторов отображают в десятичном коде массу груза, поступившего на весовую платформу.

После того как последняя пара колес вагона 1 накатывается на весовую платформу, появляется сигнал от фотореле ФР и дифференцирующий элемент ДФ выдает командный импульс на регистрацию в цифропечатающем устройстве 4 массы груза, зафиксированной в счетчике импульсов.

Для обеспечения высокого быстродействия и надежности весов с дискретной компенсацией дешифраторы единиц ДШ-1, десятков ДШ-10 и сотен ДШ-100 следует выполнять на основе герметизированных магнитоуправляемых контактов (герконов).

6. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ

ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

6.1. Автоматизация процессов обжига и охлаждения клинкера

Обжиговый агрегат включает в свой состав (рис. 6.1):

- Вращающуюся печь (цилиндр длиной до 230 м, диаметром до 7 м, с частотой вращения до 1,5 об/мин, с углом наклона к горизонту 5°);
- Холодильник для охлаждения клинкера;
- Дымосос;
- Аспирационную установку для очистки воздуха, подаваемого в атмосферу, от пыли при поддержании разряжения в горячей головке печи.

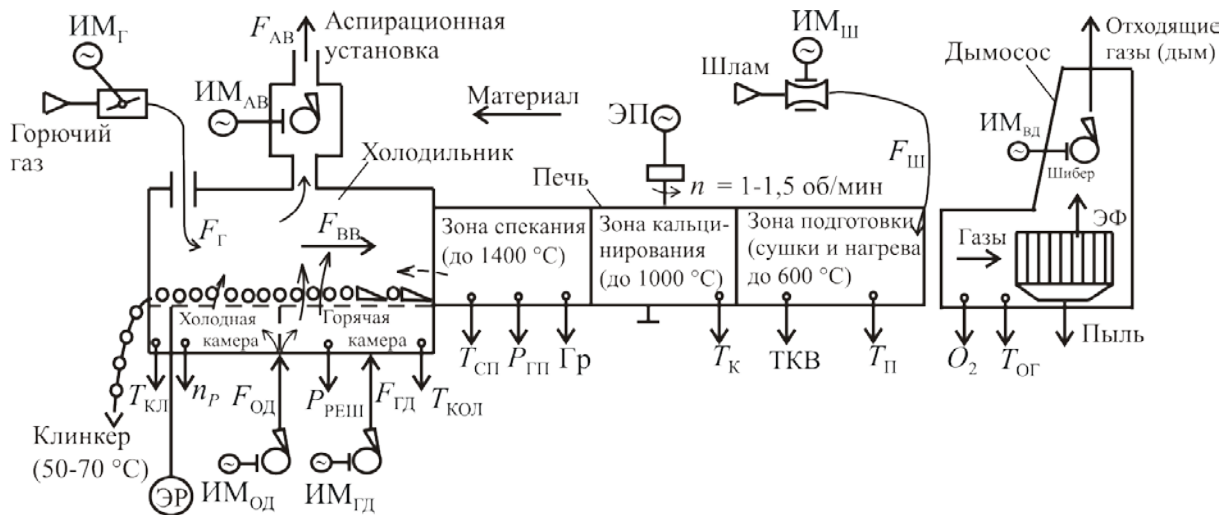


Рис. 6.1. Технологическая схема и контролируемые параметры обжигового агрегата

На схеме приняты следующие обозначения:

Элементы схемы:

$ЭП$ – электропривод печи;

$ЭР$ – электропривод колосниковой решетки холодильника;

$ЭФ$ – электрический фильтр дыма;

$ИМ_Г$, $ИМ_{АВ}$, $ИМ_{ОД}$, $ИМ_{ГД}$, $ИМ_{Ш}$, $ИМ_{ВД}$ – исполнительные механизмы (приводы) соответственно заслонки газа, направляющего аппарата аспирационного воздуха, направляющих аппара-

тов вентиляторов общего дутья и горячего дутья, пережимного устройства подачи шлама и направляющего аппарата вентилятора дымососа.

Технологические параметры:

$F_{ВВ}$, $F_{Г}$, $F_{Ш}$, $F_{ОД}$, $F_{ГД}$, $F_{АВ}$ – расходы соответственно вторичного воздуха, горючего газа, шлама, воздуха общего и горячего дутья и аспирационного воздуха;

$P_{ГП}$, $P_{РЕШ}$ – давление в горячей головке печи (разряжение) и под колосниковой решеткой;

n_p – скорость движения решетки;

$T_{ОГ}$, $T_{К}$, $T_{СП}$, $T_{КОЛ}$, $T_{КЛ}$, $T_{П}$ – температура соответственно отходящих газов, в зоне кальцинирования, в зоне спекания, первого ряда колосниковой решетки, клинкера на выходе из холодильника и в зоне подготовки;

ТКВ – точка критической влажности: характеризует такое состояние подсушенного шлама, когда последний отлипает от стенок футировки печи;

n – частота вращения печи;

O_2 – содержание кислорода в отходящих газах;

Γ_p – гранулометрический состав (крупность клинкера).

Параметры контроля положений регулирующих органов (заслонки, направляющих аппаратов вентиляторов и др.) и состояния приводов печи и вентиляторов на данной схеме не показаны.

Большинство из указанных параметров контролируются с помощью стандартных средств. Однако для контроля ряда параметров используются специализированные устройства.

Устройства контроля ТКВ показаны на рис. 6.2.

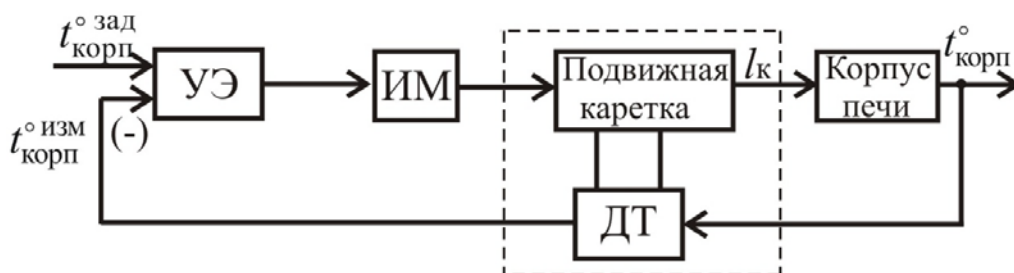


Рис. 6.2. Устройства контроля ТКВ

Устройство представляет собой автоматическую следящую систему, содержащую управляющий элемент УЭ (регулятор), исполнительный механизм ИМ (привод каретки), датчик температуры ДТ корпуса печи в зоне подготовки (радиационный пирометр РАПИР, установленный на каретке). Управление перемещением каретки l_K осуществляется по принципу поиска точки на поверхности печи, температура в которой равна заданной, т.е. $t_{\text{корп}}^{\circ} = t_{\text{корп}}^{\circ\text{зад}} = \text{const}$. При этом положение каретки определяет точку критической влажности подсушенного шлама.

Устройство контроля гранулометрического состава

Для контроля крупности частиц клинкера используется телевизионная установка ПТУ-4 совместно с измерительным блоком и самописцем (рис. 6.3).

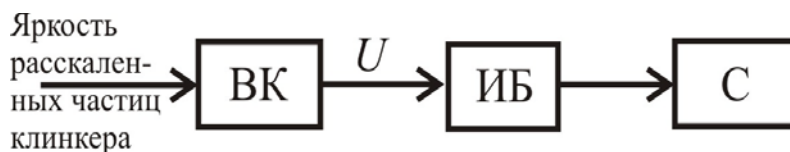


Рис. 6.3. Устройство контроля гранулометрического состава клинкера

Устройство содержит видеокамеру ВК, преобразующую световой поток частиц клинкера в электрический сигнал U , который с помощью измерительного блока ИБ воздействует на самописец С гранулометрического состава Гр.

Устройство контроля температуры в зоне спекания

Для измерения температуры $T_{\text{сп}}$ используется цветовой пирометр «Спектропир 4-01».

Система автоматического регулирования процессов обжига и охлаждения клинкера

САР технологических параметров обжигового агрегата ОА приведена на рис. 6.4.

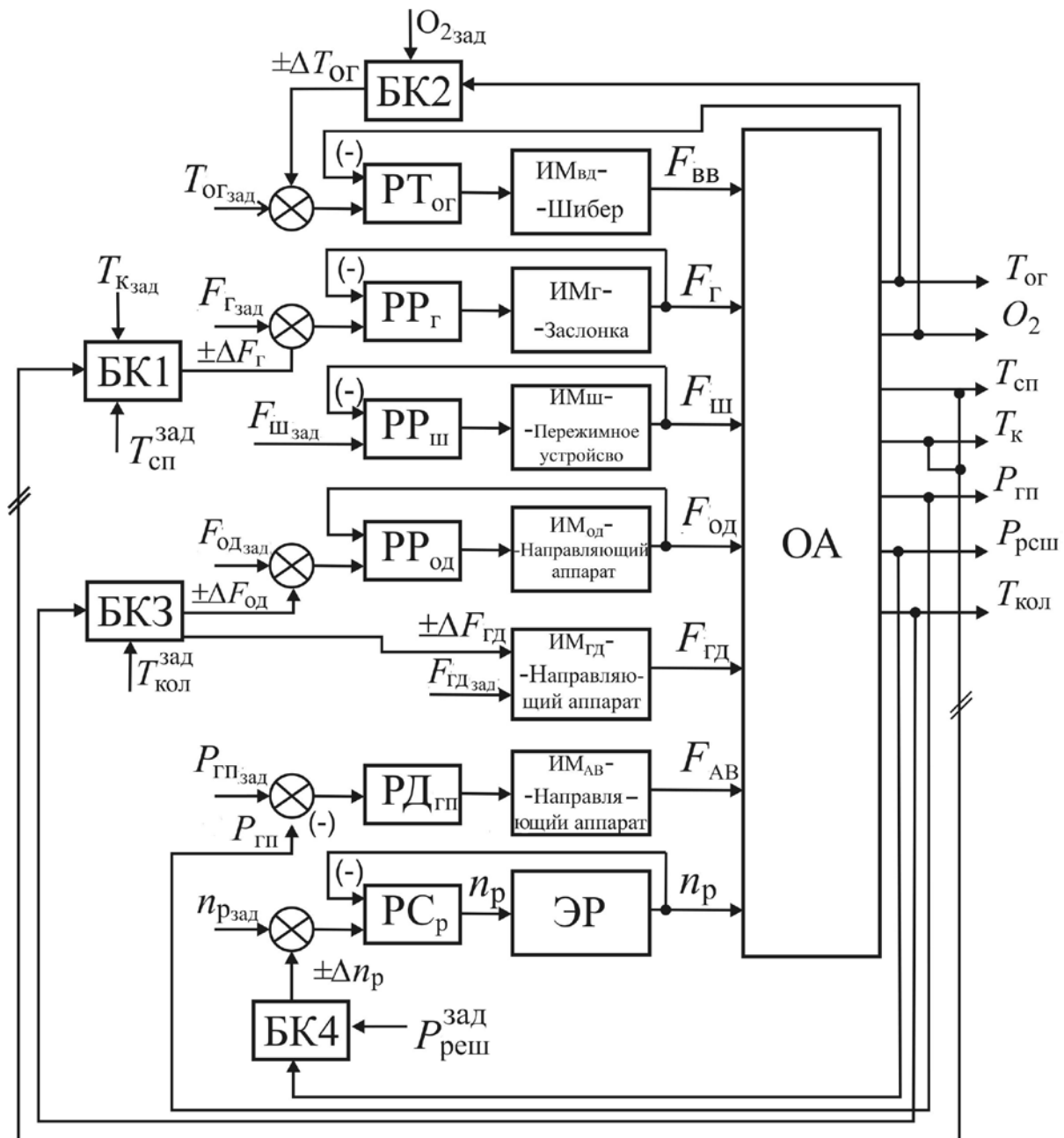


Рис. 6.4. Структурная схема САР процессов обжига и охлаждения клинкера

Система обеспечивает:

- Стабилизацию качества клинкера;
- Снижение расхода топлива и электроэнергии;
- Охлаждение клинкера до температуры транспортирования 50–60 °С.

Регулирование процесса обжига осуществляется по косвенной информации о состоянии материала в различных зонах печи, а именно по температурным параметрам.

Система содержит следующие автоматические регуляторы:

$РТ_{ог}$ – регулятор температуры отходящих газов;

$РР_Г$, $РР_Ш$, $РР_{од}$ – регуляторы расхода газа, шлама, воздуха общего дутья;

$РД_{гп}$ – регулятор давления (разряжения) в горячей головке печи;

$РС_р$ – регулятор скорости движения колосниковой решетки.

Процесс регулирования корректируется следующими блоками коррекции:

БК1 – блок коррекции заданного расхода горючего газа по $T_к$ и $T_{сп}$ (для стабилизации процесса обжига в зонах кальцинирования и спекания);

БК2 – блок коррекции заданной температуры отходящих газов по содержанию кислорода O_2 (для обеспечения экономичности процесса горения);

БК3 – блок коррекции заданных расходов воздуха общего и горячего дутья по температуре $T_{кол}$ (для нормализации работы холодильника);

БК4 – блок коррекции заданной частоты вращения электродвигателя колосниковой решетки n_p (для оптимизации возврата тепла в печь с целью повышение КПД печи).

6.2. Автоматизация процесса сушки добавок к цементу в сушильном агрегате с прямоточным сушильным барабаном

Цель автоматизации процесса сушки заключается в обеспечении заданной влажности высушенного материала при максимальной производительности сушильного агрегата.

Технологическая схема и контролируемые параметры процесса сушки в барабане представлены на рис. 6.5.

Рис. 6.5. Технологическая схема процесса сушки в барабане

На схеме обозначено:

Элементы сушильного агрегата:

БР – бункер расходный;

ТП – тарельчатый питатель;

СК – смесительная камера;

ПБ – приемный бункер;

Д – дымосос;

Ж – желоб;

ЭПБ – электропривод барабана.

Технологические параметры:

$F_{ПВ}, F_{ВВ}, F_{ОА}, F_{СМ}, F_{Т}$ – расход первичного воздуха, вторичного воздуха, отработанного сушильного агента, сырого материала и топлива;

$P_{ВВ}, P_{СК}$ – давление вторичного воздуха и газов в смесительной камере (разряжение);

$T_{СК}, T_{1М}, T_{ВМ}$ – температура в смесительной камере, на первом метре в сушильном барабане и высушенного материала;

$h_{Н}$ – нижний уровень материала в бункере;

$h_{\text{Ж}}$ – уровень заполнения желоба (течки);

$n_{\text{Б}}$ – скорость барабана.

САР процесса сушки включает в себя две подсистемы:

- **Подсистему автоматического управления подачей топлива** по принципу поддержания постоянного теплового потока для обеспечения максимальной производительности:

$$T_{\text{СК}} = T_{\text{СКзад}} = \text{const}.$$

В этой подсистеме реализуется также автоматическое ограничение подачи топлива при выполнении любого из следующих условий: $n_{\text{Б}} = 0$, $h_{\text{Ж}} \geq h_{\text{Ж}}^{\text{зад}}$, $P_{\text{ВВ}} \leq P_{\text{ВВ}}^{\text{зад}}$, $P_{\text{СК}} \geq P_{\text{СК}}^{\text{зад}}$, $h_{\text{Н}} = 0$;

- **Подсистему регулирования загрузки барабана сырым материалом** по принципу:

$$T_{\text{ВМ}} = T_{\text{ВМзад}} = \text{const}.$$

Влажность высушенного материала в рассматриваемой сушилке измеряется косвенно по его температуре (рис. 6.6).

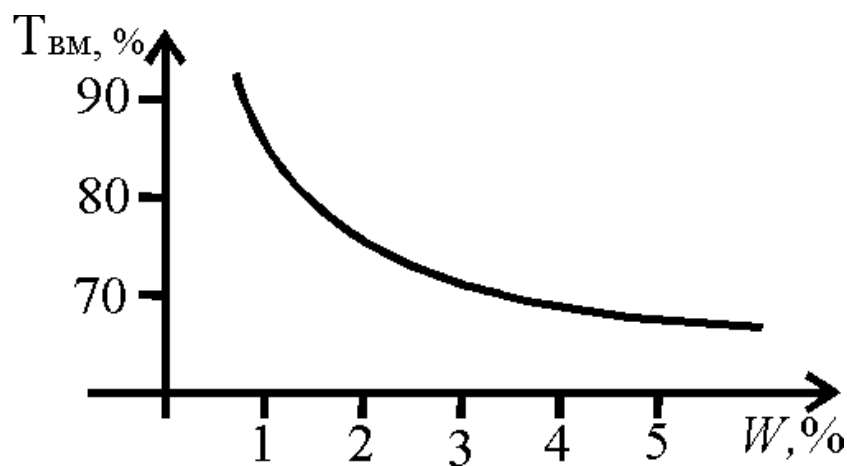


Рис. 6.6. График зависимости температуры высушенного материала от его влажности

Структурная схема САР процесса сушки влажного материала в сушильном барабанном агрегате показана на рис. 6.7.

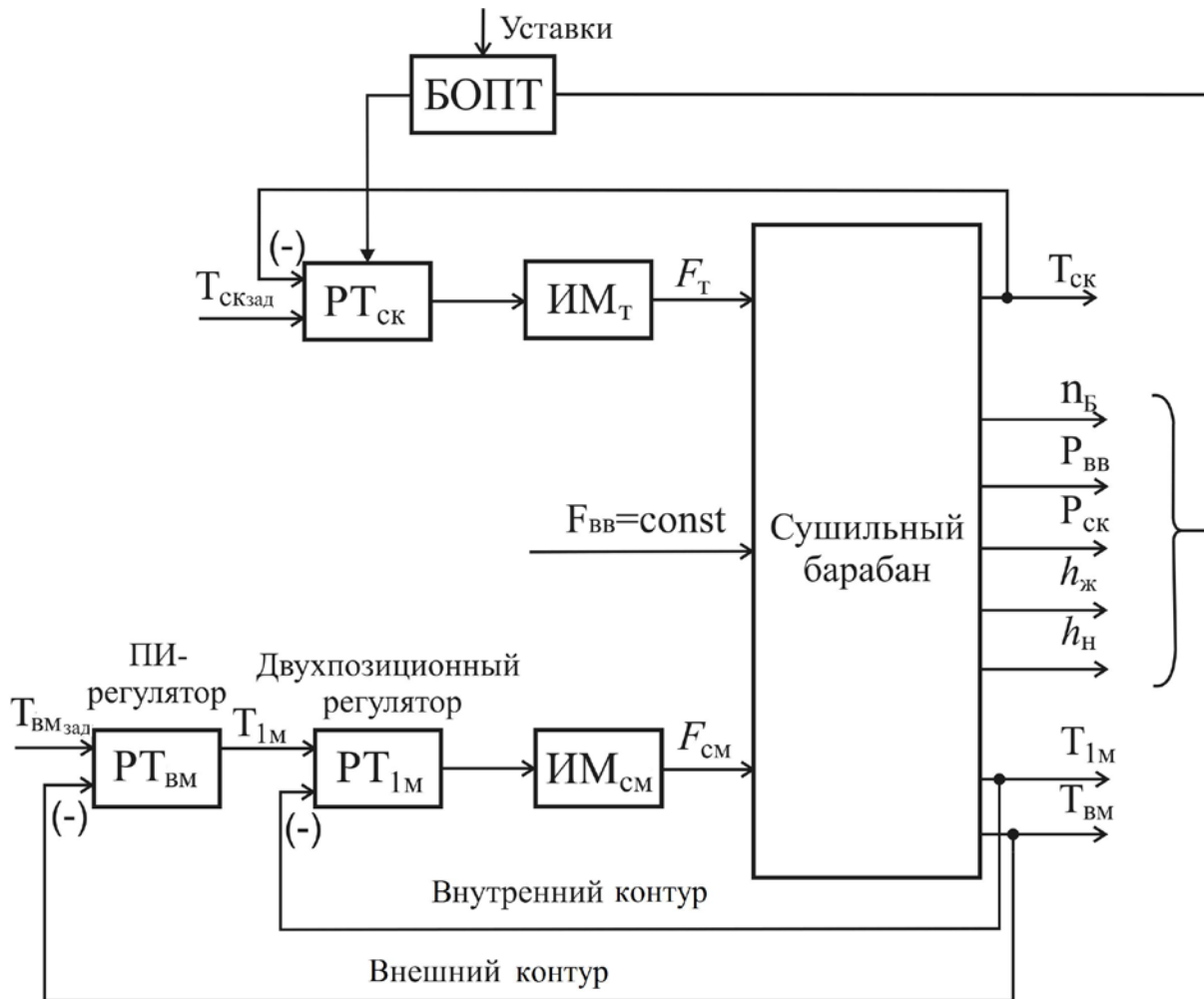


Рис. 6.7. САР процесса сушки

САР содержит следующие элементы:

$РТ_{СК}$, $РТ_{ВМ}$, $РТ_{1М}$ – автоматические регуляторы температуры в смесительной камере, высушенного материала, на первом метре в сушильном барабане;

$ИМ_Т$, $ИМ_{СМ}$ – исполнительные механизмы (приводы) совместно с регулируемыми органами подачи топлива и сырого материала;

БОПТ – блок ограничения подачи топлива, снижающий подачу топлива при отклонении контролируемых параметров от допустимых значений (уставок).

Подсистема стабилизации температуры высушенного материала является каскадной. Объект регулирования в этой подсистеме по каналу $F_{СМ} - T_{ВМ}$ описывается передаточной функцией

последовательно соединенных звеньев апериодического и постоянного запаздывания:

$$W_0(p) = \frac{T_{\text{вм}}(p)}{F_{\text{см}}(p)} = \frac{k_0}{T_0 p + 1} e^{-p\tau_0},$$

где $\tau_0 = 20 - 30$ мин – транспортное запаздывание; k_0, T_0 – передаточный коэффициент и постоянная времени объекта.

6.3. Автоматизация процесса сушки материала в ленточной конвейерной сушилке

Технологическая схема процесса сушки представлена на рис. 6.8.

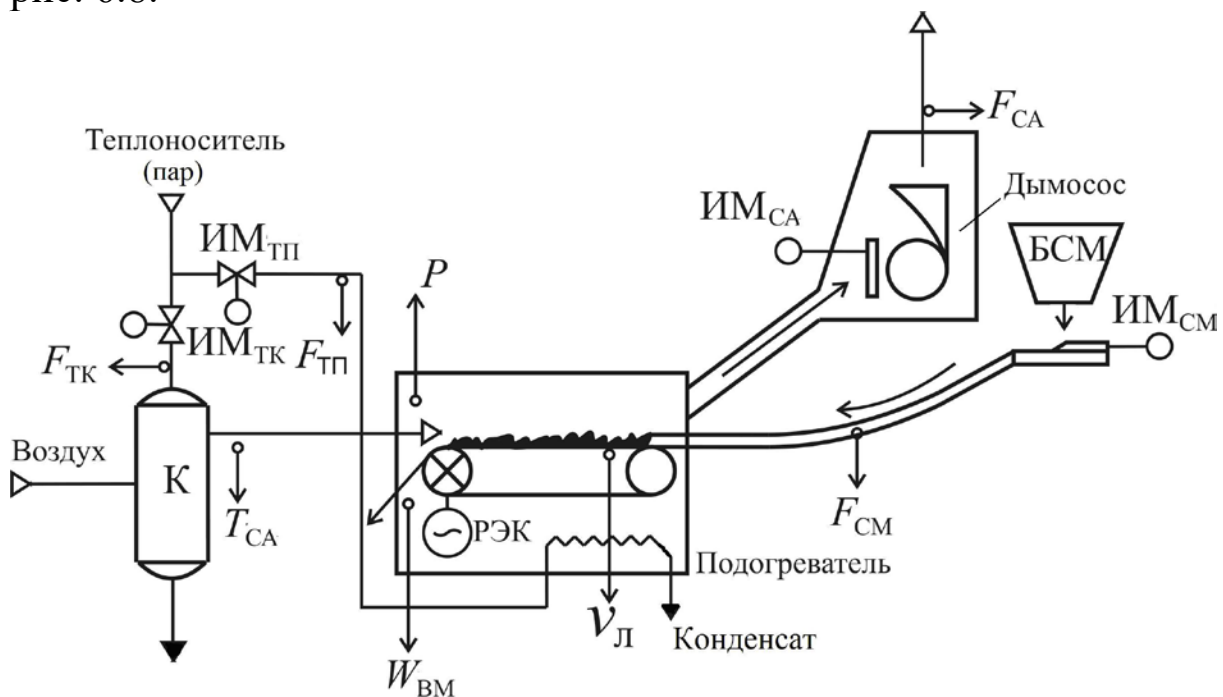


Рис. 6.8. Технологическая схема процесса сушки в конвейерной сушилке

На схеме приняты следующие обозначения:

К – калорифер;

РЭК – регулируемый электропривод конвейера;

БСМ – бункер сырого материала;

ИМ_{ТП}, ИМ_{ТК}, ИМ_{СА}, ИМ_{СМ} – исполнительные механизмы (приводы) совместно с регулирующими органами расходов

соответственно теплоносителя в подогревателе и калорифере расходов сушильного агента и сырой смеси;

T_{CA} – температура сушильного агента на входе в сушилку;

P – разряжение в сушилке;

$F_{ТП}, F_{ТК}, F_{СМ}, F_{СА}$ – расход теплоносителя соответственно в подогревателе и калорифере, сырого материала и сушильного агента;

$W_{ВМ}$ – влажность высушенного материала;

$V_{Л}$ – скорость ленты конвейера.

Система автоматического регулирования процесса сушки показана на рис. 6.9.

Рис. 6.9. САР процесса сушки в конвейерной сушилке

Система содержит пять автономных контуров регулирования, включающих в свой состав автоматические регуляторы

PP_{CM} , PT , $PP_{ТП}$, $PВ$, PP_{CA} – соответственно расхода сырой смеси, температуры сушильного агента на входе в сушилку, расхода теплоносителя в подогревателе, влажности высушенного материала и разряжения в сушилке.

САР поддерживает на заданном уровне следующие параметры процесса сушки:

- Температуру сушильного агента на входе в сушилку по закону $T_{CA} = T_{CAзад} = \text{const}$ с целью обеспечения максимальной производительности сушилки;
- Разряжение в сушилке по закону $P = P_{зад} = \text{const}$ для обеспечения эффективного удаления отработанного сушильного агента и сокращения подсоса холодного воздуха;
- Влажность высушенного материала по закону $W_{BM} = W_{BMзад} = \text{const}$ для обеспечения качества высушенного материала;
- Расход сырого материала по закону $F_{CM} = F_{CMзад} = \text{const}$ для стабилизации процесса сушки;
- Расход теплоносителя в подогревателе по закону $F_{ТП} = F_{ТПзад} = \text{const}$ для достижения необходимой точности поддержания влажности высушенного материала.

6.4. Автоматизация пропарочных камер

Наиболее распространенными агрегатами периодического действия, осуществляющими термовлажностную обработку железобетонных изделий, являются пропарочные камеры. Известные типы камер:

- Ямные пропарочные камеры с нижней системой разводки перфорированных паропроводов;
- Безнапорные пропарочные камеры профессора Л. А. Семенова с нижней и верхней разводками и с обратной трубкой для отвода паровоздушной смеси;
- Пропарочные камеры профессора А. А. Вознесенского с подачей пара через сопла Лаваля.

Камеры оборудованы гидравлическими затворами для герметизации крышек и вытяжной вентиляцией камер и изделий после окончания процесса.

Термовлажностная обработка в ямных пропарочных камерах производится в паровоздушной среде при атмосферном давлении и температуре 60–90 °С.

В безнапорных пропарочных камерах профессора Л. А. Семенова процесс осуществляется в среде насыщенного пара нормального давления при температуре 95–100 °С. В начале процесса пар подается в нижние перфорационные трубы, в результате чего камера и изделия постепенно нагреваются. При температуре 85–90 °С нижняя разводка паропроводов отключается, и пар начинает подаваться сверху. Сухой пар постепенно вытесняет насыщенную паровоздушную смесь из камеры через обратную трубу. Идет изотермический процесс.

В камере профессора А. А. Вознесенского пар подается с повышенной скоростью. Это выравнивает температурное поле и улучшает теплообмен между паровоздушной средой и изделием. Такой метод повышения эффективности позволяет сократить расход пара и длительность тепловой обработки изделий примерно в два раза.

Для выбора системы автоматизации камер необходимо знать рекомендуемый режим обработки изделий, который характеризуется предварительной выдержкой изделий до начала тепловой обработки, интенсивностью подъема температуры в камере, температурой и длительностью изотермического прогрева, скоростью остывания бетона при охлаждении.

Допустимая максимальная скорость подъема температуры среды в камере составляет от 20 до 35 град/ч. Автоматизацию тепловых процессов пропарочных камер наиболее целесообразно осуществлять по температуре изделия, но отсутствие измерительной аппаратуры для этой цели вынуждает управлять процессом по температуре паровоздушной среды, окружающей обрабатываемое изделие. Структурная схема автоматической системы регулирования температуры паровоздушной среды в пропарочной камере представлена на рис. 6.10.

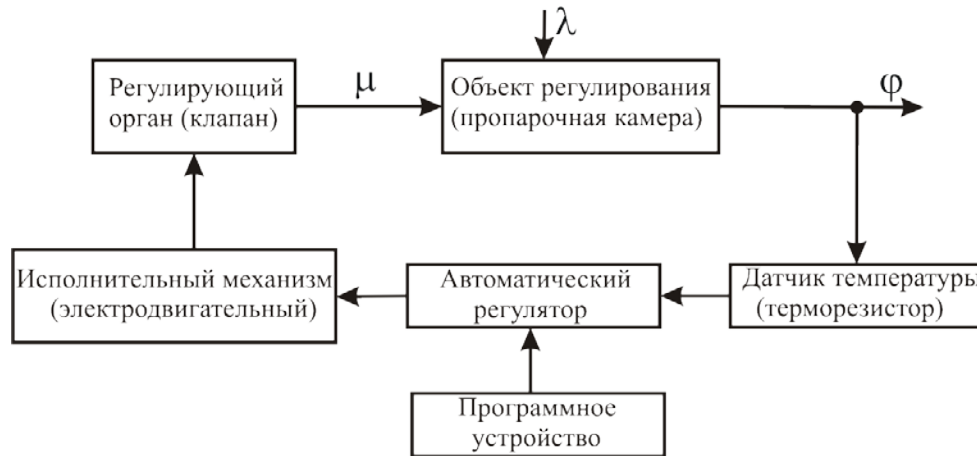


Рис. 6.10. Структурная схема системы автоматического регулирования температуры паровоздушной среды в пропарочной камере

Для исследования автоматической системы управления процессом термовлажностной обработки необходимо дать математическое описание камеры как объекта управления.

Режим термовлажностной обработки изделий в пропарочных камерах характеризуется программой изменения температуры паровоздушной среды. При этом делается допущение, что нагрев изделий равномерный, а условия по всему объему камеры одинаковые.

Для составления уравнения динамики пропарочной камеры воспользуемся законом сохранения энергии. В камеру в единицу времени поступает количество тепла Q_1 , которое идет на нагрев камеры, форм и бетонных изделий, на испарение воды, нагрев среды, а также на потери Q_2 . Составим уравнение теплового баланса за интервал времени dt :

$$G_n c_n d\Theta = (Q_1 - Q_2) dt, \quad (6.1)$$

где G_n – масса термовлажностной среды;

Θ – температура среды;

c_n – теплоемкость среды.

Из уравнения динамики (6.1) получим

$$G_n c_n \frac{d\Theta}{dt} = Q_1 - Q_2. \quad (6.2)$$

Из уравнения (6.1) и (6.2) получим дифференциальное уравнение объекта в приращениях

$$G_n c_n \frac{d\Delta\Theta}{dt} = \Delta Q_1 - \Delta Q_2. \quad (6.3)$$

Запишем факторы, влияющие на ΔQ_1 и ΔQ_2 :

- $\Delta Q_1 = f(\Theta, h, t),$

где h – перемещение регулируемого органа. Разложим это выражение в ряд Тейлора по малым приращениям и отбросим все члены выше первого порядка:

$$\Delta Q_1 = \frac{\partial Q_1}{\partial \Theta} \Delta\Theta + \frac{\partial Q_1}{\partial h} \Delta h; \quad (6.4)$$

- $\Delta Q_2 = f(\Theta, t) + Q_{\text{ут}}(t),$

где $Q_{\text{ут}}(t)$ – утечка пара.

Разложим это выражение в ряд Тейлора:

$$\Delta Q_2 = \frac{\partial Q_2}{\partial \Theta} \Delta\Theta + Q_{\text{ут}}(t). \quad (6.5)$$

Уравнение (6.4) и (6.5) подставим в уравнение (6.3):

$$G_n c_n \frac{d(\Delta\Theta)}{dt} = \frac{\partial Q_1}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial Q_1}{\partial \Theta} \Delta\Theta - \frac{\partial Q_2}{\partial \Theta} \Delta\Theta - Q_{\text{ут}}(t),$$

после преобразования последнего получим:

$$G_n c_n \frac{d(\Delta\Theta)}{dt} + \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \Theta} - \frac{\partial Q_1}{\partial \Theta} \right) \Delta\Theta = \frac{\partial Q_1}{\partial h} \Delta h - Q_{\text{ут}}(t). \quad (6.6)$$

Перейдем к относительным величинам:

$$\frac{\Delta\Theta}{\Theta_{\text{max}}} = \varphi - \text{относительное значение регулируемой величины};$$

ны;

$$\frac{\Delta h}{h_{\text{max}}} = \mu - \text{относительное перемещение регулирующего ор-}$$

гана;

$\frac{\Delta Q_{\text{ут}}}{Q_{\text{утmax}}} = \lambda$ – относительное значение утечки (возмущение).

Подставим в выражение (6.6) эти обозначения:

$$G_n c_n \Theta_{\text{max}} \frac{d\varphi}{dt} + \left(\frac{\partial Q_2 - \partial Q_1}{\partial \Theta} \right) \Theta_{\text{max}} \varphi = \frac{\partial Q_1}{\partial h} h_{\text{max}} \mu - \lambda. \quad (6.7)$$

Обозначим $\frac{\partial Q_1}{\partial h} h_{\text{max}} = Q_{1\text{max}}$.

Разделим правую и левую части уравнения (6.7) на $Q_{1\text{max}}$ и получим уравнение с безразмерными коэффициентами:

$$\frac{G_n c_n \Theta_{\text{max}}}{Q_{1\text{max}}} \frac{d\varphi}{dt} + \frac{\Theta_{\text{max}}}{Q_{1\text{max}}} \left(\frac{\partial Q_2 - \partial Q_1}{\partial \Theta} \right) \varphi = \mu - \lambda. \quad (6.8)$$

Введем следующие обозначения:

$T = \frac{G_n c_n \Theta_{\text{max}}}{Q_{1\text{max}}}$ – время разгона объекта;

$A = \frac{\Theta_{\text{max}}}{Q_{1\text{max}}} \left(\frac{\partial Q_2 - \partial Q_1}{\partial \Theta} \right)$ – коэффициент, характеризующий

самовыравнивание объекта регулирования.

Самовыравнивание рассматривается как способность температуры среды в пропарочной камере самопроизвольно приходить к новому установившемуся значению без помощи автоматического регулятора. Самовыравнивание характеризуется коэффициентом, который для пропарочной камеры больше нуля. Это легко показать, используя графики зависимости расхода тепла и теплотери в функции температуры паровоздушной смеси. Как показано на рис. 6.11, кривая $Q_1 = f_1(\Theta)$ является возрастающей функцией температуры, следовательно, $\frac{\partial Q_1}{\partial \Theta} > 0$. Тепловой про-

цесс в камере при скачкообразном изменении возмущающего действия протекает экспоненциально (рис. 6.12).

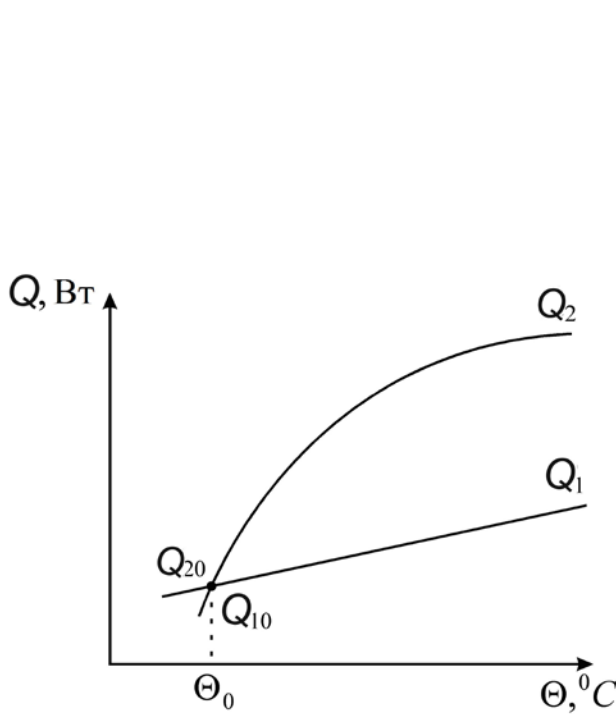


Рис. 6.11. Кривые зависимости Q_2 от Q_1 температуры в пропарочной камере

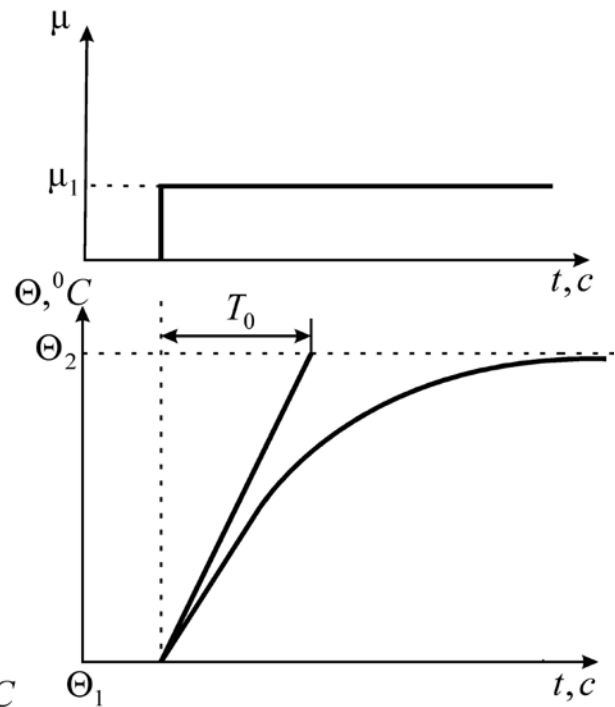


Рис. 6.12. Переходный процесс при регулировании температуры

Кривая $Q_2 = f_2(\Theta)$ также является функцией температуры, но $\frac{\partial Q_1}{\partial \Theta} < \frac{\partial Q_2}{\partial \Theta}$ и, следовательно, $\frac{\partial Q_2 - \partial Q_1}{\partial \Theta} > 0$.

Таким образом, для пропарочной камеры коэффициент саморавнования A – положительный. Подставляем выражение для T и A в уравнение (6.8):

$$T \frac{d\varphi}{dt} + A\varphi = \mu - \lambda. \quad (6.9)$$

Разделим левую и правую части уравнения (6.9) на A :

$$\frac{T}{A} \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = \frac{1}{A} \mu - \frac{1}{A} \lambda$$

или

$$T_0 \varphi + \varphi = k\mu - \lambda, \quad (6.10)$$

где T_0 – постоянная времени объекта, с;
 k – коэффициент передачи объекта.

Решая дифференциальное уравнение (6.10) при скачкообразном возмущении и нулевых начальных условиях, получим

$$\varphi = \mu(1 - e^{-t/T_0}).$$

Таким образом, передаточная функция объекта регулирования

$$W_0(p) = \frac{k}{T_0 p + 1}.$$

Итак, при изучении пропарочной камеры как объекта регулирования установлено:

- Камера обладает положительным коэффициентом самовыравнивания;
- Температура паровоздушной среды при скачкообразном увеличении подачи пара нарастает по экспоненциальному закону;
- Постоянная времени этой экспоненты достаточно велика.

Таким образом, пропарочная камера для системы авторегулирования является инерционным звеном с большой постоянной времени. Это позволяет использовать двухпозиционное регулирование. Аналогичными уравнениями описываются кассетные установки и термоформы.

В качестве примера рассмотрим систему автоматизации пропарочной камеры ямного типа, представленную на рис. 6.13.

Камера с изделиями нагревается паром через перфорированную трубу, расположенную внизу камеры. Давление пара в подводящей магистрали стабилизируется регулятором прямого действия. Датчик температуры паровоздушной среды (терморезистор) устанавливается в рабочем пространстве камеры. Управление подачей пара осуществляется электродвигательным исполнительным механизмом *M1*, охлаждающей камеры – вентилятором с электродвигателем *M2*. Цикл управления состоит из двух этапов: тепловая обработка изделий – охлаждение камеры.

Система автоматизации обеспечивает следующие функции:

- Автоматический контроль (индикацию и регистрацию) параметров – температуры паровоздушной смеси, давления и расхода пара;
- Автоматическую сигнализацию о работе вентилятора, отклонении давления пара от заданных значений;
- Автоматическое программное регулирование температуры паровоздушной среды в камере;

- Дистанционное управление электродвигателем вентилятора охлаждения камеры.

Рис. 6.13. Система автоматизации пропарочной камеры
ямного типа

Автоматическое регулирование теплового режима в камере может обеспечиваться как дискретными, так и непрерывными регуляторами, а также микропроцессорными средствами.

На заводах ЖБИ для автоматизации процессов тепловой обработки применяются промышленные регуляторы температуры типа ПРТЭ-2М, ЭРП-61, системы централизованного контроля и программного управления тепловлажностной обработкой изделия ПУСК-3П, СКР-Ж. Разработана микропроцессорная система управления, позволяющая обслужить до 16 пропарочных камер. Система представляет собой сеть микроконтроллеров на базе однокристальных ЭВМ серии КР 1816 и центральной микроЭВМ на микропроцессорах серии К 580.

Центральная ЭВМ обеспечивает анализ работы и текущего состояния каждой из пропарочных камер, выбор и задание режима обработки изделий, представление параметров технологических процессов по требованию оператора и передачу данных к ЭВМ высшего уровня. Локальные ЭВМ осуществляют управление (регулирование) процессами тепловлажностной обработки в соответствующих пропарочных камерах, т.е. они используются как ЭВМ-регуляторы.

7. АВТОМАТИЗАЦИЯ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

7.1. Автоматизация процесса ректификации

Ректификация – разделение жидкой смеси на дистиллят и осадок путем использования способов испарения и конденсации.

Процесс ректификации относится к основным процессам химической технологии. Показателем эффективности его является состав целевого продукта, в качестве которого может выступать как дистиллят, так и кубовый остаток. Поддержание постоянного состава целевого продукта является целью управления. Состав другого продукта при этом может колебаться в определенных пределах вследствие изменения состава исходной смеси. В дальнейшем будем считать целевым продуктом дистиллят.

В качестве объекта управления при автоматизации процесса ректификации примем установку для разделения бинарной смеси, состоящую из тарельчатой ректификационной колонны 2, выносного кипятильника 4, дефлегматора 3 и теплообменника для подогрева исходной смеси 1 (рис. 7.1).

Для управления расходами различных потоков установки используются исполнительные механизмы (приводы) $ИМ_{ТТ}$, $ИМ_{С}$, $ИМ_{ТК}$, $ИМ_{Ф}$, $ИМ_{КО}$, $ИМ_{Х}$ – с регулирующими органами соответственно теплоносителя в теплообменнике, исходной смеси, теплоносителя в калорифере, флегмы, жидкости в кубе колонны, хладоносителя в конденсаторе.

Контролируемые параметры процесса ректификации (см. рис. 7.1):

$F_{ТТ}$, $F_{С}$, $F_{ТК}$, $F_{Ф}$, $F_{КО}$, $F_{Х}$, $F_{Д}$ – расходы соответственно теплоносителя в теплообменнике, исходной смеси, теплоносителя в калорифере, флегмы, жидкости в кубе колонны, хладоносителя в конденсаторе, дистиллята;

$P_{П}$, $Q_{П}$ – давление и состав пара в верхней части колонны;

$Q_{Д}$, $Q_{С}$ – концентрация искомого компонента в дистилляте и в исходной смеси;

P_K, Q_K – давление и состав пара в нижней части колонны (в кубе);

T_K, L_K – температура и уровень жидкости в кубе колонны;

T – температура на разных уровнях в колонне;

T_C – температура подогретой смеси на выходе теплообменника.

Рис. 7.1. Технологическая схема процесса ректификации:

1 – теплообменник для подогрева исходной смеси;

2 – ректификационная колонна; 3 – дефлегматор (конденсатор);

4 – выносной кипятильник

Цель управления: обеспечить $Q_n = Q_n^{\text{зад}} = \text{const}$ путем стабилизации процесса – поддержания на заданном уровне параметров $P_{\Pi}, T_K, L_K, T_C, F_C$.

Ректификационная установка является сложным объектом со значительным временем запаздывания (например, в отдельных случаях выходные параметры процесса начнут изменяться после изменения параметров сырья лишь через 1–3 ч), большим числом параметров, характеризующих процесс, многочисленными взаимосвязями между ними, распределенностью их и т.д.

Трудность регулирования процесса ректификации объясняется также значительными частотой и амплитудой возмущений. Возмущениями являются изменения начальных параметров исходной смеси, тепло- и хладоносителей, изменения свойств теплопередающих поверхностей, отложение веществ на стенках и т.д. Кроме того, на технологический режим ректификационных колонн, устанавливаемых под открытым небом, влияют колебания температуры атмосферного воздуха.

Один из возможных вариантов системы автоматического регулирования процесса ректификации бинарной смеси, когда показателями эффективности процесса является концентрация искомого компонента в дистилляте, показан на рис. 7.2.

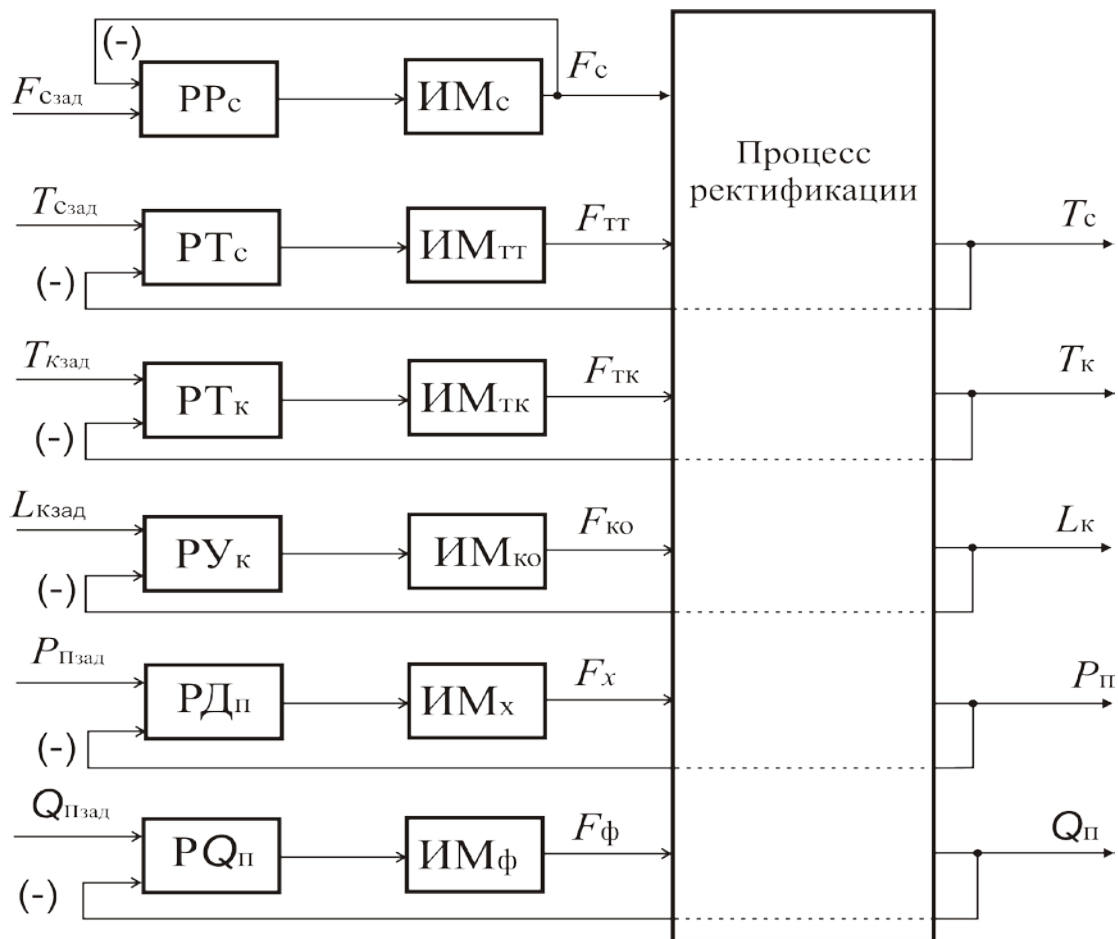


Рис. 7.2. Вариант САР процесса ректификации бинарной смеси при постоянном давлении в колонне

В данной системе автоматические регуляторы $РР_С$, $РТ_С$, $РТ_К$, $РУ_К$, $РД_П$, $РQ_П$ соответственно расхода исходной

смеси, температуры подогретой смеси, температуры в кубе колонны, уровня жидкости в кубе колонны, давления и состава пара в верхней части колонны поддерживают на заданном уровне технологические параметры $F_C, T_C, T_K, L_K, P_{II}, Q_{II}$. Ректификационная колонна как объект регулирования может быть описана следующими передаточными функциями:

а) верхняя часть колонны (канал «смесь – дистиллят»):

$$W_D(p) = \frac{Q_D(p)}{Q_C(p)} = \frac{k_{OD}}{T_0 p + 1} e^{-p\tau_{OD}}; \quad (7.1)$$

б) нижняя часть колонны (канал «смесь – кубовый остаток»):

$$W_K(p) = \frac{Q_K(p)}{Q_C(p)} = \frac{k_{OK}}{T_0 p + 1} e^{-p\tau_{OK}}, \quad (7.2)$$

где $T_0 = \frac{V_{ЖК}}{F_C}$ – постоянная времени объекта ($V_{ЖК}$ – расчетный

объем жидкости в кубе колонны; F_C – расчетный расход смеси);

$\tau_{OD} = n_D \tau_{cp}$ – время запаздывания в верхней части колонны;

$\tau_{OK} = n_K \tau_{cp}$ – время запаздывания в нижней части колонны;

$\tau_{cp} = \frac{V_{ЖТ}}{F_C}$ – среднее время пребывания жидкости на одной

тарелке;

$V_{ЖТ}$ – объем жидкости в тарелке;

n_D, n_K – число тарелок соответственно в верхней и нижней частях колонны.

7.2. Автоматизация процесса абсорбции

Абсорбция – это избирательное поглощение газов или паров жидкими поглотителями – абсорбентами.

В качестве объекта управления процессом абсорбции прием абсорбционную установку, состоящую из абсорбционной колонны 2 и двух холодильников 1, 3 на линиях абсорбента и газовой смеси (рис. 7.3). Показателем эффективности процесса яв-

ляется концентрация Y_K извлекаемого компонента в обедненной смеси, а целью управления – достижение определенного значения этой концентрации.

Рис. 7.3. Технологическая схема процесса абсорбции:
1, 3 – холодильники исходной газовой смеси и абсорбента;
2 – абсорбционная колонна

Концентрация Y_K определяется разностью количеств извлекаемого компонента, поступающего в колонну с газовой смесью и поглощаемого из нее абсорбентом.

Для управления расходами различных потоков установки используются исполнительные механизмы (приводы) $ИМ_{ХС}$, $ИМ_С$, $ИМ_{НА}$, $ИМ_{АГ}$, $ИМ_А$, $ИМ_{ХА}$ с регулирующими органами соответственно хладоносителя в холодильнике исходной газовой смеси, исходной газовой смеси на входе колонны, насыщенного абсорбента на выходе колонны, абгаза (обедненной смеси) на выходе колонны, абсорбента на входе колонны, хладоносителя в холодильнике абсорбента.

Контролируемые параметры процесса абсорбции:

$F_{ХС}$, $F_С$, $F_{НА}$, $F_{АГ}$, $F_А$, $F_{ХА}$ – расходы соответственно хладоносителя в холодильнике исходной газовой смеси, газовой

смеси, насыщенного абсорбента, абгаза, абсорбента, хладоносителя в холодильнике абсорбента;

T_C, T_A, T_{AG}, T – температура газовой смеси, абсорбента, абгаза, в колонне на разных уровнях;

PD – перепад давления в абсорбционной колонне;

P_B – давление в верхней части колонны;

L – уровень жидкости в нижней части колонны;

Q_{AG} – состав абгаза;

Q_{HA} – состав насыщенного абсорбента.

Количество компонента, поступающего в колонну, однозначно определяется расходом газовой смеси F_C и начальной концентрацией в ней извлекаемого компонента Y_H .

Количество же компонента, который переходит из газовой фазы в жидкую, в основном зависит от движущих сил на входе в аппарат Δ_1 и на выходе из него Δ_2 , т.е от положения рабочей (AB) и равновесной (OC) линий процесса (рис. 7.4). Положение равновесной линии определяется температурой и давлением процесса, а положение рабочей линии – начальной и конечной концентрациями компонента в обеих фазах.

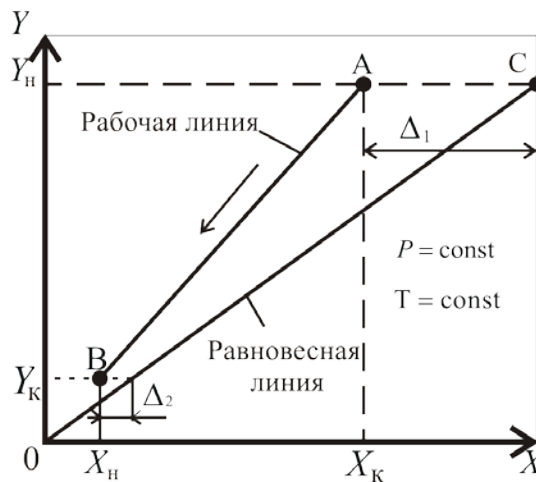


Рис. 7.4. Диаграмма процесса абсорбции:

X, Y – содержание извлекаемого компонента соответственно в жидкости и газе (X_H, Y_H – в начале;

X_K, Y_K – в конце процесса)

Если цель управления достигнута, концентрация Y_K будет постоянной: в жидкой фазе (X_K) она определяется удельным расходом абсорбента F_A/F_C .

Таким образом, концентрация Y_K зависит от расхода газовой смеси, концентраций X_H и Y_H , отношения расходов F_A/F_C , температуры смеси и давления в аппарате.

Изменения расхода газовой смеси могут быть сильными возмущениями, поэтому расход газа следует стабилизировать.

Отношение F_A/F_C можно поддерживать постоянным путем стабилизации обоих расходов. Температуру в абсорбере можно поддерживать постоянной путем стабилизации температур абсорбента T_A и газовой смеси T_C .

С учетом вышеизложенного, принимая в качестве целевой регулируемой величины состав абгаза (концентрацию Y_K), получим структуру системы автоматического регулирования процесса абсорбции, показанную на рис. 7.5.

Рис. 7.5. Вариант САР процесса абсорбции

В данной системе автоматические регуляторы $РР_C, РТ_C, РД_B, РУ, РТ_A, РQ_{AG}$ соответственно расхода газовой смеси, температуры газовой смеси, давления в верхней части колонны, уровня жидкости в нижней части колонны, температуры абсорбента на входе в колонну и состава абгаза поддерживают на заданном уровне технологические параметры $F_C, T_C, P_B, L, T_A, Q_{AG}$.

В нижней части абсорбера должно находиться постоянное количество жидкости, обеспечивающей гидрозатвор, что исключает поступление газовой смеси из абсорбера в линию насыщенного абсорбента и позволяет регулировать давление в колонне. Заданный уровень этой жидкости поддерживается регулятором уровня $РУ$.

Давление в абсорбере стабилизируется изменением расхода абгаза, а концентрация извлекаемого компонента – изменением расхода абсорбента при $F_C = \text{const}$.

8. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

8.1. Общие положения

Металлообработка осуществляется на металлорежущих станках путем снятия стружки (через процесс резания). Станки обеспечивают изготовление деталей требуемой формы и размеров с заданной точностью и шероховатостью поверхностей.

Основными задачами автоматизации металлорежущих станков (МС) являются следующие:

- Стабилизация режимов металлообработки (управление параметрами процесса резания – скоростью резания, величиной подачи и др.);
- Обеспечение требуемой формы и размеров деталей (программное управление траекторией движения инструмента относительно детали);
- Позиционирование – установка инструмента (детали) в заданную точку (позицию) перед началом обработки.

Схема и параметры процесса резания применительно к токарному станку показаны на рис. 8.1.

Рис. 8.1. Схема процесса резания

На схеме приняты следующие обозначения:

ω_d – угловая скорость детали;

v_n, v_p – скорости подачи и резания;

S – подача резца на один оборот детали;

t_c – глубина резания (толщина стружки);

F_x, F_y, F_z – усилие соответственно подачи, радиальное и резания.

Параметры процесса резания взаимосвязаны следующими выражениями:

$$v_p = \omega_d R_p;$$

$$v_n = \frac{\omega_d}{2\pi} S;$$

$$N_p = v_p F_z;$$

$$N_{\Pi} = v_{\Pi} F_x;$$

$$v_p = \frac{C_{vp}}{T^m t_p^{X_{vp}} S^{Y_{vp}}},$$

где R_p – радиус резания; N_p, N_{Π} – мощность соответственно резания и подачи; C_{vp} – коэффициент, определяемый условиями и скоростью резания; T – стойкость инструмента (резца), определяемая временем его работы до замены либо до новой заточки; m, X_{vp}, Y_{vp} – коэффициенты (степени), определяемые условиями резания, видом операции (точение, сверление, фрезерование и др.).

8.2. Автоматическое управление режимами металлообработки

В качестве критерия оптимального управления процессом резания могут быть использованы:

- Экономические критерии, например: стоимость приведенных затрат;
- Технические, например: производительность станка, стойкость инструмента и т.п.

Критерий оптимальности процесса резания по производительности определяется по выражению

$$J = v_p t_c S.$$

Модификации этого критерия:

$$J_1 = k_1 v_p; J_2 = k_2 v_p t,$$

где k_1, k_2 – постоянные коэффициенты ($k_1 = t_c S; k_2 = S$).

Обобщенная структура системы автоматического управления процессом резания по двум параметрам представлена на рис. 8.2.

Рис. 8.2. САУ процессом резания: УУ – управляющее устройство;
ЭПШ, ЭПП – электроприводы шпинделя и подачи;
Д1, Д2 – датчики управляемых параметров процесса резания
 x_1 и x_2

Устройство УУ, получая информацию о заданных значениях $x_{1\text{зад}}$ и $x_{2\text{зад}}$ и измеренных значениях $x_{1\text{изм}}$ и $x_{2\text{изм}}$ управляемых параметров по определенному алгоритму, формирует задания скорости резания $v_{\text{рзад}}$ и подачи $S_{\text{пзад}}$ электроприводам ЭПШ и ЭПП, которые, изменяя $v_{\text{р}}$ и S , обеспечивают стабилизацию процесса резания по закону:

$$x_1 = x_{1\text{зад}} = \text{const};$$

$$x_2 = x_{2\text{зад}} = \text{const}.$$

В настоящее время используется ряд типовых систем управления процессом резания, в частности широко применяются системы стабилизации:

- Скорости резания;
- Мощности резания;
- Температуры резания.

В качестве примера САУ процессом резания на рис. 8.3 приведена САУ стойкости инструмента (резца).

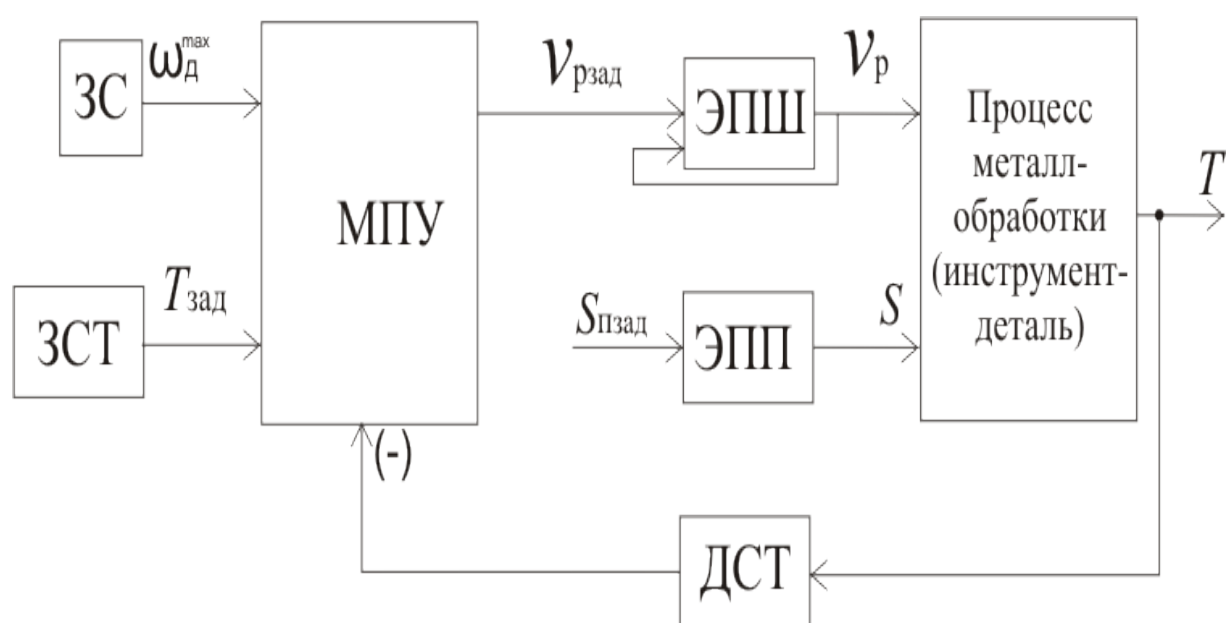


Рис. 8.3. САУ стойкости резца: ЗСТ, ДСТ – задатчик и датчик стойкости резца; ЗС – задатчик угловой скорости шпинделя; МПУ – микропроцессорное управляющее устройство; T – стойкость резца

Стойкость резца обратно пропорциональна температуре в зоне резания, что позволяет измерять ее с помощью естественной термопары «резец – деталь», т.е. в качестве датчика стойкости использовать датчик температуры.

Управление процессом резания в данной системе осуществляется МПУ при постоянной подаче путем изменения скорости резания по закону

$$v_{\text{рзад}} = \frac{C_{vp}}{T^m}.$$

При таком управлении обеспечивается стабилизация температуры резания, т.е. косвенным способом поддерживается на заданном уровне стойкость инструмента.

8.3. Следящие копировальные системы металлорежущих станков

Копировальные системы применяют на МС для обработки деталей сложной конфигурации, обеспечивая с их помощью управление движением рабочего органа относительно детали по нелинейным траекториям. По типу задатчика различают следующие копировальные системы:

- Электрические, использующие в качестве программносителя – шаблон обрабатываемой детали, задатчика перемещения – копировальный прибор, привода подачи – следящий электропривод;
- Фотоэлектрические, использующие чертеж в качестве программносителя и фотоэлектрическое считывающее устройство, формирующее задание следящему электроприводу;
- Контурные, в которых заданное перемещение вводится с машинного программносителя (перфоленты или магнитной ленты) через интерполятор, формирующий на выходе последовательность импульсов, число которых определяет величину перемещения инструмента (детали), а частота – скорость перемещения.

Рассмотрим устройство и принцип действия копировальных систем на примере электрической копировальной системы для фрезерного станка (рис. 8.4).

Рис. 8.4. Структурная схема аналоговой системы электрокопирования по шаблону

На схеме приняты следующие обозначения:

СЭП – следящий электропривод, включающий в себя усилитель сигнала рассогласования УС, тиристорный преобразователь ТП, электродвигатель постоянного тока М2, преобразователь движения ПД2, фрезерную бабку ФБ, датчик положения фрезы ДП;

ИП – измерительный преобразователь копировального прибора;

М1, ПД1 – электродвигатель и преобразователь движения ведущей подачи (стола);

S_c – ведущая подача (перемещение стола с шаблоном и заготовкой в горизонтальной плоскости);

S_{ϕ} – следящая подача (перемещение фрезы в вертикальной плоскости);

S_{Π} – перемещение пальца копировального прибора относительно шаблона в вертикальной плоскости;

$U_{\text{зад}}, U_{\text{ос}}$ – сигналы заданного и фактического положения фрезы в вертикальной плоскости;

ω_p – угловая скорость резания.

При включении механизмов подачи стола и вращения фрезы система обеспечивает следящее перемещение фрезы в вертикальной плоскости по закону $S_{\phi} = S_{\Pi}$. Благодаря этому форма детали повторяет форму ее шаблона в процессе обработки заготовки.

8.4. Системы ЧПУ в металлообработке

ЧПУ (числовое программное управление) – это управление металлообработкой на МС по управляющей программе, в которой данные записаны в цифровой (числовой форме).

Устройство ЧПУ – это управляющее устройство, выполненное как специализированный вычислитель для управления приводами и исполнительными механизмами станка в процессе обработки. Исполнительные механизмы обеспечивают смену заготовок и инструментов, установку деталей на линию обработки и др.

Система ЧПУ – это совокупность технических и программных средств, обеспечивающих функционирование ЧПУ.

В системах ЧПУ программируют:

- Последовательность операций обработки (управление циклом обработки);
- Режимы обработки (управление параметрами резания);
- Установочные и траекторные перемещения рабочих органов (позиционирование и перемещение по нелинейным траекториям).

На рис. 8.5 приведена классификация систем ЧПУ по трем признакам.

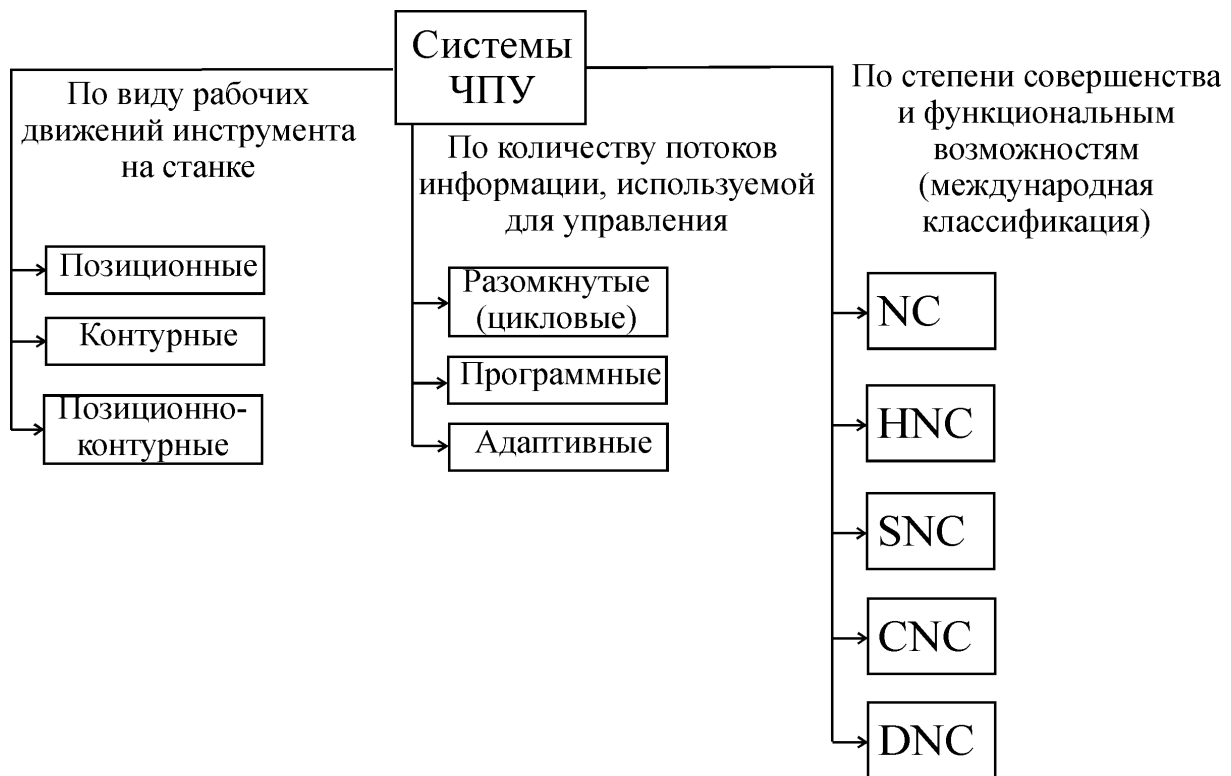


Рис. 8.5. Классификация систем ЧПУ

Позиционные системы используют для установки режущего органа в точку начала обработки, контурные системы – для управления движением РО по заданной траектории, а позиционно-контурные – для позиционирования и управления движением РО по заданным траекториям.

Цикловые системы применяются для управления обработкой деталей с относительно постоянными условиями обработки. Эти системы выполняются по разомкнутой схеме с использованием одного потока информации (задания).

Программные системы используют для управления два потока информации: задание и обратные связи. В адаптивных системах используется три потока информации: задание, обратные связи и информация об условиях работы.

Согласно международной классификации различают системы ЧПУ:

NC – системы с покадровым чтением программноносителя;

HNC – системы с ручным вводом программы;

SNC – системы с однократным чтением программноносителя;

CNC – системы управления со встроенным компьютером;

DNC – системы супервизорного управления группой станков, имеющие в своем составе центральный управляющий компьютер и встроенные в каждый станок локальные компьютеры.

В общем случае структура системы ЧПУ может быть представлена схемой, показанной на рис. 8.6.

Рис. 8.6. Обобщенная структура системы ЧПУ
металлорежущим станком

На схеме приняты следующие обозначения:

УВП – устройство ввода программы;

УОИ – устройство обработки информации (интерполятор, компьютер);

УУ_{им} – устройства (блоки) управления исполнительными механизмами станка;

УУ_{эп} – устройства (блоки) управления электроприводами подачи и резания;

УСД – устройство связи с датчиками (преобразователи сигналов датчиков в цифровые коды);

ИМ – исполнительные механизмы станка;
 ЭП – электроприводы подачи и резания;
 X, Y, Z – координаты режущего инструмента/детали (подача по соответствующим осям);
 v_p – скорость резания;
 l – положение исполнительных механизмов;
 $x_1, x_2, \dots, x_n$ – контролируемые величины процесса резания.

Для сравнения на рис. 8.7 приведены структуры типовых систем с устройствами ЧПУ типа *NC* и *CNC*, использующие различные средства ввода и обработки управляющей программы: в первом варианте программы записаны на перфо- или магнитных лентах и используется интерполятор (специализированный вычислитель), во втором варианте программы записаны в электронной памяти компьютера, который также выполняет и функции интерполятора.

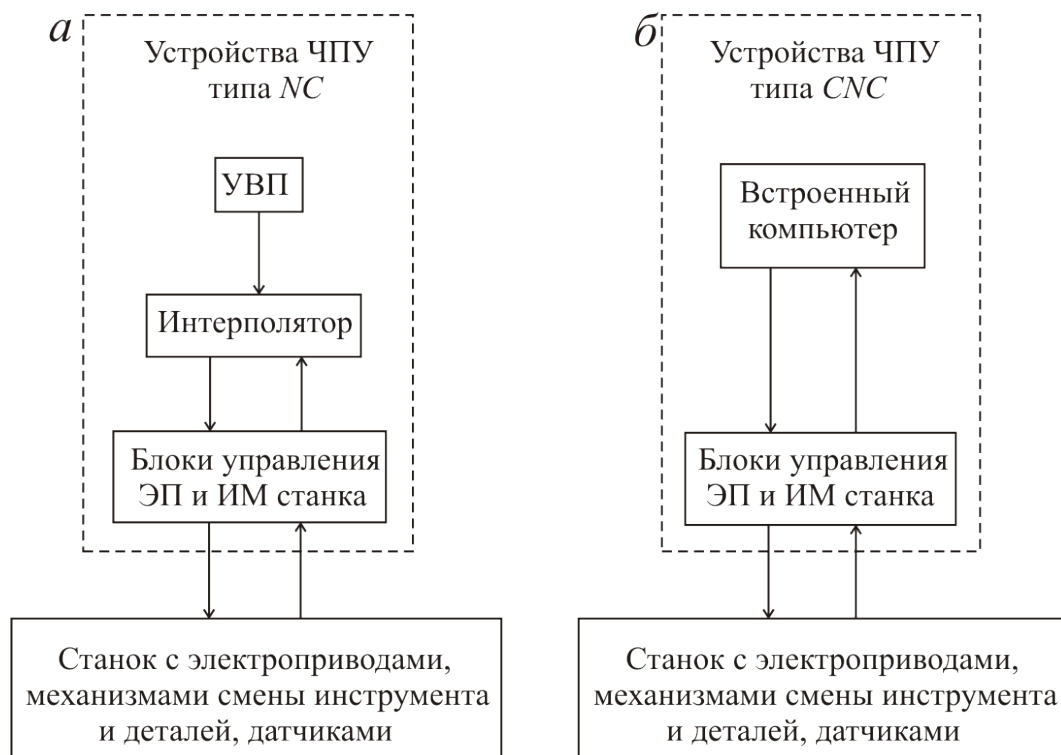


Рис. 8.7. Примеры структурных схем типовых систем ЧПУ станками с вводом программы с ПЛ или МЛ (а) и со встроенным компьютером (б)

В заключение рассмотрим в качестве примера простейшую систему ЧПУ, обеспечивающую управляемое движение режущего инструмента относительно детали по осям X , Y , Z с целью получения требуемой формы изделия (рис. 8.8). Система является разомкнутой (цикловой), имеет устройство ввода программы с перфоленты УВП, устройство обработки информации УОИ (интерполятор) и три одинаковых канала управления, каждый из которых содержит усилитель импульсов УС, формирователь прямоугольных импульсов ФПИ, кольцевой коммутатор-распределитель импульсов КР, шаговый двигатель ШД и преобразователь движения (редуктор, гидроусилитель и т.п.) ПД. С выхода УОИ в каждый канал управления поступают последовательно импульсы N , число которых определяет перемещение, а частота – скорость движения инструмента по соответствующей оси. Необходимая точность заданных перемещений достигается благодаря применению шаговых электроприводов подачи.

Рис. 8.8. Обобщенная структура схемы ЧПУ
металлорежущим станком

9. АВТОМАТИЗАЦИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

9.1. Автоматизация парокотельных установок

9.1.1. Общие положения

Водяной пар, необходимый для технологических агрегатов, подогрева воды, а также для водяного отопления, может быть получен либо со стороны, например от ТЭЦ, либо с собственной котельной. В первом случае параметры пара (температура, давление) снижаются до требуемых технологическим процессом значений с помощью редукционно-охладительной установки (РОУ). Во втором случае получение пара заданных параметров обеспечивают свои парокотельные установки – паровые котлы со вспомогательным оборудованием.

В настоящее время для выработки пара в котельных промышленных предприятий наиболее широко применяются котлы типа ДКВР (двухбарабанный котел вертикальный реконструированный) с давлением насыщенного пара 1,3 МПа и потреблением газа соответственно от 280 до 2060 м³/ч.

Система автоматизации парокотельной установки должна выполнять следующие функции:

- Автоматическое управление питанием котлов водой;
- Автоматическое регулирование процесса горения топлива в топке котла;
- Автоматическая защита котла, прекращающая подачу топлива в его топку при выходе контролируемых параметров за допустимые пределы;
- Автоматический контроль теплотехнических параметров работы котла;
- Дистанционное управление пуском и остановом котла (управление розжигом, дутьевым вентилятором и вентилятором дымососа);
- Автоматизированное управление подачей угля (для котельных, работающих на твердом топливе), обеспечивающее:

а) дистанционное управление пуском и остановом механизмов тракта топливоподачи; б) автоматическое удаление металла из транспортируемого угля; в) автоматическую загрузку бункеров;

- Автоматизированное управление золоудалением для котлов, работающих на угле.

9.1.2. Автоматизация питания котлов

Одним из важнейших условий обеспечения надежной работы котлоагрегата является поддержание заданного уровня воды в барабане котла, так как в процессе работы происходит постоянное его колебание.

Основными причинами колебания уровня воды в барабане котла являются изменения подачи воды, расхода пара, теплонпряжения топки и давления пара в барабане. Допустимое отклонение уровня воды в барабане от среднего значения составляет ± 50 мм, так как при отказе регулятора достаточно нескольких минут до упуска воды из барабана или его переполнения.

Котел, как объект регулирования уровня, не обладает самовыравниванием. Его передаточная функция имеет вид

$$W(p) = \frac{\Delta H(p)}{\Delta F_B(p)} = \frac{k_0}{p} e^{-p\tau_0},$$

где k_0, τ_0 – соответственно передаточный коэффициент и время запаздывания изменения уровня воды ΔH в котле при скачке расхода воды ΔF_B . Запаздывание обусловлено явлением «набухания» котловой воды.

На рис. 9.1 показаны возможные разгонные характеристики котла по изменению уровня в барабане.

В зависимости от температуры поступающей воды, типа котла, типа экономайзера (кипящий или некипящий) и других факторов уровень пароводяной смеси в барабане котла в первый период времени может оставаться неизменным (кривая 1) или временно отклониться в сторону, противоположную знаку ΔF_B (кривая 2). Этим и обусловлено появление запаздывания τ_1 или τ_2 .

Если питательная вода после экономайзера не нагрета до температуры насыщения (некипящие экономайзеры), то увеличение ее подачи приводит к уменьшению объема пароводяной смеси в барабане и циркуляционной системе.

Рис. 9.1. Пример разгонной характеристики котла по изменению уровня пароводяной смеси в барабане

Запаздывание, например у котлов типа ДКВР, достигает 60–80 с и обусловлено совместным действием на уровень воды небаланса расхода пара и притока воды, а также явлением «набухания». «Набухание» приводит к более резким колебаниям уровня при изменении расхода пара, т.е. нагрузки на котел.

Котел как объект регулирования является нелинейным. Связано это в основном с тем, что при изменении нагрузки объекта изменяется его передаточный коэффициент. Для таких объектов наиболее эффективным является применение регуляторов с автоматической настройкой.

В настоящее время применяются три варианта регулирования питания котлов водой: а) схема с пропорциональным или изодромным регулятором, действующая по отклонению уровня пароводяной смеси в барабане котла (простейший способ регули-

рования питания котлов); б) схема с регулятором, формирующим управляющее воздействие в функции отклонения уровня и расхода пара; в) схема с регулятором, формирующим управляющее воздействие в функции отклонения уровня, расхода пара и притока питательной воды в барабан.

Первая схема регулирования находит применение для котлов малой мощности, у которых «набухание» незначительно влияет на уровень.

Для котлов с резко выраженным явлением «набухания» изменение уровня воды в барабане котла не определяет однозначно несоответствие притока воды расходу пара. Вследствие этого регулирование уровня только по его отклонению от заданного значения вызывает резкие изменения подачи воды при резком изменении нагрузки котла, что является крайне нежелательным, так как возможны либо упуск воды в котле, либо его переполнение. Чтобы избежать этого, применяют вторую схему регулирования, которая работает с упреждением благодаря использованию сигнала обратной связи по расходу пара: подача воды изменяется еще до того, как изменение нагрузки вызовет отклонение уровня воды в барабане.

Схема регулирования по третьему варианту (рис. 9.2) наилучшим образом удовлетворяет требованиям поддержания уровня воды в барабане котла – обеспечивает высокое качество переходного процесса и минимальный небаланс между расходом пара и притоком воды (котлы требуют плавного регулирования уровня: прерывистое регулирование может привести к упуску воды из барабана либо его переполнению).

На схеме приняты следующие обозначения:

РУ – регулирующее устройство (регулятор);

ДУ, ДПВ, ДРВ – датчики соответственно уровня H в барабане котла, расходов воды F_v и пара F_{π} ;

ИМ – исполнительный механизм с регулирующим клапаном расхода питательной воды;

ПК – паровой котел.

Рис. 9.2. Функциональная схема системы автоматического регулирования уровня воды в барабане котла

Выходной сигнал регулирующего устройства определяется выражением

$$U_{\text{ру}} = k_1(H_{\text{изм}} - H_{\text{зад}}) + k_2(F_{\text{п}} - F_{\text{в}}),$$

где k_1, k_2 – коэффициенты пропорциональности; $H_{\text{изм}}, H_{\text{зад}}$ – измеренное и заданное значения уровня воды в барабане котла.

Статическая характеристика САР уровня, представляющая собой зависимость $H = \varphi(F_{\text{п}})$, может быть получена любого вида, т.е. с отрицательной, нулевой или положительной компенсацией по расходу пара в зависимости от настройки РУ (выбора значений коэффициентов k_1, k_2).

В качестве регуляторов в схемах позиционного регулирования питания паровых котлов малой мощности применяются регуляторы-сигнализаторы уровня электрические ЭРСУ-2. Для котлов типа ДКВР нашли применение электронные регулирующие приборы РПИБ, реализующие ПИ-закон регулирования уровня совместно с электродвигательным исполнительным механизмом МЭОК, и регуляторы питания на базе транзисторного усилителя

УТ и гидравлического исполнительного механизма ГИМ-1И системы авторегулирования котлов «Кристалл», включающей в себя также и первичные приборы. Для измерения уровня и расхода используются дифференциальные манометры типа ДМ с дифференциально-трансформаторным датчиком в комплекте соответственно с уравнительным сосудом и диафрагмами, а также приборы САПФИР.

9.1.3. Автоматизация процесса горения

Процесс горения тесно связан с процессом парообразования. Количество сжигаемого топлива должно соответствовать в установившемся режиме количеству вырабатываемого пара. Процесс парообразования происходит в подъемных трубах циркуляционного контура, экранирующих камерную топку, в которой сжигается топливо. Для поддержания процесса горения с определенным избытком воздуха, он подается в топку с помощью вентилятора. Дымовые газы отсасываются из топки дымососом, проходят через поверхности нагрева водяного экономайзера, осуществляющего подогрев воды, и удаляются в атмосферу через дымовую трубу.

Количество вырабатываемого пара должно соответствовать количеству пара, потребляемого на технологические нужды и отопление. Косвенным показателем этого соответствия является давление пара в котле, которое по условиям экономичности и безопасности работы должно поддерживаться в определенных пределах.

Процесс сжигания должен осуществляться с максимальной экономичностью: топливо в топке должно сгорать полностью, а потери выделившегося тепла при его передаче поверхностям нагрева должны быть минимальными. Передача тепла от продуктов сгорания к поверхностям нагрева происходит в результате всех видов теплообмена: радиационного, конвективного и теплопроводности.

В котельных сжигание топлива осуществляется факельным способом. Косвенным показателем факела в топочной камере является постоянство разряжения в ее верхней части.

В целом, регулирование процесса горения сводится к поддержанию на заданных значениях следующих величин:

- Давления пара или тепловой нагрузки котла;
- Содержания CO_2 в дымовых газах, определяющего избыток воздуха в топке и по газовому тракту и характеризующего экономичность процесса горения;
- Разряжения в верхней части топки.

Регулирование процесса горения осуществляется изменением подачи топлива (притока тепла) в соответствии с расходом пара (расходом тепла). Это выполняется регулятором топлива, выполняющим по сути функцию регулятора нагрузки котла.

Экономичность сжигания топлива в топке котла обеспечивается поддержанием заданного соотношения расхода воздуха в соответствии с подачей топлива с помощью регулятора воздуха. Избыток воздуха приводит к росту потерь тепла с уходящими газами, недостаток – к неполному сжиганию топлива. В обоих случаях КПД котла снижается.

Оптимальный коэффициент избытка воздуха определяется при тепловых испытаниях котлоагрегата. Содержание CO_2 в уходящих газах зависит от нагрузки котла и колеблется в пределах 6–11 %.

Для осуществления горения в топочной камере необходимо обеспечить полное удаление продуктов сгорания. Это достигается постоянным соответствием производительности дымососа и дутьевого вентилятора. Показателем такого соответствия служит величина разряжения в топочной камере. Избыточное давление в топке выбивает пламя и газы в помещение котельной. С ростом разряжения резко возрастают подсосы воздуха, снижающие экономичность работы котла (возрастают потери тепла с уходящими газами), и расход электроэнергии на тягу. При управлении направляющим аппаратом дымососа или шибером на газоходе стремятся поддерживать разряжение в верхней части топочной камеры в пределах $(1 \div 3)10^{-5}$ МПа.

Опыт автоматизации котельных показывает, что регулирование процесса горения в функции давления пара (нагрузки котлоагрегата) и разряжения в топке с коррекцией расхода воздуха в соответствии с подачей топлива позволяет увеличить КПД кот-

ла на 7–9 %, сократить расход электроэнергии на дутье и количество обслуживающего персонала, увеличить межремонтный срок работы оборудования и повысить культуру производства.

Котельный агрегат, как объект регулирования процессом горения, можно представить в виде двух звеньев (рис. 9.3): топки и собственно котла (его парообразующей части).

Регулируемым параметром является давление пара в барабане P_{Π} , а регулирующим воздействием – изменение подвода тепла Q к котлу в топку вследствие изменения подачи топлива F_T и воздуха $F_{\text{воз}}$ в топку.

Рис. 9.3. Схема котлоагрегата как объекта регулирования процесса горения

Основным внешним возмущением при регулировании давления пара является изменение потребления пара F_{Π} . Кроме того, на давление пара будет оказывать влияние подача питательной воды $F_{\text{в}}$.

Котел, как объект регулирования давления пара, при его работе на общую паровую магистраль совместно с другими котлами обладает самовыравниванием и запаздыванием. Последнее обусловлено запаздыванием топки.

Передаточная функция имеет вид

$$W(p) = \frac{\Delta P_n(p)}{\Delta F_m(p)} = \frac{k_0}{T_0 p + 1} \cdot e^{-p\tau},$$

где $\tau = 25$ с; $T_0 = 80$ с запаздывание и постоянная времени объекта; $k_0 = 1300$ Па / % хода заслонки подачи топлива (газа).

Топка, как объект регулирования разряжения, обладает значительным самовыравниванием, так как изменение разряжения

существенно сказывается на величине подсосов воздуха в топку через неплотности в обмуровке. Основное требование к регулятору разряжения – максимально возможное быстродействие, поскольку топка практически безынерционна. Ее постоянная времени не превышает 1–2 с. Разряжение в топке обычно сильно пульсирует, амплитуда колебаний может превышать номинальное значение регулируемого параметра. В связи с этим сигнал по разряжению должен демпфироваться, что приводит к увеличению постоянной времени объекта совместно с измерителем до 6–10 с.

Система автоматического регулирования процесса горения парового котла ДКВР-10-13, работающего на газе, представлена на рис. 9.4. Система включает в себя три контура регулирования:

- Контур стабилизации давления пара. Он состоит из датчика ДД, регулятора РДП, исполнительного механизма ИМ_Г, перемещающего заслонку на газопроводе к горелкам котла. Для создания изодромного закона регулирования вводится гибкая обратная связь. Жесткая обратная связь по положению заслонки обеспечивает требуемую статическую характеристику регулятора;
- Контур регулирования соотношения «топливо – воздух». Он состоит из датчика ДРВ, регулятора РРВ, исполнительного механизма ИМ_{воз}, перемещающего лопатки направляющего аппарата дутьевого вентилятора. Заданное значение расхода воздуха формируется задатчиком ЗРВ в функции расхода горючего газа F_G . Таким образом, при изменении расхода газа автоматически изменяется подача воздуха, благодаря чему поддерживается требуемое соотношение «топливо – воздух»;
- Контур стабилизации разряжения в топке. Он содержит датчик ДР, регулятор РР, исполнительный механизм ИМ_Д, перемещающий лопатки направляющего аппарата вентилятора дымохода.

Элементы и параметры схемы САР процесса горения:

РДП, РРВ, РР – регуляторы соответственно давления пара в котле, расхода воздуха и разряжения в топке;

ДД, ДРВ, ДР – датчики соответственно давления пара, расхода воздуха и разряжения в топке;

ЗРВ – задатчик расхода воздуха в функции расхода топлива;

$ИМ_Г$, $ИМ_{воз}$, $ИМ_Д$ – исполнительные механизмы с регулирующими органами, изменяющие соответственно расходы газа, воздуха и дымососа. Функции регулирующих органов выполняют: по газу – заслонка, по воздуху и дыму – направляющие аппараты соответствующих вентиляторов;

ЖОС, ГОС – жесткая и гибкая обратные связи по положению заслонки, регулирующей подачу топлива;

$P_{п\text{ зад}}$, $F_{воз\text{ зад}}$, $P_{т\text{ зад}}$ – заданные значения соответственно давления пара, расхода воздуха и разряжения в топке.

Рис. 9.4. Система автоматического регулирования процесса горения в топке парового котла типа ДКВР-10-13

Для технической реализации САР процесса горения используется аппаратура «Кристалл», а также приборы типа Р25, обеспечивающие ПИ-регулирование.

9.2. Микропроцессорная система автоматизации водогрейной угольной котельной

Водогрейные угольные котельные широко используются для отопления и горячего водоснабжения.

К системе управления котельной предъявляются следующие основные требования:

- Поддержание на заданном уровне давления воды в системе, температуры прямой воды, воды к котлам и перед деаэратом и запаса химочищенной воды;
- Отображение всей информации о работе котельной по месту рядом с котлами и вывод ее на компьютер начальника котельной;
- Сохранение информации о работе котельной в предыдущие дни, что необходимо для составления отчетов.

В качестве примера рассмотрим систему автоматизации водогрейной котельной, выполненную по принципу распределенного управления с использованием микропроцессорных регуляторов ТРМ, сочетающих в себе свойства нормирующего преобразователя, показывающего прибора, регулятора и устройства связи, персонального компьютера.

Упрощенная технологическая схема котельной показана на рис. 9.5. Вода из системы отопления поступает в котельную и проходит фильтрацию. После фильтрации вода насосом подается к котлам. После котлов нагретая вода используется для собственных нужд котельной и для отопления помещений. Потери воды в системе компенсируются подпиткой извне. Подпитывающая вода проходит процедуру подогрева и деаэрации (удаления кислорода). Далее она поступает в бак запаса химически очищенной воды (бак деаэратора).

Рис. 9.5. Технологическая схема котельной

Для автономности технологического процесса необходимо поддерживать постоянными пять основных параметров:

- параметр 1 – температура прямой воды;
- параметр 2 – давление воды в системе;
- параметр 3 – температура воды к котлам;
- параметр 4 – температура воды перед деаэратором;
- параметр 5 – запас химочищенной воды.

Для удержания вышеуказанных параметров на заданном уровне используются пять регуляторов ТРМ-12. Регулятор ТРМ-12 позволяет реализовать ПИД-закон управления. Он имеет неизменную внутреннюю программу. Для каждого регулятора задаются настроечные параметры и уставка контролируемого параметра, который необходимо поддерживать на постоянном уровне. Сигналы обратных связей поступают в регуляторы с датчиков температуры 1.1, 3.1, 4.1 для параметров 1, 3, 4, с датчика давления 2.1 – для параметра 2 и с датчика уровня 5.1 – для параметра 5 (см. рис. 9.5). Исходя из полученных значений, регуляторы формируют выходные сигналы управления исполнительными механизмами (задвижками, насосами, топливоподачей).

Для управления параметрами 1, 2, 3, 4 используются электромеханические задвижки 1.2, 2.2, 3.2, 4.2. Насосы работают постоянно. Для управления параметром 5 используется насос подпитки 5.2.

Кроме регулирования указанных выше пяти параметров необходимо контролировать и сохранять во времени 19 других параметров (положение задвижек, состояние насосов и вентиляторов). Эти функции реализуются системой сбора и отображения информации о работе котельной, представленной на рис. 9.6.

Для реализации контроля использованы упрощенные регуляторы ТРМ-1, которые позволяют реализовать связь с компьютером через адаптер АС-2, представляющий собой преобразователь интерфейсов RS-232/485 (токовая петля). На входе АС-2 имеется аналоговый мультиплексор, управляемый с помощью вспомогательных сигналов последовательного порта компьютера, к которому он подключен. Использование мультиплексора позволяет подключить к одному последовательному порту компьютера до 8 приборов ТРМ.

Рис. 9.6. Схема сбора и отображения информации о работе котельной

Дальность связи преобразователя интерфейса АС-2 с компьютером составляет 15 м. Носителем информации в данном типе интерфейса является напряжение. Это – основной недостаток адаптера связи АС-2, так как данные адаптеры приходится устанавливать непосредственно рядом с компьютером и от каждого прибора ТРМ вести два провода связи. Более эффективным является использование интерфейса RS-485, который позволяет подключать на одну пару проводов до 256 приборов. Но в этом случае потребуются более сложные и дорогие ТРМ, снабженные интерфейсным модулем RS-485.

Для отображения информации на компьютере используется программа, написанная на языке C++ *Builder 4.0* под операционную систему *Windows 98 SE*. Для хранения архивов используется база данных *Paradox*. Система автоматизации угольной котельной, описанная выше, при низком уровне затрат на оборудование и программное обеспечение имеет довольно высокий уровень автоматизации технологического процесса с возможностью архивирования информации о работе котельной.

9.3. Автоматизация процесса производства сжатого воздуха

Сжатый воздух, являющийся источником энергии для работы пневматического технологического оборудования, вырабатывается на компрессорных станциях. Параметром, характеризующим работу компрессоров и присоединенных к ним потребителей, является давление сжатого воздуха: снижение давления у рабочего оборудования снижает его производительность, а увеличение давления выше требуемого приводит к росту потерь (утечек) сжатого воздуха в атмосферу и, следовательно, к ухудшению показателей работы компрессорной станции (увеличиваются удельные энергозатраты на производство сжатого воздуха).

Система автоматизации компрессорной станции должна:

- Обеспечить работу компрессорных агрегатов с максимальным экономическим эффектом и безопасностью эксплуатации;
- Предотвращать аварийные режимы;
- Обеспечивать частичное или полное исключение обслуживающего персонала;
- Поддерживать давление, требуемое для оптимального проведения технологических процессов;
- Обеспечивать автоматическое включение резерва и вывод агрегатов в резерв.

На современном этапе научно-технического прогресса все эти задачи наиболее эффективно могут быть решены применением для автоматизации компрессорных станций распределенных микропроцессорных АСУ с двумя уровнями управления и регулируемого электропривода компрессора. Принципы построения такой системы рассматриваются ниже на примере системы автоматизации шахтной компрессорной станции (рис. 9.7).

Верхний уровень управления этой системы включает в себя управляющий компьютер УК и оператора (диспетчера). Нижний уровень управления выполнен на программируемых логических контроллерах (ПЛК) по одному на каждый компрессорный агрегат, датчиках и исполнительных устройствах. УК и ПЛК образу-

ют управляющую вычислительную сеть на базе интерфейса RS-485.

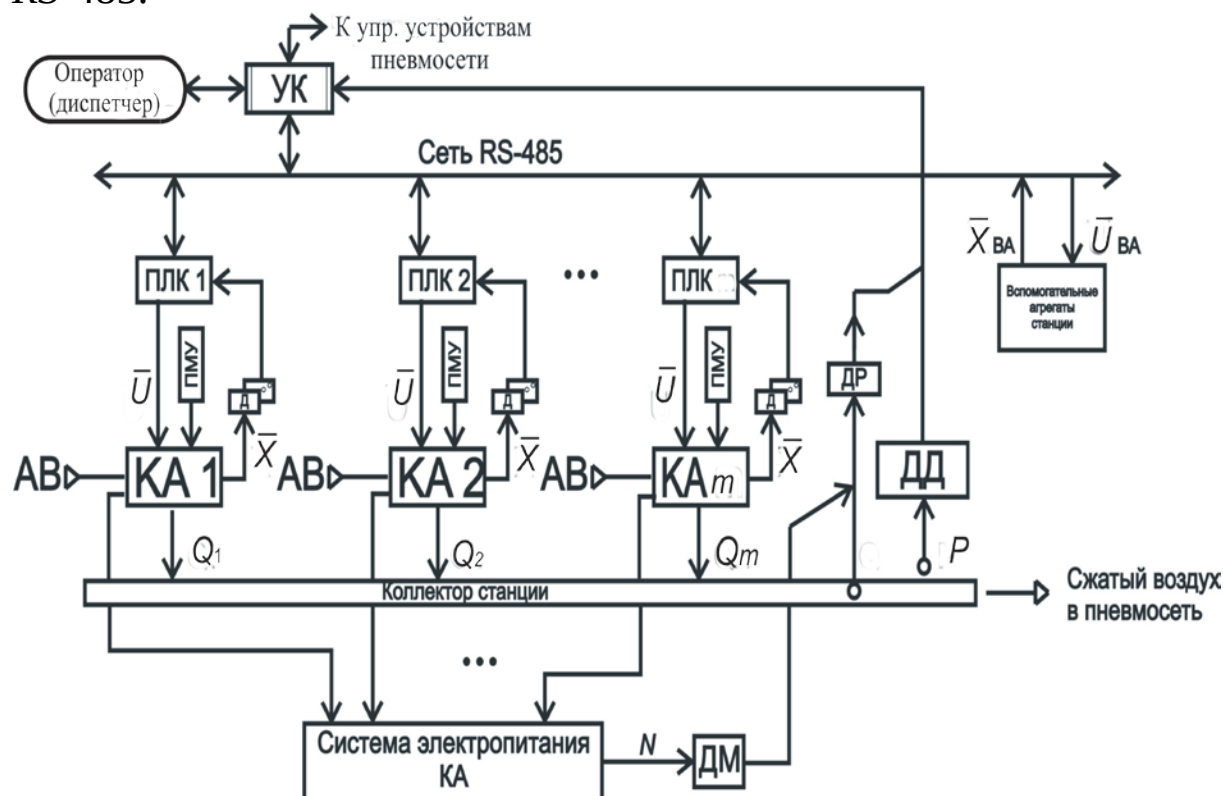


Рис. 9.7. Структурная схема компьютерной системы автоматизации шахтной компрессорной станции

На схеме приняты следующие обозначения:

УК – управляющий компьютер;

ПЛК_{*i*} – *i*-й программируемый логический контроллер;

КА_{*i*} – *i*-й компрессорный агрегат; *i* = 1, 2, ..., *m* – текущий номер КА и ПЛК;

ПМУ – панель местного управления КА;

Д – датчики теплотехнических параметров и состояний элементов КА;

ДМ – датчик мощности *N*, потребляемой электроприводами работающих компрессоров станции;

ДД – датчик давления *P* сжатого воздуха;

Q_i – производительность *i*-го КА;

$\bar{X}$ – вектор контролируемых теплотехнических параметров и состояния одного КА;

$\bar{U}$ – вектор управляющих воздействий на рабочий и исполнительные приводы одного КА;

$\bar{X}_{BA}$ – вектор контролируемых параметров и состояний вспомогательных агрегатов станции;

$\bar{U}_{BA}$ – вектор управляющих воздействий на приводы и узлы вспомогательных агрегатов станции.

При этом управляющий компьютер выполняет следующие функции:

- Формирование и задание команд ПУСК/СТОП контроллерам компрессорных агрегатов;
- Стабилизация давления сжатого воздуха в пневмосистеме, измеряемого датчиком давления ДД в коллекторе станции путем изменения, в соответствии с результатом измерения давления, производительности и количества работающих компрессорных агрегатов;
- Автоматический вывод компрессорных агрегатов из рабочего состояния в резерв и ввод их в работу из резерва при отказе работающих КА, а также для поддержания заданного давления в пневмосети;
- Автоматическое управление включением/отключением вспомогательных агрегатов компрессорной станции (системы охлаждения, системы смазки КА и др.);
- Непрерывное вычисление показателя экономичности работы компрессоров, представляющего собой удельные энергозатраты станции на производство 1 м³ сжатого воздуха:

$$a = \frac{N}{Q}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3,$$

где N – мощность, потребляемая из сети электродвигателями работающих компрессоров и измеряемая датчиком ДМ в системе электропитания; Q – расход сжатого воздуха, измеряемый датчиком ДР на выходе из коллектора компрессорной станции.

Оперативный персонал или УК, используя показатель удельных энергозатрат, при наличии средств регулирования в пневмосети могут поддерживать оптимальное давление сжатого воздуха у потребителя;

- Визуализация состояния и параметров работы компрессорной станции.

Пуск/останов компрессорных агрегатов станции осуществляется по кольцевой схеме в соответствии с номерами, присвоен-

ными компрессорным агрегатам при предварительной конфигурации системы управления.

Программируемые логические контроллеры выполняют функции локальных управляющих устройств, обеспечивая автоматическое управление, контроль и защиту отдельных компрессорных агрегатов.

На рис. 9.8 представлена система автоматизации компрессорного агрегата, выполненная на базе ПЛК.

На схеме приняты следующие обозначения:

К – поршневой компрессор с электродвигателем М;

ХМ, ХВ – холодильники соответственно масла и сжатого воздуха;

МН – пусковой маслonaсос;

ФВ – фильтр воздуха на входе в компрессор;

В – воздухохборник;

ЗОВ, ЗВ – задвижки соответственно охлаждающей воды и сжатого воздуха;

РК, ОК – электромагнитный разгрузочный клапан и обратный клапан пускоразгрузочного механизма компрессора;

КП – электромагнитный клапан продувки конденсата из воздухохборника;

ПОВ, ПВ – реверсивные пускатели, управляющие электродвигателями задвижек ЗОВ, ЗВ;

ПМН – нереверсивный пускатель электродвигателя маслonaсоса;

СУЭД – система автоматического управления электродвигателем компрессора, обеспечивающая его пуск/останов и регулирование частоты вращения. Состав элементов СУЭД определяется видом электропривода компрессора;

ПЛК – программируемый логический контроллер (управляющее устройство компрессорного агрегата);

КУ – кнопки ПУСК/СТОП для формирования оператором команд на включение/отключение компрессорного агрегата при местном управлении (например, при отказе управляющего компьютера, наладке и т.п.);

$L_{ОВ}$, $L_{В}$ – перемещения задвижек ЗОВ и ЗВ, контролируемые концевыми выключателями;

L – уровень воды в рабочей зоне холодильника ХВ;

$P_{\text{ов}}, Q_{\text{ов}}$ – давление и расход охлаждающей воды;

$\Delta P_{\text{вф}}$ – перепад давления на фильтре ФВ;

$T_{\text{пк}}, T_{\text{м}}, T_{\text{в1}}, T_{\text{в2}}, T_{\text{д}}$ – температура соответственно подшипников компрессора, масла, сжатого воздуха, на входе и выходе холодильника ХВ, статора электродвигателя М;

$P_{\text{в}}, P_{\text{вс}}$ – давление сжатого воздуха на выходе компрессора и в воздухохранильнике;

$Q_{\text{в}}$ – расход сжатого воздуха в пневмосети;

n – частота вращения электродвигателя компрессора;

$\bar{X}$ – вектор контролируемых параметров и состояния компрессорного агрегата, подаваемых на входы ПЛК от соответствующих датчиков;

$\bar{U}$ – вектор управляющих воздействий на рабочий и исполнительные приводы КА, формируемых ПЛК в соответствии с алгоритмом управления;

$\bar{X}_{\text{су}}$ – вектор контролируемых параметров и состояний системы СУЭД, формируемый датчиками электропривода компрессора.

Алгоритм управления компрессорным агрегатом представлен на рис. 9.9.

Параметрами настройки алгоритма управления являются:

$t_{\text{мз}}$ – допустимое время на запуск системы смазки компрессора;

$P_{\text{мз}}$ – заданное давление масла в системе смазки;

$t_{\text{овз}}$ – допустимое время на открывание задвижки охлаждающей воды;

$t_{\text{пз}}$ – допустимое время пуска двигателя компрессора после его включения;

$L_{\text{овз}}, L_{\text{вз}}$ – заданные положения задвижек ЗОВ и ЗВ (значение полного хода задвижек);

$N_{\text{з}}$ – заданная частота вращения вала двигателя компрессора (устанавливается либо оператором, либо управляющим компьютером в зависимости от требуемой производительности компрессора);

$t_{\text{прз}}$ – заданное время на прогрев компрессора при работе без нагрузки;

$t_{\text{заг}}$ – заданное время на закрывание разгрузочного клапана (время плавной загрузки компрессора);

$P_{\text{вз}}$ – заданное давление сжатого воздуха на выходе компрессора;

$t_{\text{звз}}$ – допустимое время на открывание задвижки воздуха;

$P_{\text{з}}$ – заданное давление воздуха в воздухоборнике в рабочем режиме;

$P_{\text{вса}}$ – предаварийное значение давления воздуха в воздухоборнике;

T_{ia} – предаварийное значение температуры подшипников компрессора ($T_{\text{пка}}$) и масла в картере ($T_{\text{ма}}$), температуры сжатого воздуха на входе ($T_{\text{в1а}}$) и выходе ($T_{\text{в2а}}$) компрессора, температура статора двигателя ($T_{\text{да}}$) компрессора, где $i = \text{ПК, М, В1, В2, Д}$;

L_a – предаварийный уровень воды в рабочей зоне холодильника воздуха;

$P_{\text{ма}}$ – минимальное допустимое давление в системе смазки компрессора;

$Q_{\text{ова}}$ – минимальное допустимое значение потока воды в системе охлаждения компрессорного агрегата;

$\Delta P_{\text{вфа}}$ – максимальное допустимое значение перепада давления на воздушном фильтре;

$t_{\text{рц}}$ – заданное время цикла продувки конденсата в воздухоборнике.

Рис. 9.9. Алгоритм управления компрессорным агрегатом

Система автоматизации компрессорного агрегата функционирует следующим образом. При запуске программы управления задают начальные условия, после чего появляется возможность перевести контроллер в тестовый режим для проверки исправности функционирования как контроллера, так и элементов индикации и сигнализации. Далее контроллер переходит в режим ожидания команды на включение компрессорного агрегата. Если выбран автоматический режим, то команда на запуск КА поступает от управляющего компьютера (УК) станции. Если контроллер находится в режиме местного управления, он ожидает нажатия кнопки ПУСК.

При поступлении команды на включение контроллер начинает отрабатывать алгоритм запуска КА. Перед началом нормальной работы компрессора на пневмосеть необходимо включить системы его смазки и охлаждения, запустить электродвигатель и прогреть компрессор в режиме холостого хода, затем загрузить компрессор и подключить его к воздухосборнику (коллектору станции). Для этого контроллер включает маслonaсос, контролируя в течение заданного времени $t_{мз}$ достижение заданного давления масла $P_{мз}$, включает привод задвижки ЗОВ на открывание, контролируя в течение времени $t_{овз}$ ее положение $L_{овз}$, запускает систему управления электродвигателем СУЭД, контролируя время пуска $t_{пз}$ и достижение заданной частоты вращения $n_з$, электродвигателем компрессора, контролирует время прогрева t компрессора, включает привод разгрузочного клапана на закрытие для загрузки компрессора, контролируя процесс закрывания клапана по времени $t_{заг}$ и давлению воздуха $P_{вз}$ на выходе компрессора и, наконец, включает привод задвижки ЗВ на открывание для подключения компрессора к пневмосети, контролируя время ее открывания и положение. Если в процессе запуска не выполняется любое из вышеуказанных условий, пуск компрессорного агрегата прекращается, соответствующий исполнительный механизм возвращается в исходное состояние и включается сигнализация причины прекращения запуска КА.

В нормальном режиме работы компрессор должен обеспечивать заданную производительность для поддержания давления сжатого воздуха на заданном уровне $P_з$. Заданная управляющим компьютером производительность компрессора обеспечивается

замкнутой системой СУЭД путем стабилизации частоты вращения электродвигателя на заданном уровне, т.е. обеспечением $n = n_3$.

При работе компрессора в режиме поддержания заданной производительности, ПЛК контролирует теплотехнические и технологические параметры работы и состояния элементов КА и при достижении ими критических значений осуществляет аварийное отключение КА: отключает электродвигатели компрессора и маслососа, открывает разгрузочный клапан, включает задвижки ЗОВ и ЗВ на закрывание, включает аварийную сигнализацию

с расшифровкой причины срабатывания соответствующей защиты: а) от недопустимого повышения давления сжатого воздуха; б) перегрева подшипников, масла, сжатого воздуха, статора электродвигателя; в) появления воды в рабочей зоне холодильника; г) недопустимого снижения давления масла и расхода охлаждающей воды; д) засорения воздушного фильтра. Повторный запуск КА возможен только после устранения аварийной ситуации.

В процессе работы КА контроллер периодически, через заданное время $t_{рц}$, включает клапан КП для удаления конденсата из воздухохранилища в течение времени $t_{пр}$.

В нормальном режиме работы КА контроллер ожидает команду на отключение в автоматическом режиме – от УК, в местном – от оператора (нажатие кнопки СТОП). Получив такую команду, контроллер формирует сигнал управления отключением КА, осуществляя разгрузку компрессора, отключение его электродвигателя и маслососа, включение задвижек ЗОВ и ЗВ на закрывание.

После оперативного останова КА контроллер снова переходит в режим ожидания команды ПУСК от УК или оператора.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анашкин, А. С. Техническое и программное обеспечение распределенных систем управления : учеб. пособие для вузов / А. С. Анашкин, Э. Д. Кадыров, В. Г. Харазов. – СПб., 2004. – 368 с.
2. АСУ ТП цеха углеприема обогатительной фабрики «Сибирь» / В. Волков [и др.] // Современные технологии автоматизации. – 2000. – № 3. – С. 26–35.
3. Конюх, В. Л. Компьютерная автоматизация производства : учеб. пособие : в 2 ч. ; ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2003. – 222 с.
4. Каширских, В. Г. Автоматизация технологических процессов : учеб. пособие / В. Г. Каширских, А. Е. Медведев ; КузГТУ. – Кемерово, 1998. – 131 с.
5. Каширских, В. Г. Принципы автоматизированного управления одноковшовым карьерным экскаватором и функциональное диагностирование электроприводов на основе компьютерных технологий / В. Г. Каширских, А. Е. Медведев // Вестн. КузГТУ. – 2005. – № 1. – С. 75–81.
6. Корытин, А. М. Автоматизация типовых технологических процессов и установок : учеб. для вузов. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 432 с.
7. Ломакин, М. С. Автоматическое управление технологическими процессами карьеров : учеб. для вузов. – М. : Недра, 1978. – 280 с.
8. Медведев, А. Е. Компьютерная система управления конвейерной линией // Вестн. КузГТУ. – 2005. – № 6. – С. 51–56.
9. Медведев, А. Е. Микропроцессорная система автоматизации карьерного бурового станка // Вестн. КузГТУ. – 2006. – № 6. – С. 15–23.
10. Медведев, А. Е. Принципы построения компьютерной системы автоматизации шахтной компрессорной станции // Вестн. КузГТУ. – 2007. – № 3. – С. 34–35.
11. Медведев, А. Е. Микропроцессорная система автоматизации компрессорного агрегата // Вестн. КузГТУ. – 2007. – № 3. – С. 29–34.

12. Нечаев, Г. К. Автоматизация технологических процессов на предприятиях строительной индустрии : учеб. пособие для вузов. – Киев : Выща шк., 1979. – 280 с.

13. Шувалов, В. В. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности : учеб. для техникумов / В. В. Шувалов, С. А. Огаджанов, В. А. Голубятников. – М. : Химия, 1991. – 480 с.

14. Шемелин, В. К. Проектирование систем управления в машиностроении : учеб. для вузов. – М. : Станкин, 1998. – 254 с.

**Медведев Алексей Елисеевич
Чупин Александр Васильевич**

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Учебное пособие

Редактор О. А. Вейс

Подписано в печать 15.09.2009. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Уч.-изд. л. 20,00.

Тираж 210 экз. Заказ

ГУ КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Типография ГУ КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.