

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ
ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра автоматизированного
управления технологическими процессами

Р.Ю. Ткачев, С.С. Денищик

Учебное пособие

для студентов дневной и заочной форм
обучения по курсу
«АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ»

Алчевск, 2012

УДК 681.5:004.942

ВВК 32.96

В пособии рассматриваются принципы построения структуры современной автоматизированной системы управления технологическими процессами, разнообразия аппаратного и программного обеспечения АСУ, вопросы информационного обмена и организации сетевой архитектуры систем управления. Изложены основные сведения о способах математического описания многосвязных систем управления, применении методов анализа и синтеза линейных многосвязных систем, а также при наличии запаздывания. Приведены примеры реализации различных систем управления технологическими процессами.

Учебное пособие предназначено для оказания помощи студентам дневного и заочного обучения при изучении и подготовке к экзаменам дисциплины «АСУ ТП».

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Современная система управления производства	7
1.1. Основные понятия и определения.....	7
1.2. Структура современной АСУТП.....	13
1.2.1. Типовая структура и основные функциональные подсистемы современной АСУТП	13
1.2.2. Устройства связи с объектом.....	16
1.2.3. Аппаратное обеспечение АСУ	25
1.2.4. Промышленные сети	40
1.2.5. Программное обеспечение АСУ	57
1.2.6. Распределенные АСУ.....	71
1.3. Последовательность создания АСУТП.....	88
1.4. Вопросы для самопроверки	91
2. Математические модели динамики управляемых процессов.....	92
2.1. Линейные многомерные объекты управления	92
2.1.1. Математические модели процессов.....	92
2.1.2. Типовые многосвязные объекты управления	96
2.2. Представление во временной и частотной областях	102
2.3. Структурные схемы многомерных систем управления	107
2.4. Вопросы для самопроверки	109
3. Анализ многомерных систем.....	110
3.1. Управляемость	110
3.2. Стабилизируемость	112
3.3. Нормализуемость	113
3.4. Проблема многосвязности	114

4. Управление линейными многосвязными процессами	120
4.1. Автономное регулирование	120
4.2. Синтез компенсатора задающих воздействий.....	126
4.3. Модальное управление	129
4.4. Вопросы для самопроверки	135
5. Управление системами с распределенными параметрами	136
5.1. Управление с обратной связью для линейных объектов с распределенными параметрами	136
5.2. Технологические процессы с запаздыванием и их математические модели.....	138
5.3. Методы управления объектами с запаздыванием.....	149
5.3.1. Управление системами с запаздыванием в управлении	149
5.3.2. Управление многомерными процессами со многими запаздываниями	156
5.4. Вопросы для самопроверки	174
Литература.....	175

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизированные системы управления технологическими процессами являются качественно новым этапом комплексной автоматизации, призванным обеспечить существенное увеличение производительности труда, улучшение качества выпускаемой продукции и других технико-экономических показателей различных типов производств.

Для управления технологическими процессами, начиная со времени зарождения этой области техники в древности и до начала 60-х годов XX столетия, применялись в основном простейшие механические, пневматические или электрические регуляторы, расчет которых основывался на линейных одномерных моделях. Отсутствие более сложных систем управления объяснялось их высокой стоимостью, ограниченными возможностями технических средств, медленными темпами создания подходящей теоретической базы. Однако даже простейшие контуры регулирования хорошо зарекомендовали себя там, где для объектов управления характерны большие постоянные времени, устойчивость в разомкнутом состоянии, а это характерно приблизительно лишь для 80% технологических процессов. Для остальных 20% использование простейших контуров регулирования считалось менее эффективным, но все же допустимым, так как в рассматриваемый период не было жестких ограничений, связанных с охраной окружающей среды, качество продукции контролировалось слабо.

За последние 10 лет положение дел существенно изменилось. В наше время преобладают непрерывные технологические процессы большой мощности со сложными комплексами энергетических и материальных потоков и с жесткими требованиями к качеству продукции, к безопасности персонала, к сохранности оборудования и к воздействию на окружающую среду, что ведет к созданию более совершенных систем управления. В самом деле, снижение на длительный срок качества продукции, остановка процесса из-за аварии в системе управления или, наконец, значительное загрязнение окружающей среды могут иметь катастрофические последствия для всей экономики в целом. Таким образом, имеются предпосылки — экономические

стимулы — к созданию эффективных систем управления современными технологическими процессами.

Большое значение имеет также наблюдающаяся в последнее время тенденция к повышению надежности и одновременному снижению цен на промышленные ЭВМ для непосредственного управления технологическими процессами. Поскольку ЭВМ составляет теперь лишь незначительную долю общих капиталовложений на создание системы управления, установка на объекте быстродействующей машины с большим объемом памяти экономически оправдана. Такая ЭВМ работает в реальном масштабе времени, причем разнообразные устройства ввода-вывода информации занимают в среднем примерно 5% времени центрального процессора, оставляя, таким образом, 95% для непосредственной реализации сложных алгоритмов управления, программирование которых может вестись на языках высокого уровня. Уже сегодня мы можем видеть как на производстве распространяется архитектура ПК и компьютерных сетей в иерархии автоматизированных систем управления.

И наконец, существенным моментом является развитие современной теории управления, методы которой успешно применялись в авиационно-космической технике. В последние годы постоянно растет число специалистов, применяющих методы современной теории управления как для экспериментальных, модельных, так и для реальных технологических процессов. Таким образом, можно утверждать, что теория с богатыми возможностями практических приложений уже имеется. Остается проблема ознакомления с этой теорией широкого круга инженеров-разработчиков автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП).

1. СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА

1.4. 1.1. Основные понятия и определения

Автоматизация - это техническая дисциплина, которая занимается изучением, разработкой и созданием автоматических устройств и механизмов (т.е. работает без непосредственного вмешательства человека).

Автоматизация - это этап машинного производства, характеризующийся передачей функции управления от человека к автоматическим устройствам (техническая энциклопедия).

ТОУ - технологический объект управления - совокупность технологического оборудования и реализуемого на нем технологического процесса.

АСУ - автоматизированная система управления это человеко-машинная система, обеспечивающая автоматизированный сбор и обработку информации, необходимую для оптимального управления в различных сферах человеческой деятельности.

Развитие металлургической, энергетической, химической и других отраслей промышленности, где преобладают непрерывные технологические процессы, потребовало создания более совершенных систем управления, чем локальные АСР. Эти принципиально новые системы получили название автоматизированных систем управления технологическими процессами - АСУ ТП.

Создание АСУ ТП стало возможным благодаря созданию ЭВМ второго и третьего поколений, увеличению их вычислительных ресурсов и надёжности.

АСУ ТП - называют АСУ для выработки и реализации управляющих воздействий на ТОУ в соответствии с принятым критерием управления - показателем, характеризующим качество работы ТОУ и принимающим определенные значения в зависимости от используемых управляющих воздействий.

АТК - совокупность совместно функционирующих ТОУ и АСУ ТП образует автоматизированный технологический комплекс.

АСУ ТП отличается от локальных САР:

– более совершенной организацией потоков информации;

- практически полной автоматизацией процессов получения, обработки и представления информации;

- возможностью активного диалога оперативного персонала с УВМ в процессе управления для выработки наиболее эффективных решений;

- более высокой степенью автоматизации функций управления, включая пуск и остановку производства.

От систем управления автоматическими производствами типа цехов и заводов-автоматов (высшая ступень автоматизации) АСУ ТП отличается значительной степенью участия человека в процессах управления.

Переход от АСУ ТП к полностью автоматическим производствам сдерживается:

- несовершенством технологических процессов (наличие немеханизированных технологических операций);

- низкой надёжностью технологического оборудования; недостаточной надёжностью средств автоматизации и вычислительной техники;

- трудностями математического описания задач, решаемых человеком в АСУ ТП и т.д.).

Глобальная цель управления ТОУ с помощью АСУ ТП состоит в поддержании экстремального значения критерия управления при выполнении всех условий, определяющих множество допустимых значений управляющих воздействии.

В большинстве случаев глобальная цель разбивается на ряд частных целей; для достижения каждой из них требуется решение более простой задачи управления.

Функцией АСУ ТП называют действия системы, направленные на достижение одной из частных целей управления.

Частные цели управления, как и реализующие их функции, находятся в определенном соподчинении, образуя функциональную структуру АСУ ТП.

Функции АСУ ТП:

1. Информационные - сбор, преобразование и хранение информации о состоянии ТОУ; представление этой информации оперативному персоналу или передача ее для последующей обработки.

2. Первичная обработка информации о текущем состоянии ТОУ.

3. Обнаружение отклонений технологических параметров и показателей состояния оборудования от установленных значений.

4. Расчет значений неизмеряемых величин и показателей (косвенные измерения, расчет ТЭП, прогнозирование).

5. Оперативное отображение и регистрация информации.

6. Обмен информацией с оперативным персоналом.

7. Обмен информацией со смежными и вышестоящими АСУ.

Управляющие функции обеспечивают поддержание экстремальных значения критерия управления в условиях изменяющейся производственной ситуации, они делятся на две группы:

1) определение оптимальных управляющих воздействий;

2) реализация этого режима путем формирования управляющих воздействий на ТОУ (стабилизация, программное управление; программно-логическое управление).

Вспомогательные функции обеспечивают решение внутрисистемных задач.

Для реализации функций АСУ ТП необходимы:

- техническое обеспечение;
- программное;
- информационное;
- организационное;
- оперативный персонал.

Техническое обеспечение АСУ ТП составляет комплекс технических средств (КТС), содержащий следующие элементы:

- средства получения информации о текущем состоянии ТОУ;
- УВК (управляемый вычислительный комплекс);
- технические средства для реализации функций локальных систем автоматизации;
- исполнительные устройства, непосредственно реализующие управляющие воздействия на ТОУ.

В комплекс ТС многих АСУ ТП входят механические средства автоматизации из состава электрической ветви ГСП.

Специфическим компонентом КТС является УВК, в состав которого входят собственно вычислительный комплекс (ВК), устройства связи ВК с объектом (УСО) и с оперативным персоналом.

Программное обеспечение АСУ ТП связывает все элементы распределённой технической структуры в единое целое, обладающее рядом достоинств:

- возможностью получения высоких показателей надёжности за счёт расщепления АСУ ТП на семейство сравнительно небольших и менее сложных автономных подсистем и дополнительного резервирования каждой из этих подсистем через сеть;

- применение более надежных средств микроэлектронной вычислительной техники;

- большой гибкостью при композиции и модернизации технического и программного обеспечения и т.д.

Большинство функций АСУ ТП реализуются программно, поэтому важнейшим компонентом АСУ ТП является её программное обеспечение (ПО), т.е. совокупность программ, обеспечивающих реализацию функций АСУ ТП.

Программное обеспечение АСУ ТП делится:

- общее;

- специальное.

Общее ПО поставляется в комплекте со средствами вычислительной техники.

Специальное ПО разрабатывается при создании конкретной АСУ ТП и включает программы, реализующие её информационные и управляющие функции.

Программное обеспечение создается на базе математического обеспечения (МО). МО это совокупность математических методов, моделей и алгоритмов для решения задач и обработки информации с применением вычислительной техники.

Для реализации информационных и управляющих функций АСУ ТП создают специальное МО, в состав которого входят:

- алгоритм сбора, обработки и представления информации;

- алгоритмы управления с математическими моделями соответствующих объектов управления;

- алгоритмы локальной автоматизации.

Все взаимодействия как внутри АСУ ТП, так и с внешней средой представляют собой различные формы информационного обмена, необходимы массивы данных и документов, которые обеспечивают при эксплуатации АСУ ТП выполнение всех её функций.

Правила обмена информацией и сама информация, циркулирующая в АСУ ТП, образуют информационное обеспечение АСУ ТП.

Организационное обеспечение АСУ ТП представляет собой совокупность описаний функциональной, технической и организационной структур системы, инструкций и регламентов для оперативного персонала, обеспечивающую заданное функционирование АСУ ТП.

Оперативный персонал АСУ ТП состоит из технологов-операторов, осуществляющих управление ТООУ, эксплуатационного персонала, обеспечивающего функционирование АСУ ТП (операторы ЭВМ, программисты, персонал по обслуживанию аппаратуры КТС).

Оперативный персонал АСУ ТП может работать в контуре управления или вне него.

При работе в контуре управления ОП реализует все функции управления или часть их, используют рекомендации по рациональному управлению ТООУ, выработанные КТС. Такой режим функционирования АСУ ТП называют информационно - советующим.

Если оперативный персонал работает вне контура управления, он задает АСУ ТП режим работы и осуществляет контроль за его соблюдением. В этом случае, в зависимости от состава КТС, АСУ ТП может функционировать в двух режимах:

- супервизорном (комбинированном), при котором задание (уставка) локального регулятора изменяется в соответствии с определяемой алгоритмом управления величиной управляющего воздействия;

- в режиме непосредственного цифрового управления, при котором УВК непосредственно воздействует на исполнительные устройства, изменяя управляющие воздействия на ТООУ, т.е. предполагает выполнение на ЭВМ всех действий по управлению, в том числе сбор измерительной информации, сравнение с уставками, выдачу управляющего воздействия регулирующим органом.

Рассмотрим пример регулирования расхода пара (жидкости, газа) (рис.1.1) в режиме непосредственного цифрового управления. Измерение величины расхода осуществляется ЭВМ в дискретные моменты времени и управляющие воздействия выдаются в виде изменения положения заслонки. Интервал времени опроса и времени выдачи управляющих воздействий Δt нужно выбирать таким образом, чтобы не ухудшить качества управления при слишком большом Δt и не получить чрезмерной нагрузки на ресурсы ЭВМ при слишком малом Δt . И супервизорное, и непосредственное цифровое

управление широко распространены на практике; как тот, так и другой способ могут быть применены для реализации современных методов управления.

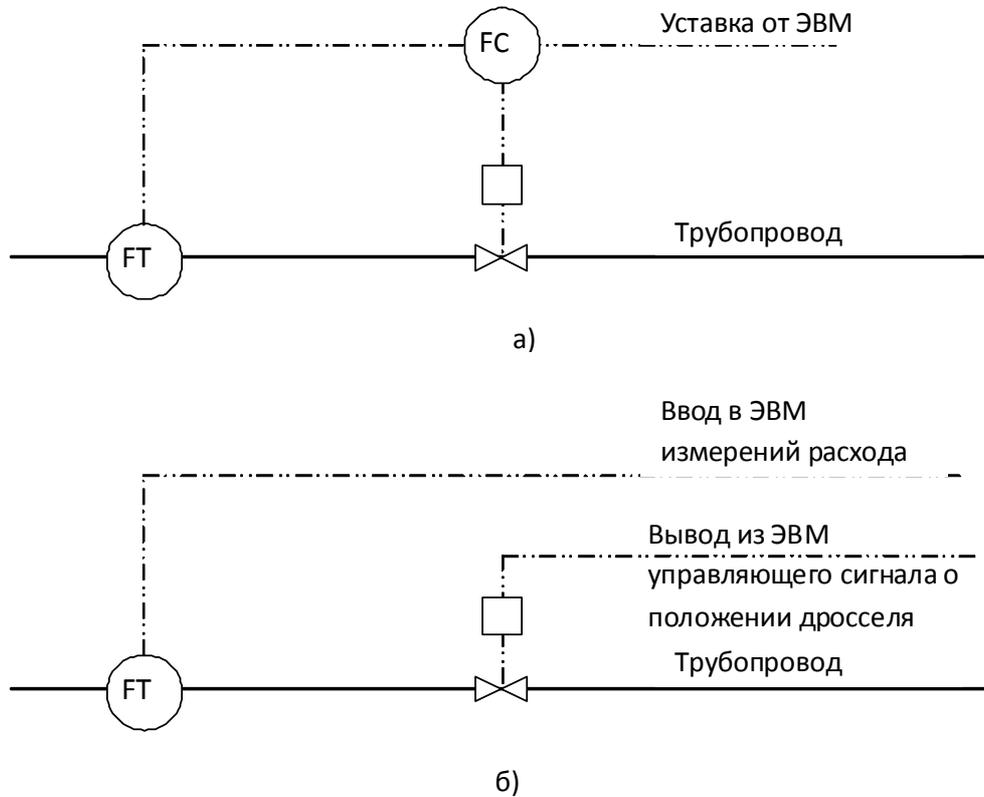


Рисунок 1.1 - Схемы супервизорного (а) и непосредственного цифрового управления (б) расходом пара (жидкости)

В большинстве технологических процессов динамические характеристики локальных регуляторов (цифровых или аналоговых) недостаточны для управления объектами с реальными постоянными времени, поэтому требуются более сложные схемы управления, например каскадные, последовательно изменяющие уставки в нескольких ступенях локальных регуляторов; следовательно, не существенно, аналоговые или цифровые регуляторы используются в такой схеме.

1.5. 1.2. Структура современной АСУТП

1.2.1. Типовая структура и основные функциональные подсистемы современной АСУТП

Функции АСУ ТП распределяются по иерархическому принципу – в два или три уровня и заключаются в:

- сборе информации;
- поддержании технологических параметров на заданных значениях;
- контроле технологических параметров, для которых не выполняются функции регулирования;
- сигнализации;
- блокировке управлений, являющихся результатом ошибочных действий технологического персонала;
- противоаварийной защите (ПАЗ) при возникновении аварийных ситуаций.

Упрощенно структуру АСУТП можно представить в следующем виде (см. рис. 1.2).

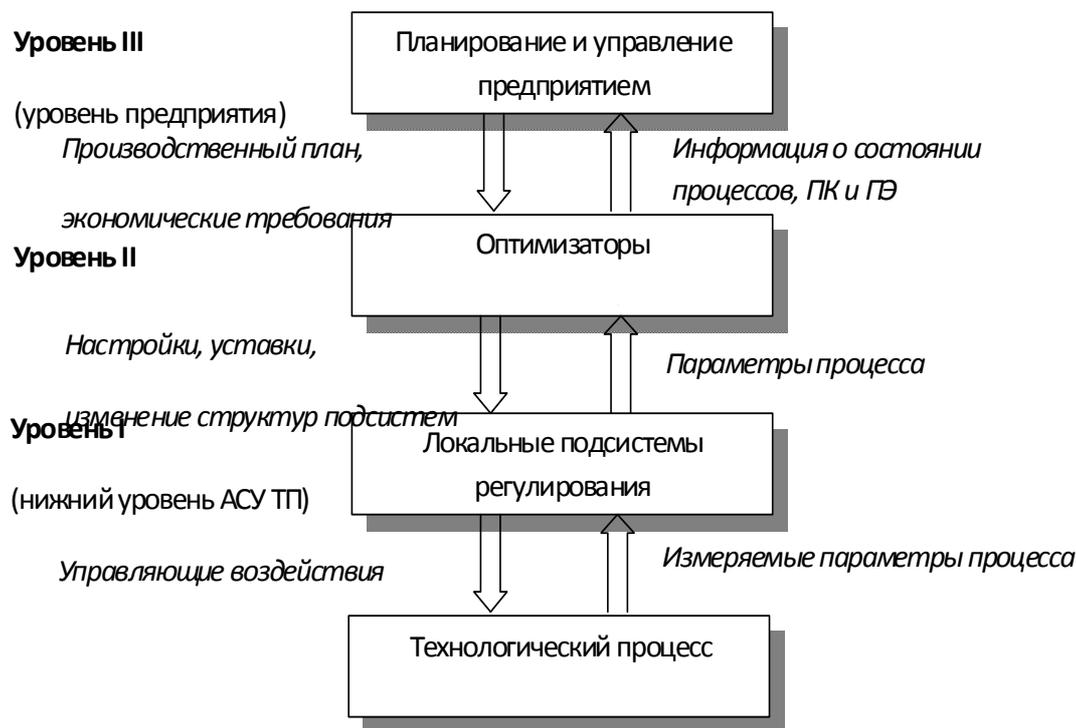


Рисунок 1.2 – Структура информационных потоков АСУ ТП

Первый (нижний) уровень АСУТП является уровнем датчиков, исполнительных механизмов и контроллеров, которые устанавливаются

непосредственно на технологических объектах. Их деятельность заключается в получении параметров процесса, преобразовании их в соответствующий вид для дальнейшей передачи на более высокую ступень (функции датчиков), а также в приеме управляющих сигналов и в выполнении соответствующих действий (функции исполнительных механизмов).

Задачами уровня являются:

- сбор информации об измеряемых технологических параметрах процесса;
- выработка управляющих воздействий на технологический процесс с целью поддержания технологических параметров на заданных значениях или изменения их по определенным законам;
- сигнализация о выходе их за заданные пределы;
- блокировка ошибочных действий персонала и управляющих устройств;
- противоаварийная защита (ПАЗ) процесса по факту аварийных событий.

Подсистемы этого уровня поддерживают параметры технологического процесса на заданных значениях и могут быть реализованы с использованием «традиционных» методов регулирования динамическими объектами.

Второй (средний) уровень - уровень производственного участка (цеха). Его функции:

- сбор информации, поступающей с нижнего уровня, ее обработка и хранение;
- выработка управляющих сигналов на основе анализа информации;
- передача информации о производственном участке на более высокий уровень;
- вычисление неизмеряемых параметров, в частности, показателей качества (ПК) продуктов, технико-экономических показателей;
- сведение материальных балансов;
- архивирование информации;
- генерация отчетов;
- диагностика и защита от сбоев в элементах подсистем нижнего уровня;
- определение настроек управляющих устройств (УУ) и уставок локальных регуляторов подсистем I уровня;
- изменение структуры локальных подсистем (переконфигурирование, включение/выключение, переход в ручное управление и т.д.).

На данном уровне производится оптимизация технологических процессов по технологическим показателям.

Третий (верхний) уровень в системе автоматизации занимает т.н. уровень управления и относится к системе управления предприятием (АСУП). На этом уровне осуществляется контроль за производством продукции и оптимизация по технико-экономическим и экономическим показателям. Этот процесс включает в себя сбор поступающих с производственных участков данных, их накопление, обработку и выдачу руководящих директив нижним ступеням. Задачи управления данного уровня:

- оптимизация экономических показателей производства;
- управление по экономическим и технико-экономическим показателям;
- сведение материальных балансов;
- архивирование информации;
- составление производственных планов и т.д.

Следует отметить, что некоторые задачи второго и третьего уровней перекрываются и в ряде случаев эти два уровня объединяются в один.

Атрибутом этого уровня является центр управления производством, который может состоять из трех взаимопроникающих частей:

- 1) операторской части,
- 2) системы подготовки отчетов,
- 3) системы анализа тенденций.

Операторская часть отвечает за связь между оператором и процессом на уровне управления. Она выдает информацию о процессе и позволяет в случае необходимости вмешательство в ход автоматического управления. Обеспечивает диалог между системой и операторами.

Система подготовки отчетов выводит на экраны, принтеры, в архивы и т.д. информацию о технологических параметрах с указанием точного времени измерения, выдает данные о материальном и энергетическом балансе и др.

Система анализа тенденций дает оператору возможность наблюдать за технологическими параметрами и делать соответствующие выводы.

На верхнем уровне АСУ ТП размещены мощные компьютеры, выполняющие функции серверов баз данных и рабочих станций и обеспечивающие анализ и хранение всей поступившей информации за любой заданный интервал времени, а также визуализацию информации и взаимодействие с оператором (рис. 1.3). Основой программного обеспечения верхнего уровня являются пакеты SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition - системы управления и доступа к данным).

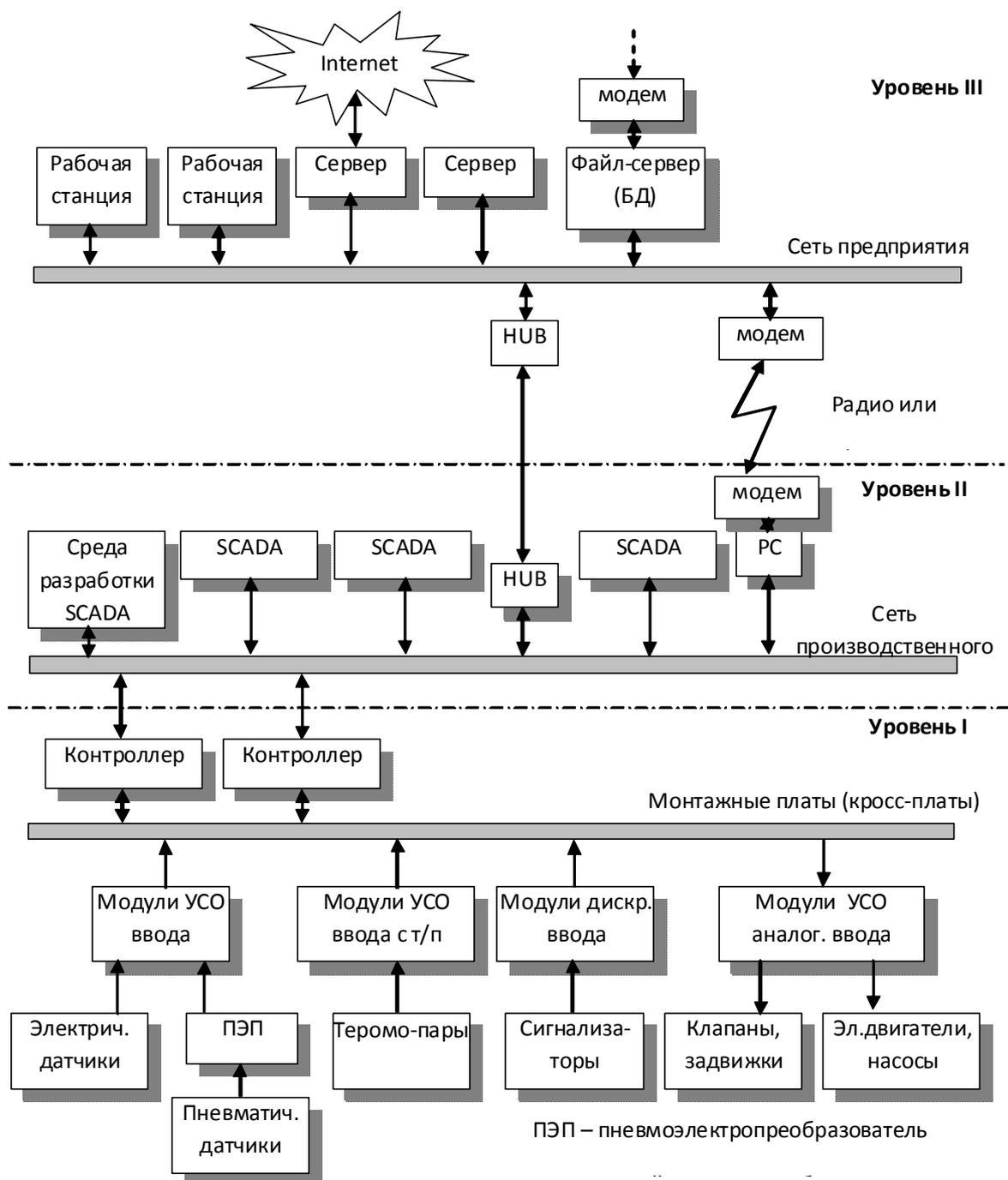


Рисунок 1.3 – Развернутая структура современной АСУТП

1.2.2. Устройства связи с объектом

Почти все технологические параметры, присутствующие в реальном промышленном объекте, имеют аналоговый или дискретный вид. Существует много датчиков, которые могут преобразовывать измеряемые величины только в аналоговый вид, а также много исполнительных механизмов, имеющих только аналоговые входные сигналы. С другой стороны, новейшие

средства автоматизации, которые находят все большее применение в системах управления, используют цифровое представление обрабатываемых величин. Для того, чтобы связать между собой параметры, представленные в аналоговом/дискретном и цифровом виде, используются устройства связи с объектами (УСО). Таким образом, УСО являются неотъемлемой частью любой системы управления, в том числе использующей цифровые устройства (промышленные компьютеры, вычислительные сети и т.д.). Для представления места УСО в процессе автоматизации производства подобные системы можно теоретически изобразить в виде схемы (см. рисунок 1.4).

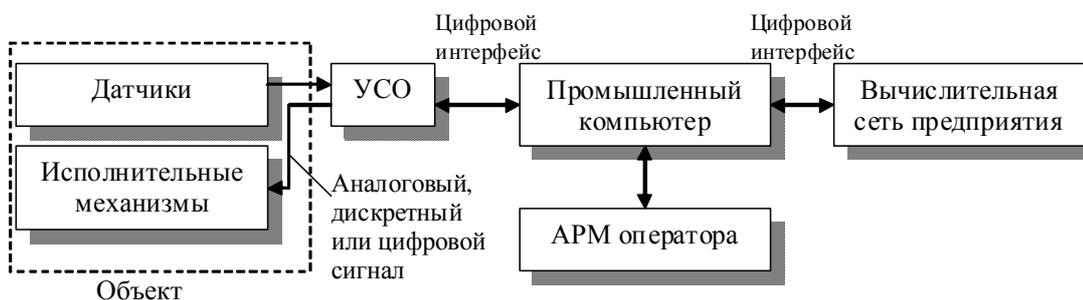


Рисунок 1.4 – Место УСО в АСУ

Датчики, устанавливаемые на объекте, предназначены для первичного преобразования параметров в выходной сигнал для передачи в УСО. Исполнительные механизмы принимают управляющие сигналы, прошедшие через УСО, для воздействия на процесс. Связь между датчиками, исполнительными механизмами и УСО может быть аналоговой, дискретной или цифровой.

Промышленный компьютер (PC) в системе играет роль управляющего элемента, принимающего цифровую информацию от УСО и вырабатывающего управляющие сигналы. Для связи между ним и УСО используется любой из цифровых интерфейсов (ЦИ), к числу которых относятся RS-232, RS-422, RS-485 и др.

Данная схема является условной, поскольку в реальных системах модули УСО могут не присутствовать в виде самостоятельного устройства, а входить в состав датчиков или промышленных компьютеров. Примером служат датчики, которые осуществляют двойное (тройное и т.д.) преобразование измеряемой величины и выдающие на вход готовый цифровой сигнал. В этом случае граница между собственно первичным преобразователем и УСО проходит где-то внутри него. С другой стороны,

УСО могут быть выполнены в виде АЦП/ЦАП-платы, вставляемой в ISA-слот компьютера. В этом случае аналоговые сигналы могут быть введены прямо в компьютер, где и преобразуются в цифровой код.

В дальнейшем в качестве УСО будем рассматривать модули, платы и другие устройства, предназначенные для приема аналоговых и дискретных сигналов от объекта (независимо от того, сколько раз они были преобразованы внутри него), преобразования его в цифровой вид для передачи в компьютер (контроллер), а также для приема цифровых управляющих данных от РС и преобразования их в вид, соответствующий исполнительным механизмам объекта.

Модули УСО - это конструктивно законченные устройства, выполненные в виде модулей, устанавливаемых, как правило, в специализированные платы, имеющие клеммные соединители для подвода внешних цепей (такие платы называют монтажными панелями), либо на стандартный несущий DIN-рельс. Модули УСО заключены в пластмассовый корпус и оснащены соответственно либо выводами для крепления на монтажных панелях, либо клеммными соединителями с винтовой фиксацией для крепления входных и выходных цепей.

На УСО возлагают следующие функции:

1) Нормализация аналогового сигнала - приведение границ шкалы первичного непрерывного сигнала к одному из стандартных диапазонов входного сигнала аналого-цифрового преобразователя измерительного канала. Наиболее распространены диапазоны напряжений от 0 до 5 В, от -5 до 5 В, от 0 до 10 В и токовые: от 0 до 5 мА, от 0 до 20 мА, от 4 до 20 мА, от 1 до 5 мА.

2) Предварительная низкочастотная фильтрация аналогового сигнала - ограничение полосы частот первичного непрерывного сигнала с целью снижения влияния на результат измерения помех различного происхождения. На промышленных объектах наиболее распространены помехи с частотой сети переменного тока, а также хаотические импульсные помехи, вызванные влиянием на технические средства измерительного канала переходных процессов и наводок при коммутации исполнительных механизмов повышенной мощности.

3) Обеспечение гальванической изоляции между источниками сигнала и каналами системы.

Помимо этих функций, ряд устройств связи с объектом может выполнять более сложные функции за счет наличия в их составе подсистемы аналого-цифрового преобразования и дискретного ввода-вывода, микропроцессора и средств организации одного из интерфейсов последовательной передачи данных.

Простейшим устройством гальванической развязки является электромагнитное реле. Реле, как правило, инерционны, имеют относительно большие габариты и обеспечивают ограниченное число переключений при достаточно большом потреблении энергии. Развитие электроники привело к распространению компонентов, обеспечивающих оптическую развязку между цепями. УСО, построенные с использованием такой развязки, являются недорогими, высоконадежными и быстродействующими. Кроме того, они характеризуются высоким напряжением изоляции и низкой потребляемой мощностью.

По характеру обрабатываемого сигнала УСО можно разделить на аналоговые дискретные и цифровые.

Аналоговые УСО должны обладать большой точностью, хорошей линейностью и обеспечивать достаточно большое напряжение изоляции. Кроме того, желательными являются работа с различными источниками входных сигналов (токи, напряжения, сигналы от терморезисторов, термопар и т.д.), возможности быстрой замены и низкая стоимость.

Дискретные УСО обеспечивают опрос датчиков с релейным выходом, концевых выключателей, контроль наличия в цепи напряжения, тока и т.д., а выходные УСО формируют сигналы для управления пускателями, двигателями и прочими устройствами. Дискретные УСО должны удовлетворять тем же требованиям, что и аналоговые. Кроме того, они должны обладать минимальным временем переключения, а выходные - обеспечивать коммутацию как можно более высоких напряжений и токов и вносить при этом минимум искажений, обусловленных переходными процессами, в коммутируемую цепь.

Среди модулей УСО существуют также устройства, работающие только с **цифровой формой** информации. К ним относятся коммуникационные модули, предназначенные для обеспечения сетевого взаимодействия. Например, повторители, служащие для увеличения протяженности линии связи, преобразователи интерфейсов RS-232/RS-485.

По направлению прохождения данных через УСО их можно разделить на 3 типа:

1) устройства ввода, обеспечивающие передачу сигнала с датчиков в устройство обработки и вывода сигналов для управления;

2) устройства вывода, предназначенные для формирования сигналов для исполнительных механизмов;

3) двунаправленные, то есть обеспечивающие ввод и вывод сигналов.

Если рассматривать УСО с точки зрения назначения и конструктивного исполнения, то здесь можно выделить следующую классификационную структуру:

1 Устройства преобразования типа «а/д сигнал ↔ ЦИ», т.е. преобразующие аналоговые и дискретные сигналы в цифровой вид для передачи по цифровому интерфейсу (ЦИ) и наоборот. Внутри этого типа можно выделить классы:

1.1 Модули аналогового/дискретного ввода/вывода, выполненные в одном конструктиве (см. рис. 1.5,а). Пример: серия ADAM-4000 фирмы Advantech.

1.2 Устройства типа «а/д ↔ модуль ↔ м.п. ↔ ЦИ» (м.п. - монтажная плата) (см. рис. 1.5,б). Пример: модули фирм Grayhill, Analog Devices.

1.3 Устройства типа «а/д ↔ модуль ↔ м.п. ↔ контроллер ↔ ЦИ» (см. рис. 1.5,в). Пример: контроллеры Grayhill.

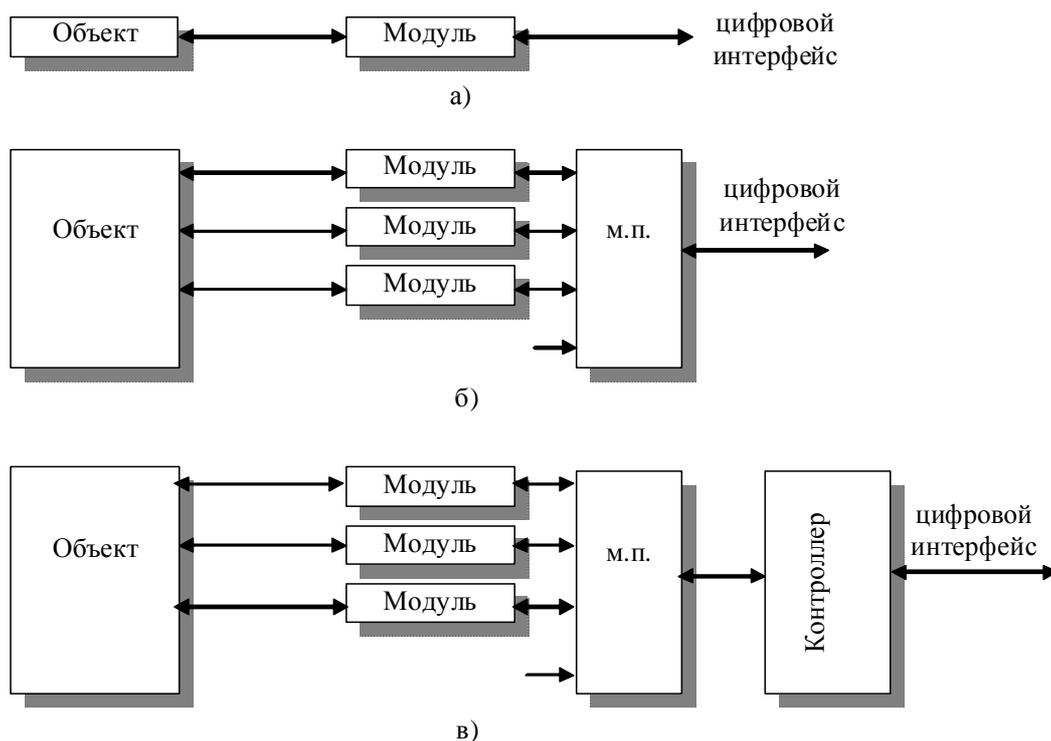


Рисунок 1.5 – Типы модулей УСО

2 Вспомогательные устройства:

2.1 Устройства типа «ЦИ ↔ ЦИ», служащие для преобразования интерфейсов либо для организации новых сегментов измерительной сети (коммуникационные модули) (см. рис. 1.5, г). Пример: серия ADAM-4000 фирмы Advantech.

2.2 Модули нормализации и гальванической развязки («а/д ↔ модуль ↔ а/д»). Пример: серия ADAM-3000 фирмы Advantech.

3 Платы для ввода/вывода данных в РС:

3.1 Формирователь интерфейсов («ЦИ ↔ плата ↔ РС»).

3.2 Платы АЦП/ЦАП («а/д ↔ плата ↔ РС»).

Некоторые УСО используют монтажные платы для установки модулей ввода/вывода. На некоторых из этих плат установлены АЦП/ЦАП-преобразователи и формирователи ЦИ.

Устройства первого вида являются основными УСО, используемыми в автоматизации и поэтому широко представленными производителями. Эти устройства предназначены для реализации взаимодействия между вычислительной системой и датчиками непрерывных и дискретных

параметров, а также для выдачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы.

Модули обеспечивают выполнение следующих функций:

- прием и дешифрацию команд по цифровому каналу;
- ввод и нормализацию аналоговых сигналов (ток и напряжение);
- опрос состояния дискретных входов;
- фильтрацию аналоговых и дискретных входных сигналов;
- вывод аналоговых (ток и напряжение) и дискретных сигналов;
- аналого-цифровое (для модулей аналогового ввода) преобразование;
- цифро-аналоговое (для модулей аналогового вывода) преобразование;
- преобразование шкалы значений непрерывных параметров в предварительно заданные единицы измерения;
- формирование и передачу в адрес основной вычислительной системы информации, содержащей результат измерения или состояние дискретных входов, после получения соответствующего запросу по цифровому каналу.

Настройка и калибровка многих модулей осуществляется программным способом путем передачи в их адрес соответствующих команд по информационной сети.

Примером таких модулей, выполненных в виде единого отдельного устройства, являются модули серии ADAM-4000, производимые фирмой Advantech.

Модули позволяют создавать на технологическом участке измерительную сеть, основанную на интерфейсе RS-485 и состоящую из нескольких сегментов.

Взаимодействие между основной вычислительной системой (контроллером сети, КС) и модулями, объединенными в сеть, осуществляется путем передачи в адрес каждого модуля запроса, содержащего префикс типа команды, символьное представление сетевого адреса запрашиваемого модуля, число, соответствующее подтипу команды, и символ возврата каретки. Для программного обеспечения КС выдача запроса означает выдачу строки символов в последовательный порт. При получения команды встроенное программное обеспечение модуля производит проверку его

корректности и идентификацию, после чего посылает в адрес КС запрашиваемую информацию в виде строки символов.

Представителем 2-го класса этого типа УСО, т.е. УСО, представляющих собой набор модулей, устанавливаемых на монтажную плату, являются модули и платы фирм Analog Devices (серии 5B, 6B, 7B), Grayhill (серии 70G, 70, 70M, 73G), Opto22 и др. Особенностью этих модулей аналогового/дискретного ввода является то, что они сами по себе не обеспечивают цифрового интерфейса. Выходы этих модулей, как правило, частотные. При этом частота выходного сигнала линейно зависит от значения входного сигнала и меняется в определенном диапазоне (14,4 кГц...72 кГц). Таким образом, чтобы получить цифровое значение входного сигнала, нужно измерить частоту с выхода модуля либо через дискретный порт ввода/вывода либо программным способом, либо используя специализированные монтажные платы, преобразующие частоту в код. Стоимость такой платы ниже, чем для традиционной платы АЦП, поскольку она работает с частотным, т.е. дискретным сигналом, а значит, не содержит дорогих аналоговых цепей.

Дополнительным достоинством устройств развязки данного класса является возможность установки на монтажную панель как аналоговых, так и дискретных модулей ввода/вывода, так как они совместимы по выводам.

Входным сигналом для модулей вывода является управляющее слово в двоичном последовательном коде, которое проходит через опторазвязку и далее через буфер подается на ЦАП. Функцию посылки этого слова принимает на себя монтажная плата.

К 3-му классу рассматриваемого типа УСО можно отнести микроконтроллеры фирмы Grayhill (OptoMux-MicroDAC, ProMux, MicroDAC LT, MicroLon, DeviceNet-DACNet и система OpenLine). Данные микроконтроллеры используют те же модули аналогового/дискретного ввода/вывода и монтажные платы, что и описанные выше. Отличительной чертой микроконтроллеров является то, что их семейства могут быть объединены в сеть и обеспечивать гибкие и недорогие решения при применении РС для управления и сбора данных. Кроме того, непосредственное расположение микроконтроллеров рядом с датчиками и исполнительными механизмами сокращает длину линий и увеличивает помехоустойчивость сети.

Они подключаются по интерфейсу RS-422/485 к сетевому серверу, в качестве которого используется промышленный РС или обычный офисный.

Коммуникационные модули предназначены для создания информационно-измерительных сетей, для увеличения протяженности линии связи или организации очередного сегмента сети (повторители).

Кроме того, к этому типу можно отнести преобразователи интерфейсов RS-232/RS-485 и др. Они необходимы для обеспечения связи, например, между измерительной сетью предприятия, построенной на RS-485, и интеллектуальными датчиками, которые, как правило, используют интерфейс RS-232, или радиомодемами.

Примером подобных систем являются коммуникационные модули серии ADAM-4000 фирмы Advantech:

- ADAM-4510 - повторитель RS-485/RS-485,
- ADAM-4520 - преобразователь RS-232/RS-422/RS-485,
- ADAM-4521 - преобразователь RS-232//RS-485,
- ADAM-4550 - радиомодем с преобразованием RS-485/RS-232.

Платы для ввода/вывода данных в PC работают с информацией, которая приходит либо через интерфейсы RS и др. (в случае с платами формирования интерфейсов), либо вводится в PC непосредственно в аналоговом/дискретном виде через платы АЦП. Данные платы устанавливаются непосредственно в слоты ISA (реже IPC) промышленного или обычного офисного PC.

Платы АЦП/ЦАП используются непосредственно для ввода измеряемой величины в компьютер и/или для вывода управляющих сигналов. Данные платы, как правило, имеют дополнительно несколько каналов цифрового ввода/вывода.

При выборе модулей УСО желательна ориентация на тот интерфейс, на основе которого построена измерительная сеть предприятия, так как в противном случае могут потребоваться модули преобразования интерфейсов. На выбор используемого интерфейса влияет топология сети и протяженность линий связи. Для разветвленных сетей и сетей с протяженными линиями (до 1200 м и более) наиболее подходящим является интерфейс RS-485. Количество устройств, подсоединенных к такой сети, ограничено 255.

Выбор интерфейса RS-422 в большинстве случаев нецелесообразен, так как он не имеет широкого распространения. Для небольших локальных сетей с количеством устройств порядка нескольких единиц может быть использован RS-232. Его преимуществом является то, что он встроен во все

промышленные и офисные PC и не требует дополнительных устройств. Недостаток - малая протяженность линий связи.

Протяженные сигнальные линии от датчиков и исполнительных устройств к центральному контроллеру часто приводят к проблемам, связанными с недостаточной помехоустойчивостью и поиском неисправностей.

Модули ввода/вывода серии ADAM-4000 фирмы Advantech наиболее целесообразно применять в распределенных системах сбора данных и прикладной области, для которых характерна невысокая скорость измерения параметров технологического процесса, подлежащих контролю. Функции локального, независимого от контроллера сети, управления представлены ограниченно и часто не удовлетворяют требованиям, выдвигаемым при постановке задачи комплексной автоматизации предприятия.

1.2.3. Аппаратное обеспечение АСУ

Современный рынок контроллеров и программно-технических комплексов весьма разнообразен. Выбор наиболее приемлемого варианта автоматизации представляет собой многокритериальную задачу, решением которой является компромисс между стоимостью, техническим уровнем, надежностью, комфортностью, затратами на сервисное обслуживание, полнотой программного обеспечения и многим другим.

Предприятия выбирают средства и системы автоматизации исходя из двух вариантов поставленной цели:

- решение чисто тактических задач автоматизации (замена морально и технически устаревших средств, обеспечение нормального функционирования процесса, реализация простейших функций – контроля, блокировки, регулирования);

- преследование стратегических целей автоматизации (повышение экономической эффективности, обеспечение интеграции данной системы автоматизации с другими системами на предприятии, обмен информацией с бизнес-процессами, т.е. с АСУП, упрощение обслуживания и возможных будущих модернизаций).

К особенностям приобретения средств и систем автоматизации большинством заказчиков можно отнести:

- отсутствие требований к современности приобретаемых средств и систем и свойствам, определяющим перспективность их эксплуатации;

- недостаточное знание рынка предлагаемых средств автоматизации и отсутствие их независимого объективного анализа;
- неоправданно узкое число производителей, рассматриваемых в качестве потенциальных поставщиков средств и систем автоматизации;
- незаинтересованность заказчика в сложных, но гораздо более эффективных алгоритмах управления. Обычно это объясняется достаточно низким уровнем обслуживающего персонала. Достаточно ПИД-регулятора и блокировок – это то, что нужно сейчас. А когда повысится квалификация персонала, тогда будем думать.

Формирование современного мирового, в том числе и российского, рынка средств и систем управления в последнее десятилетие было обусловлено следующими факторами:

- появлением недорогих и высокопроизводительных промышленных компьютеров на базе микропроцессоров фирмы Intel;
- появлением недорогих модулей ввода/вывода, конструктивно совмещенных с клеммными колодками;
- появлением в номенклатуре PLC модулей ПИД-регулирования;
- появлением коммуникационных модулей, позволяющих создавать сети PLC и легко подключать их к компьютеру;
- использованием витой пары для подключения измерительных преобразователей и модулей ввода/вывода.
- появлением недорогих и совершенных сетей, подобных Ethernet, Arcnet;
- появлением недорогих промышленных сетей FIP, CAN, Profibus и других;
- появлением универсального программного обеспечения SCADA для персональных компьютеров, выполняющего функции человеко-машинного интерфейса;
- появлением комбинированного ПО для визуализации и программирования PLC;
- появлением надежной, широко распространенной операционной системы Windows NT;
- появлением типовых решений при производстве аппаратных средств, в частности, магистрально - модульной архитектуры плат контроллеров по стандартам ISA, PCI, VME.

Классифицировать контроллеры можно по различным признакам. Вот одна из классификаций (по назначению):

- общепромышленные контроллеры;
- встраиваемые контроллеры;
- противоаварийные контроллеры (резервированные, высоконадежные);
- телемеханические контроллеры, передающие сигналы на большие расстояния (десятки и сотни км).

Обзор различных семейств контроллеров многих производителей показал, что в первом приближении в качестве характеристик контроллеров можно выделить пять обобщенных показателей:

- характеристика процессора;
- характеристика каналов ввода/вывода, поддерживаемых контроллерами;
- коммуникационные возможности;
- эксплуатационные характеристики;
- программное обеспечение.

Рассмотрим эти показатели.

1.2.3.1 Характеристики процессора.

Здесь имеется в виду:

- наличие и объем различных видов памяти: ОЗУ, ПЗУ, ППЗУ, EPROM, EEPROM, Flash;
- тип и разрядность основной процессорной платы;
- рабочая частота;
- поддержка математики с плавающей запятой, позволяющая выполнять эффективную обработку данных;
- наличие функции ПИД-регулирования.

Память.

ОЗУ (оперативное запоминающее устройство) или RAM (random access memory - память с произвольным доступом) представляет собой тип памяти, которая позволяет чтение и запись в любую ячейку без предварительного поиска. В контроллерах этот тип памяти используется для хранения программ и значений технологических параметров (данных).

ПЗУ (постоянное запоминающее устройство) или ROM (Read Only Memory - память только для чтения) устроена в виде адресуемого массива

ячеек (матрицы), каждая ячейка которого может кодировать единицу информации. Данные на ROM записывались при ее изготовлении путём нанесения на матрице алюминиевых соединительных дорожек литографическим способом. Наличие или отсутствие в соответствующем месте такой дорожки кодировало "0" или "1".

В контроллерах память типа ПЗУ используется для хранения программ пользователя. Данный тип памяти не получил широкого распространения в связи с тем, что современное программное обеспечение зачастую имеет много недоработок и часто требует обновления, в то время как производственный цикл изготовления памяти достаточно длителен (4-8 недель).

EPROM (СППЗУ), EEPROM (ЭСППЗУ) и Flash (флэш) относятся к классу **энергонезависимой перезаписываемой памяти** (английский эквивалент - **nonvolatile read-write memory** или **NVRWM**).

В EPROM перед записью необходимо произвести стирание (для получения возможности перезаписывать содержимое памяти). Стирание ячеек EPROM выполняется сразу для всей микросхемы посредством облучения чипа ультрафиолетовыми или рентгеновскими лучами в течение нескольких минут.

В EPROM стирание приводит все биты стираемой области в одно состояние (обычно во все единицы, реже - во все нули). Запись на EPROM осуществляется на программаторах.

Большим достоинством такой памяти является возможность перезаписывать содержимое микросхемы.

Недостатки:

- небольшое количество циклов перезаписи;
- высокая вероятность "недотереть", что в конечном итоге приведет к сбоям, или передержать микросхему под ультрафиолетовым светом, что может уменьшить срок службы микросхемы и даже привести к её полной негодности.

Главной отличительной особенностью **EEPROM** (в т. ч. и Flash) от ранее рассмотренных типов энергонезависимой памяти является возможность перепрограммирования при подключении к стандартной системной шине микропроцессорного устройства. В EEPROM появилась возможность производить стирание отдельной ячейки при помощи электрического тока. Для EEPROM стирание каждой ячейки выполняется автоматически при записи

в нее новой информации, т.е. можно изменить данные в любой ячейке, не затрагивая остальные. Процедура стирания обычно существенно длительнее процедуры записи.

Преимущества EEPROM по сравнению с EPROM: увеличенный ресурс работы, проще в обращении; недостаток - высокая стоимость. В контроллерах этот тип памяти используется как для хранения программ, так и для хранения данных.

Flash (полное название - **Flash Erase EEPROM**) впервые была разработана компанией Toshiba в 1984 году, и уже на следующий год было начато производство 256 Кбит микросхем flash-памяти в промышленных масштабах.

Технологически флэш-память родственна как EPROM, так и EEPROM. Основное отличие флэш-памяти от EEPROM заключается в том, что стирание содержимого ячеек выполняется либо для всей микросхемы, либо для определённого блока (кластера, кадра или страницы).

Следует заметить, что существуют микросхемы, позволяющие работать с блоками разных размеров (для оптимизации быстродействия). Стирать можно как блок, так и содержимое всей микросхемы сразу. Таким образом, в общем случае, для того, чтобы изменить один байт, сначала в буфер считывается весь блок, где содержится подлежащий изменению байт, стирается содержимое блока, изменяется значение байта в буфере, после чего производится запись измененного в буфере блока. Такая схема существенно снижает скорость записи небольших объёмов данных в произвольные области памяти, однако, значительно увеличивает быстродействие при последовательной записи данных большими порциями.

Преимущества флэш-памяти по сравнению с EEPROM:

- более высокая скорость записи при последовательном доступе за счёт того, что стирание информации во флэш производится блоками;
- себестоимость производства флэш-памяти ниже за счёт более простой организации.

Недостаток - медленная запись в произвольные участки памяти.

Ниже приведены три таблицы с характеристиками процессоров различных контроллеров. Очевидно, области их применения совершенно различны.

Характеристика процессора DL05 (Direct Logic)

Процессор	DL05
Общий объем памяти (слов)	6К
Объем памяти программ (слов)	2048
Объем памяти переменных (слов)	4096 (128 - э/н*)
ПИД-регулирование	Нет
Время выполнения логической операции	2.0 мкс
Время сканирования (программы в 1К)	2.7-3.2 мс

э/н* - энергонезависимая

Характеристика процессоров Simatic S7-400 (Siemens)

CPU	412-1 / 2	414-2 / 3 /4H	416-2 / 3	417-4 / 4H
1	48+48/ 72+72 Кб	128/384/+384 Кб	0.8+0.8/1.6+1.6 Мб	2+2 / 2+2 Мб
2.1	256 / 256 Кб	256 / 256 Кб	256 / 256 Кб	256 / 256 Кб
2.2	64 / 64 Мб	64 / 64 Мб	64 / 64 Мб	64 / 64 Мб
2.3	64 / 64 Мб	64 / 64 Мб	64 / 64 Мб	64 / 64 Мб
3	0.2 мкс	0.1 мкс	0.08 мкс	0.1 мкс
4	0.6 мкс	0.6 мкс	0.48 мкс	0.6 мкс
5	32768	65536	131072/131072	131072 / 131072
6	2048 / 2048	4096 / 4096	8192 / 8192	8192 / 8192

1. Объем встроенного ОЗУ (для программ + для данных).
- 2.1. Объем загружаемой встроенной памяти.
- 2.2. Карта Flash EEPROM.
- 2.3. Карта ОЗУ.
3. Время выполнения логической операции (мкс).
4. Время выполнения операции с плавающей запятой (мкс).
5. Адресное пространство дискретных в/в.
6. Адресное пространство аналоговых в/в.

Процессорные модули Power PC (Motorola) формата VME 6U

Процессорные модули	MVME2300	MVME2400	MVME2100
Микропроцессор	MPC603/604	MPC750	MPC8240
Частота, МГц	200/300	233/500	200/250
SDRAM, Мб	16/32/64/128	32/64/128/256	32/64
Flash, Мб	5	9	5/9

Сравнительная характеристика процессоров

Контроллер	Процессор	Частота, МГц
RTU 3310	Intel 186 XL	24
RTU 3330/3335	Intel 386 EX	20
Fanuc 90 – 70	Intel 386	16
	Intel 386 DX	32
MOSCAD-L	68LC302	16,6
SMART	MC68302	20
IUC	MPC860T	80
VME	Pentium,	450
	Celeron	500
Quantum	Intel 486 DX	80
	Intel 586 DX	133
TREI	Intel 486 DX4	75
	Pentium	100

1.2.3.2. Характеристика каналов ввода/вывода контроллеров

Параметры контроллера с точки зрения поддерживаемых им каналов ввода/вывода часто могут быть определяющими при выборе. Важно не только **количество каналов** ввода/вывода, поддерживаемое контроллером, но и разнообразие модулей ввода/вывода по **количеству** и **уровням коммутируемых сигналов** (ток/напряжение), **способы подключения** внешних цепей к модулям ввода/вывода, количество каналов **локального, удаленного** и **распределенного** ввода/вывода.

Рассмотрим поподробнее эти характеристики.

Количество поддерживаемых контроллером (процессором) каналов ввода/вывода (аналоговых, дискретных, скоростных).

Большинство фирм-производителей поставляют на рынок средств и систем автоматизации семейства контроллеров, каждое из которых рассчитано на определенный набор выполняемых функций и объем обрабатываемой информации. Среди них имеются семейства самых малых контроллеров (микро) небольшой вычислительной мощности, способных поддерживать максимум несколько десятков вводов/выводов, в основном, дискретных. Область применения таких контроллеров - сбор данных и системы противоаварийной защиты. В качестве примеров можно привести контроллеры семейства **MicroLogix** (Allen-Bradley), **Direct Logic DL05** (Kooyo), **Nano** (Schneider Electric).

Семейства малых контроллеров уже способны поддерживать сотни вводов/выводов, выполнять более сложные функции. Эти контроллеры имеют достаточно развитый аналоговый ввод/вывод, выполняют операции с плавающей точкой и функции ПИД-регулирования. К этой группе контроллеров можно отнести **SLC 500** (Allen-Bradley), **Direct Logic DL205** (Kooyo), **Smart** – (PEP Modular Computer), **Simatic S7-200** (Siemens).

Контроллеры средней мощности, обладая достаточной памятью и быстродействием, могут обрабатывать уже тысячи переменных дискретного, аналогового и скоростного типа. Это контроллеры **Fanuc 90-30** (GE Fanuc), **PLC-5** (Allen-Bradley), **Premium** (Schneider Electric), **Direct Logic DL405** (Kooyo) и другие.

Наконец, некоторые крупные фирмы производят класс контроллеров очень высокой вычислительной мощности, обладающих памятью, измеряемой мегабайтами и десятками мегабайт. Их способность обрабатывать десятки тысяч переменных и предопределила их область применения - в качестве концентраторов информации, получаемой от локальных контроллеров. Вычислительные возможности этого класса контроллеров позволяют реализовывать сложные алгоритмы (адаптивное, оптимальное управление), применяемые при автоматизации непрерывных технологических процессов. Наиболее яркими представителями этой группы контроллеров являются **ControlLogix** (Allen-Bradley), **Simatic S7-400** (Siemens), **Fanuc 90-70** (GE Fanuc), **VME** (PEP Modular Computers).

Сравнительная характеристика контроллеров по вводу/выводу

Контроллер	Общее	Дискретные	Аналоговые
MicroLogix1000	32	32	5 (1)
MOSCAD-M	24	19 (14/5)	5 (1)
TeleSAFE Micro16	512	256/256	128/64
Direct Logic DL-405	3584	3584	512
Quantum	31744	31744	1736/868
ControlLogix	128000	128000	4000
Simatic S7-400	131072	131072	8192

Разнообразие коммутируемых сигналов.

Как зарубежные, так и отечественные производители контроллеров комплектуют свои изделия широкой гаммой модулей дискретного и аналогового ввода/вывода. По количеству подключаемых сигналов различают модули на 4, 8, 16, 32 и 64 канала. Такое разнообразие модулей облегчает подбор требуемой конфигурации контроллера, позволяя минимизировать стоимость технических средств.

Коммутируемые модулями дискретного ввода/вывода сигналы могут иметь различный уровень напряжения переменного и постоянного тока. Это и 12, 24, 48 В постоянного тока, 120 и 240 В переменного тока с различными нагрузками по току.

Уровни коммутируемых сигналов модулями аналогового ввода/вывода могут быть самыми разнообразными. Это 0-5В, 0-10В, $\pm 5В$, $\pm 10В$ по

напряжению и 0-20мА, 4-20мА по току. Есть и специальные модули для ввода в контроллеры сигналов от термопар и термометров сопротивления различных градуировок. Приведенные здесь данные по уровням сигналов, безусловно, не исчерпывают всего разнообразия, представленного на рынке.

Различаются модули ввода/вывода и по способу подключения внешних цепей. К одним модулям внешние цепи подключаются с помощью клемм с винтовыми зажимами. Возможно также подключение внешних цепей через съемные терминальные блоки или фронтальные соединители, что позволяет производить замену модулей без демонтажа внешних цепей. Некоторые производители ПТК предлагают системы ввода/вывода, в которых внешние низковольтные цепи подключаются посредством пружинных зажимов.

На лицевой панели модулей ввода/вывода могут быть расположены светодиоды индикации состояния внешних цепей.

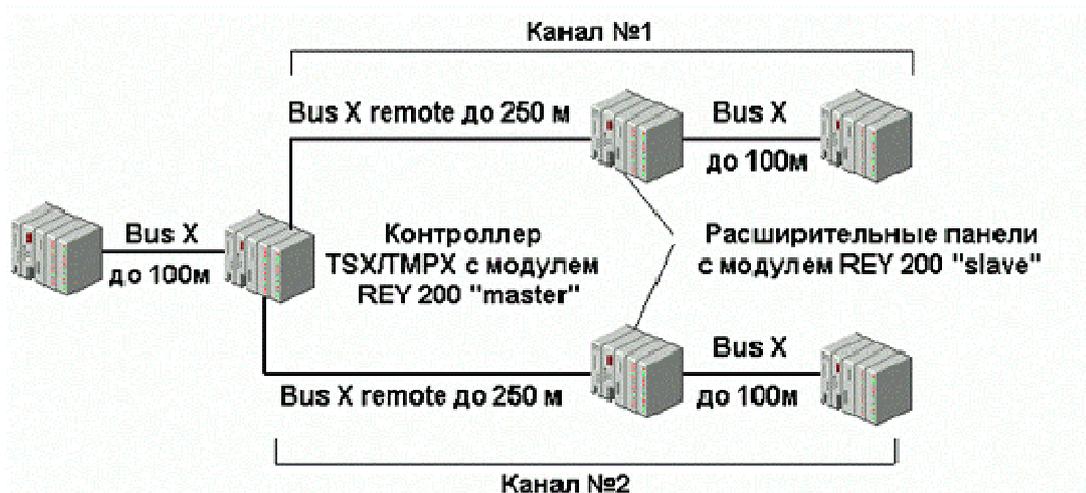
Одной из важнейших характеристик контроллеров является их способность поддерживать локальный, расширенный, удаленный и распределенный ввод/вывод.

Под **локальным** следует понимать такой ввод/вывод, когда модули ввода/вывода размещаются непосредственно на том же шасси, на котором размещен и модуль центрального процессора. Так как количество слотов в шасси ограничено (максимум 16 - 18 для некоторых контроллеров), то и количество локальных вводов/выводов может быть также ограничено. Преимущество локальных вводов/выводов заключается в том, что они имеют высокую скорость обновления данных. При всех прочих равных условиях, скорость обработки этих вводов/выводов очень высока. Эта характеристика особенно важна, когда речь идет о регулировании технологических параметров.

Для поддержки большего числа переменных фирмы-производители аппаратных средств снабдили свои системы возможностью расширения локального ввода/вывода. Эти **шасси расширения** с размещенными в них модулями ввода/вывода соединяются между собой специализированным коротким кабелем и могут быть отнесены максимум на несколько десятков метров от центрального процессора. Некоторые комплексы контроллеров способны поддерживать одно/два шасси расширения, другие - десятки шасси с очень большим количеством модулей ввода/вывода.

Например, многие контроллеры компании Schneider Electric (семейство Premium) имеют большие возможности по расширенному вводу/выводу. Они

допускают использование до 8 расширительных панелей на 12 слотов каждая (до 96 слотов), из которых 87 слотов – для модулей ввода/вывода, или до 16 расширительных панелей на 4, 6, 8 слотов (до 128 слотов). В такой конфигурации под модули ввода/вывода используется 111 слотов.



Максимальная емкость расширения:
TSX/TMPX - 102 - 2 панели на 12 слотов или 4 панели на 4/6/8 слотов
Другие модели TSX/TMPX - 8 панелей на 12 слотов или 16 панелей на 4/6/8 слотов

Рисунок 1.6 – Организация расширенного ввода/вывода в контроллерах Premium.

В семействе Premium (рис. 1.6) расширительные панели могут быть размещены на расстоянии не более 100м от базовой панели. При использовании модуля **Bus X remote** (TSX REY 200 «Master», устанавливаемый в базовой панели) это расстояние может достигать 250м (модуль поддерживает два канала расширения - имеет два порта). В этом случае в первую расширительную панель каждого канала должен быть установлен модуль TSX REY 200 «Slave».

Сравнительная характеристика контроллеров по возможностям расширения ввода/вывода:

- Simatic S7 - 400 - до 21 стойки расширения;
- Premium - до 16 стоек (до 128 слотов);
- DL - 405 - до 3 стоек расширения;
- SLC 500 - 1+2 (3 стойки - 30 модулей);
- Quantum - 1 стойка на 16 слотов (локальный ввод/вывод), без расширения (14 x 32 = 448 DI/DO).

Удаленный ввод/вывод применяется для систем, в которых имеется большое количество датчиков и других полевых устройств, находящихся на

достаточно большом расстоянии (1000 и более метров) от центрального процессора. Это относится и к объектам находящимся на больших расстояниях от пунктов управления. Такой подход позволяет уменьшить стоимость линий связи за счет того, что модули ввода/вывода размещаются вблизи полевых устройств.

Каналы удаленного ввода/вывода обновляются асинхронно по отношению к сканированию процессора. Поэтому из числа задач, использующих удаленный ввод/вывод, решены могут быть только те, которые не требуют обновления ввода/вывода на каждом шаге.

Фирмы-производители аппаратных средств автоматизации решают проблему удаленного ввода/вывода по-разному.

Часто поддержка удаленных вводов/выводов осуществляется посредством модулей, называемых «удаленный ведущий» и «удаленный ведомый». Ведущий модуль располагается в локальном каркасе контроллера и соединяется кабелем с «удаленным ведомым», который находится в удаленном каркасе (контроллеры DL205, DL405 фирмы Коуо, контроллер Quantum компании Schneider Electric).

Один ведущий модуль может поддерживать 32, 64, 125 ведомых. В свою очередь, различные процессоры, могут поддерживать несколько ведущих модулей. Таким образом, системы управления, построенные по технологии удаленного ввода/вывода, способны обрабатывать многие тысячи параметров.

Для конфигурирования удаленного ввода/вывода контроллера Quantum предусмотрены соответствующие модули:

- модуль головного канала RIO;
- модуль подканала RIO.

Модуль головного канала RIO устанавливается в ту же монтажную панель, что и модуль центрального процессора, управляющий системой ввода/вывода. Он используется для двунаправленной передачи данных между центральным процессором и модулями подканалов RIO, установленных на удаленных панелях. Для подключения в сеть модуля головного RIO и одного или более модулей подканалов RIO (до 31) используется коаксиальный кабель. Скорость передачи данных по сети RIO - 1.5 Мбит/с, протяженность сети - до 5250 м (рис. 1.7).

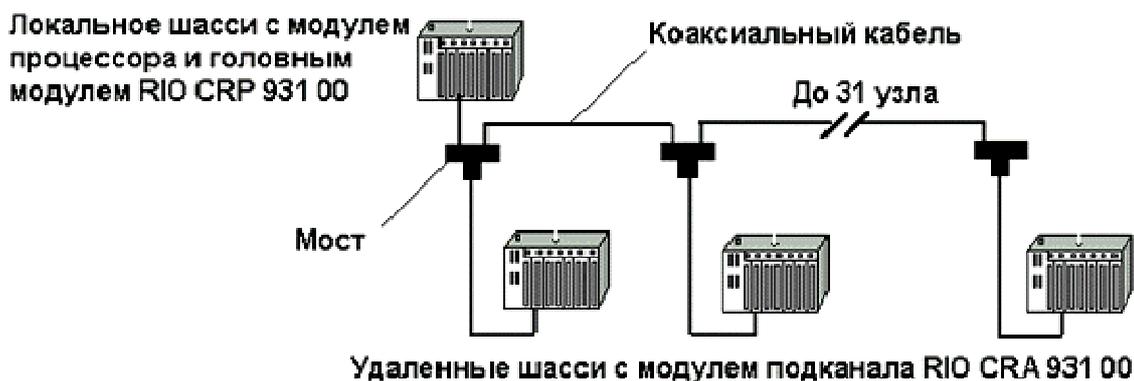


Рисунок 1.7 – Организация удаленного ввода/вывода в контроллерах Quantum.

В системе имеются модули удаленного ввода/вывода (RIO) с одинарным и двояным каналом:

- модули головного канала: одинарный 140 CRP 931 00, двоянный 140 CRP 932 00;
- модули подканала RIO: одинарный 140 CRA 931 00, двоянный 140 CRA 932 00.

Соединение удаленных каркасов (с модулями «D4-RS-ведомый») с локальным каркасом процессора D4-450 фирмы Коуо осуществляется через порт процессора или посредством модуля «D4-RM-ведущий» (рис.1.8). Каждый модуль D2-RM поддерживает один канал удаленных вводов/выводов (до 7 каркасов). Все контроллеры DL405 поддерживают два модуля D2-RM (процессор D4-450 плюс к этому имеет порт, поддерживающий удаленный ввод/вывод). Расстояние удаленных каркасов от контроллера достигает 1000м (экранированный кабель «витая пара») при скорости обмена 38,4 Кбод.

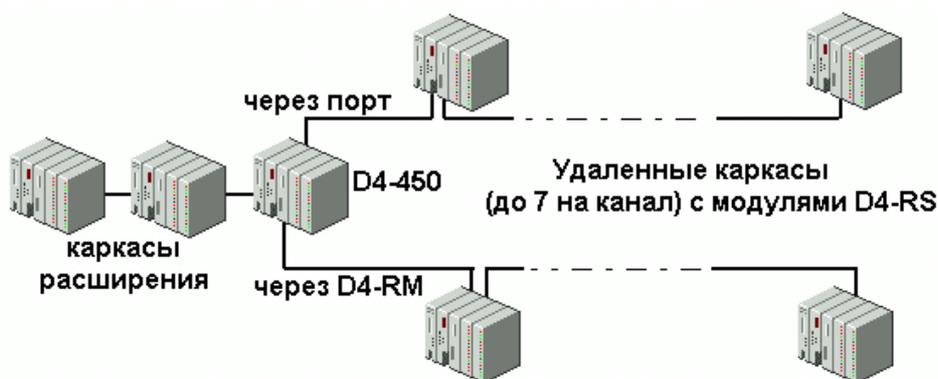
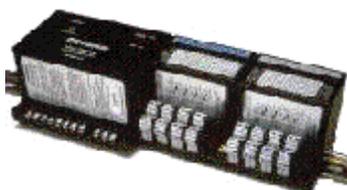


Рисунок 1.8 – Организация удаленного ввода/вывода в контроллерах DL405

Таким образом, организация удаленного ввода/вывода обеспечивается либо встроенным в процессор портом, играющим роль «мастера», либо специальными модулями, поддерживающими каркасы удаленного ввода/вывода.

Распределенный ввод/вывод является разновидностью удаленного, с той лишь разницей, что количество параметров, которое требуется «достать», мало (от нескольких параметров до десятков). Поэтому решение с применением каркасов удаленного ввода/вывода, рассчитанных на достаточно большое количество параметров, может оказаться дорогим. В связи с этим некоторые фирмы предлагают специализированные решения (система **Field Control** фирмы GE Fanuc, система ввода/вывода **FLEX I/O** фирмы Allen-Bradley). Одно из решений распределенного ввода/вывода - применение интеллектуальных устройств, объединенных полевой шиной.



Field Control (GE Fanuc) имеет модульную конструкцию и состоит из блока интерфейса шины (Bus Interface Unit – BIU), блока полевых контактных устройств (шасси ввода/вывода) и полевых модулей ввода/вывода. В состав BIU входит интерфейс для соединения с такими полевыми хост-шинами, как шина Genius и FIP. Универсальные блоки полевых контактных устройств, которые могут устанавливаться на DIN-рейке или на панели, имеются в различных конфигурациях (по применению). Один блок интерфейса шины может поддерживать до 8 модулей ввода/вывода, обеспечивая в сумме 128 точек.

1.2.3.3. Коммуникационные возможности контроллеров

К параметрам контроллеров, характеризующим их способность взаимодействовать с другими устройствами системы управления, относятся:

- количество и разнообразие портов в процессорных модулях;
- широта набора интерфейсных модулей и интерфейсных процессоров;
- поддерживаемые протоколы;
- скорость обмена данными и протяженность каналов связи.

Сетевая архитектура системы управления

Как показано на рисунке 1.9, система управления технологическим процессом представляет собой многоуровневую структуру.

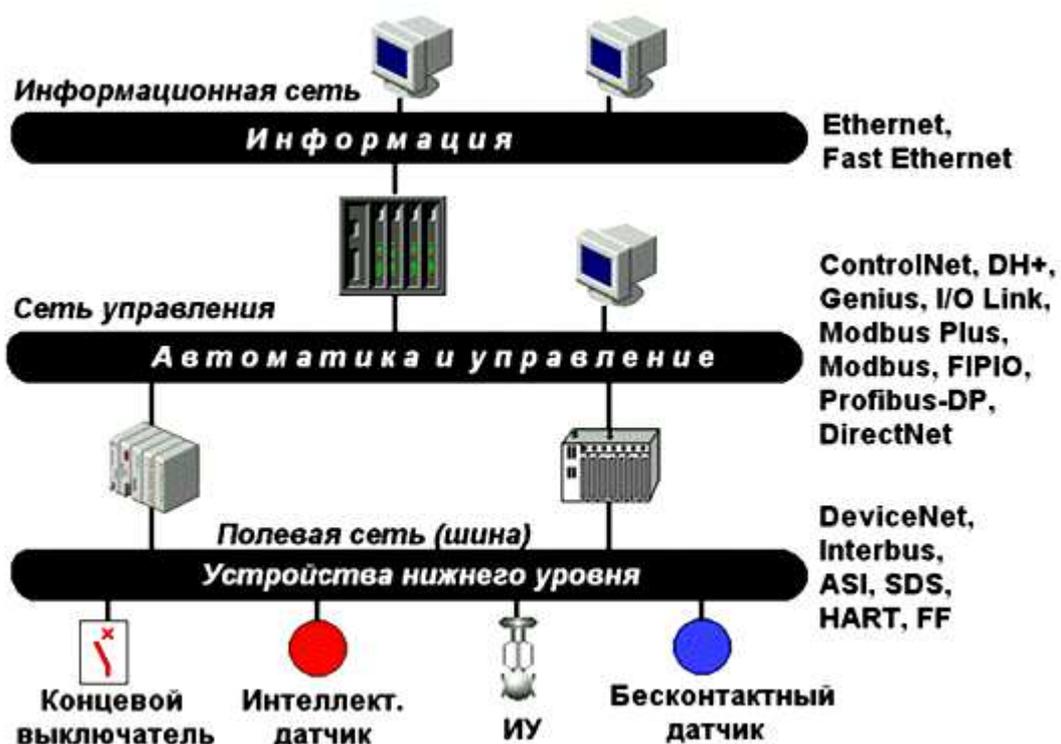


Рисунок 1.9 – Сетевая архитектура системы управления

Устройства верхнего уровня (компьютеры, концентраторы) на своем уровне обмениваются большими объемами информации. Эта информация защищена механизмами подтверждений и повторов на уровне протоколов взаимодействия. Пересылаемый массив данных может быть доступен не только центральному устройству, но и другим узлам сети этого уровня. Это означает, что сеть является **равноправной (одноранговой)**, т. е. определяется моделью взаимодействия peer-to-peer (равный с равным). Время доставки информации не является доминирующим требованием к этой сети (речь идет о жестком реальном времени).

Сети, обеспечивающие информационный обмен на этом уровне, называют информационными сетями. Наиболее ярким представителем сетей этого уровня является Ethernet с протоколом TCP/IP.

Сети, обеспечивающие информационные обмен между контроллерами, датчиками и исполнительными устройствами, часто объединяются под общим названием «**промышленные сети**» (Fieldbus дословно переводится как «полевая сеть»).

Их можно разделить на два уровня:

- **управляющие** промышленные сети, решающие задачи сбора и обработки данных на уровне промышленных контроллеров, управления технологическим процессом;

- **полевые** сети или шины, задачи которых сводятся к опросу датчиков и управлению работой разнообразных исполнительных устройств.

На сегодняшний день спектр протоколов для обоих этих классов промышленных сетей (управляющие и полевые) довольно широк. CAN, FIP, Profibus, ControlNet, DH+, Modbus, Modbus plus, Genius, DirectNet, DeviceNet, Interbus, SDS, ASI, HART, FF и еще несколько десятков протоколов присутствуют сегодня на рынке промышленных сетей. Каждая из сетей имеет свои особенности и области применения.

1.2.4. Промышленные сети

Для организации эффективного управления производственным процессом все его этапы должны быть связаны информационными сетями. Сети, обеспечивающие информационные потоки между датчиками, контроллерами и разнообразными исполнительными механизмами, объединяются общим названием «промышленные сети» (FieldBus, полевая шина).

Fieldbus - это, во-первых, некий физический способ объединения устройств (например, RS485) и, во-вторых, программно-логический протокол их взаимодействия.

Сейчас на рынке присутствует около 50 Fieldbus-систем.

Системы, являющиеся продуктом только одного производителя, работающие по уникальным протоколам, носят название «закрытых систем» (closed / proprietary systems). Такие системы не обеспечивают совместимость приборов от разных производителей.

Требованиям современной организации производства соответствуют «открытые системы» (open systems), которые приведены в соответствие специфичным требованиям всех производителей. Только на основе открытых систем может быть решена задача интеграции изделий разных производителей в одну сеть.

Если некоторая fieldbus-технология относится к открытым системам, то она должна обладать следующим рядом принципиальных качеств:

- **включаемостью** (interconnectivity), то есть возможностью свободного физического включения в общую сеть устройств от различных производителей;
- **взаимодействием** (interoperability), то есть возможностью построения работоспособной сети на основе включения компонентов от различных поставщиков;
- **взаимозаменяемостью** (inter-changeability) - возможностью замены компонентов аналогичными устройствами от других производителей.

Fieldbus - это основополагающий термин, определяющий некоторую цифровую сеть, призванную заменить широко использовавшуюся ранее централизованную аналоговую 4-20 мА-технология. Такая сеть является цифровой, двунаправленной, многоточечной, последовательной коммуникационной сетью, используемой для связи изолированных друг от друга (по функциям) таких устройств, как контроллеры, датчики, силовые приводы и т. п. Каждое field-устройство обладает самостоятельным вычислительным ресурсом, позволяющим относить его к разряду интеллектуальных (smart fieldbus device). Каждое такое устройство способно самостоятельно выполнять ряд функций по самодиагностике, контролю и обслуживанию функций двунаправленной связи. Доступ к нему возможен не только со стороны инженерной станции, но и со стороны аналогичных ему устройств.

Каждое устройство может выполнять функции управления, обслуживания и диагностики. В частности, оно может сообщать о возникающих ошибках и обеспечивать функции самонастройки. Это существенно увеличивает эффективность системы в целом и снижает затраты по ее сопровождению.

В зависимости от области применения весь спектр промышленных сетей можно разделить на два уровня:

1) Field Level - промышленные сети этого уровня решают задачи по управлению производством, сбором и обработкой данных на уровне промышленных контроллеров;

2) Sensor / actuator Level - задачи сетей этого уровня сводятся к опросу датчиков и управлению работой исполнительных механизмов.

Исторически все промышленные сети являются продуктом эволюции порта RS-232, который предназначался для подключения на двухпроводном шнуре одного периферийного устройства к персональной ЭВМ. Его

применение ограничивалось дальностью передачи 15 м, которое удалось снять путем применения токовых петель и низковольтных дифференциальных протоколов RS-422. RS-422 обеспечил полнодуплексный режим (попеременная передача данных в обоих направлениях). Однако связь приемников (10 адресов) обеспечивалась одним передатчиком.

Следующим шагом стало создание серийного протокола RS-485, предполагающего многоточечное подключение (32 адреса). Работая с COM-портом и витой парой, можно выбирать любое из подключенных устройств. Применяя репитеры, можно увеличить количество адресуемых устройств.

Скорость передачи по линии заметно падает на максимальных расстояниях (1300 м - до 90 Кбод, 200 м - 500 Кбод). В настоящее время RS-485 в чистом виде применяется для создания сетей сбора данных и общения с устройствами, для которых не существенны временные параметры (инертные процессы и низкоскоростные устройства).

Таблица 1.1 - Характеристики стандартных физических интерфейсов

Характеристика	RS-232C	ИРПС	RS-422	RS-485
Вид передачи	синхр./асинхр.	асинхр.	синхр./асинхр.	синхр./асинхр.
Среда передачи	витая пара	четыре проводника проводная связь	2 инф. линии, 1 линия заземл.	витая пара/две витые пары
Помехочувствительность	свойственная двухпроводной передаче		уровень синфазных помех в канале до 3 В	
Способ кодирования	12 В	40 мА и 20 мА	12В	
Макс. число приемников / передатчиков на линии	1/1		1/10	32/32
Макс. длина линии (без повторителей), м	15	500	1300	
Макс. скорость передачи, Кбод	38,4	6,6	90	90...500

Ограниченные скоростные возможности стандартного COM-порта (115 Кбод) привели к появлению новой сетевой идеологии нижнего уровня. В основе физического слоя (physical layer) практически всех полевых шин лежит протокол RS-485 как электрическое содержание среды передачи, различие состоит в своде правил движения информации.

Для дискретных производств больше подходят асинхронные протоколы обмена. Но здесь возникает вопрос о времени отклика устройства и режиме реального времени. Еще необходимо учесть приоритетность запросов от устройств.

Для (циклических) непрерывных производств более приемлемыми оказываются синхронные способы передачи. Обновление информации в контроллере осуществляется за фиксированный промежуток времени для самого удаленного узла. Этот режим позволяет работать на больших скоростях, но на ограниченных расстояниях. Синхронизация обеспечивается специальным MASTER-узлом с использованием еще одной дифференциальной пары проводов.

MASTER-узел - это логический центр любой топологии. Ведомый узел (SLAVE) может активизировать среду передачи только по запросу ведущего узла (MASTER). Данный принцип является наиболее распространенной на контроллерном (Field Level) и датчиковом (Sensor/actuator Level) уровнях.

Помимо принципа доступа MASTER/SLAVE в некоторых сетях реализован метод CSMA/CD. Здесь каждый блок данных содержит дополнительный идентификатор, который является приоритетом данного сообщения. Каждый узел-приемник выбирает предназначенные для него сообщения.

Если вернуться к вопросу о выборе того или иного протокола связи, то здесь однозначного ответа дать нельзя. Выбор должен основываться на специфике следующих признаков:

- непрерывность и дискретность процесса;
- требование работы в реальном времени (PB);
- разбросанность или сосредоточенность контролируемых точек;
- малая (до 2-3 десятков) или большая (до нескольких сот) информационная плотность;
- степень электрической и(или) электромагнитной зашумленности;
- стоимость варианта.

Наиболее распространенными Fieldbus-шинами являются: CAN, LON, PROFIBUS, Interbus, WorldFIP, HART, ASI, ControlNet и др. Характеристики некоторых из них сведены в таблице 1.1. Сравнительная характеристика промышленных сетей приведена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Возможные области применения FieldBus

Протокол	Непрерывное пр-во	Дискретное пр-во	Возможность работы в РВ	Дальность до 3 км	Дальность свыше 3 км	К-во уст-в менее 33	К-во уст-в более 33	Работа в зашумл. зонах
BITBUS	+		+	+		+	+	
WorldFIP	+	+	+	+			+	
CANBUS		+		+		+		+
LonWorks		+	+	+			+	
HART		+		+		+		
ASI		+	+	+			+	+
PROFIBUS-								
FMS	+	+		+	+		+	
OP	+	+	+	+	+		+	
PA	+	+		+	+		+	+
INTERBUS-S	+				+		+	

При выборе коммуникационной технологии можно руководствоваться количественными параметрами (объем передаваемых полезных данных, максимальная длина шины, допустимое число узлов на шине, помехозащищенность и др.), ценовым критерием (затраты в расчете на один узел), популярностью, эффективностью решения задачи, простотой конфигурирования и т. д. При этом улучшение одного параметра может привести к ухудшению другого.

1.2.4.1. Полевые шины

В последние годы проявилась тенденция применения в системах управления технологий **сквозного сетевого доступа**: от мощных супервизорных компьютеров и многофункциональных контроллеров до интеллектуальных полевых устройств (датчики, исполнительные устройства и т. п.). При этом такая связь должна удовлетворять всем современным требованиям по функциональности, надежности и открытости. Рассмотренные ниже полевые шины предназначены для непосредственного взаимодействия с устройствами полевого уровня.

Полевые шины (шины уровня датчиков и исполнительных устройств) должны удовлетворять двум требованиям. Во-первых, необходимо передавать

данные в соответствии с жестким временным регламентом. Во-вторых, объем данных должен быть минимальным, чтобы обеспечить работоспособность сети в критические по нагрузкам моменты. Сеть уровня датчиков обеспечивает непосредственный интерфейс между реальным технологическим процессом и промышленными контроллерами.

Передаваемую в такой сети информацию можно разделить на два основных типа: **данные о процессе** и **параметрические данные**. Оба типа данных принципиально различны и предъявляют к коммуникационной системе разные требования.

Данные о процессе (изменение состояния кранов, переключателей, управляющих сигналов и т. п.) не являются сложными и, как правило, определяются несколькими информационными битами. Объем такой информации имеет четкую тенденцию к сокращению. Совсем недавно эти данные для одного простого устройства занимали 8-16 бит. Но уже сейчас развитие технологии привело к тому, что с простейших датчиков (дискретного типа) приходит всего 1-2 бита информации.

Данные о процессе имеют явно выраженный циклический характер. Более того, для реализации задач автоматического управления необходимо, чтобы опрос каналов и выдача команд на управление проводились через регламентируемые интервалы времени. Это так называемое требование детерминированности коммуникационной системы. Благодаря небольшому объему передаваемых данных системы промышленной связи способны действительно удовлетворять временным требованиям со стороны реальных процессов.

Параметрические данные необходимы как для отображения текущего состояния сетевых устройств (интеллектуальных), так и их перепрограммирования. В противоположность данным о процессе параметрическая информация не имеет циклического характера. Доступ к ней реализуется по запросу, в ациклическом режиме. Передача параметрических данных требует и реализует методы специальной защиты, а также механизмов подтверждений. Комплексный параметрический блок для интеллектуальных устройств занимает от нескольких десятков байт до нескольких сотен килобайт. В сравнении с быстро меняющимися данными временные требования для передачи параметров можно считать не критичными. В зависимости от типа устройств и протяженности сети

требования по времени простираются от нескольких сотен миллисекунд до нескольких минут.

1.2.4.2. Протоколы полевых шин

SDS (Smart Distributed System) - система ввода/вывода с распределенной логикой, предложенная компанией Honeywell для построения сетей, объединяющих периферийные устройства различных производителей (рис. 1.10).

Эта сеть позволяет работать с такими устройствами ввода/вывода, как концевые выключатели, фотоэлектрические и бесконтактные датчики, позиционеры, и осуществлять обмен информацией на высоких скоростях.

Преимущества сети:

- одна и та же сеть для контроллеров и источников информации;
- питание осуществляется по проводам сетевого кабеля;
- диагностика на уровне физических устройств;
- время прохождения данных по сети может достигать 0,1 мс.

Характеристика сети.

Длина шины	Скорость	Длина ответвления	Число устройств
30.5 м	1 Мбит/с	0.9 м	32
121.9 м	500 Кбит/с	1.8 м	64
243.8 м	250 Кбит/с	3.7 м	64
487.7 м	125 Кбит/с	7.3 м	64



Рисунок 1.10 – Схема подключения периферийных устройств к модулю DL405

Периферийные устройства подключаются к мастер-модулю **SDS** обычным 4-х проводным кабелем (рис. 1.10). Таким образом, модуль **SDS** заменяет стандартные модули ввода/вывода, обеспечивая подключение 64 **дискретных** входов или выходов (распределенный ввод/вывод). В каркас

процессора **DL405** (Kooyo) можно устанавливать до 8 ведущих модулей **SDS** (до 512 адресатов на процессор).

Первые продукты, работающие по технологии ASI, вышли на рынок 1993 году. Сегодня эта технология поддерживается рядом известных фирм: Allen-Bradley, Siemens, Schneider Electric и др.

Основная задача этой сети – связать в единую информационную структуру устройства нижнего уровня автоматизируемого процесса (фотоэлектрические датчики, исполнительные устройства, реле, контакторы, емкостные переключатели, приводы, стартеры и т.п.) с системой контроллеров. Это подтверждается и названием сети - **ASI (Actuator Sensor Interface)**.

ASI-интерфейс позволяет через свои коммуникационные линии не только передавать данные, но и подводить питание (24 VDC) к датчикам и исполнительным устройствам. Здесь используется принцип последовательной передачи на базовой частоте. Информационный сигнал модулируется на питающую частоту.

К одному контроллеру можно подключить до 31 устройства. Протяженность сегмента ASI-шины может достигать 100м. За счет репитеров длину сети и число узлов можно увеличивать. Топологией ASI-сети может быть шина, звезда, кольцо или дерево с циклом опроса 31 узла 5 мс.

Основной кабель представляет собой плоский (не экранированный и не витая пара) двужильный кабель, использующийся одновременно для основного питания (24 VDC) датчиков и исполнительных механизмов и для последовательной передачи двоичной информации сбора данных с устройств, подключенных к шине.

Некоторые контроллеры поддерживают модули мастера шины ASI, которые управляют передачей данных между различными компонентами шины ASI и действует как точка подключения шины к управляющему (host) контроллеру.

Контроллер в такой сети играет роль мастера, а периферийные устройства - подчиненных. Максимальный объем данных с одного ASI-узла – 4 бита. На рисунке 1.11 контроллеры Micro (**Schneider Electric**) взаимодействуют с полевыми устройствами по шине ASI. Функции ведущего обеспечиваются интерфейсным модулем SAZ 10.

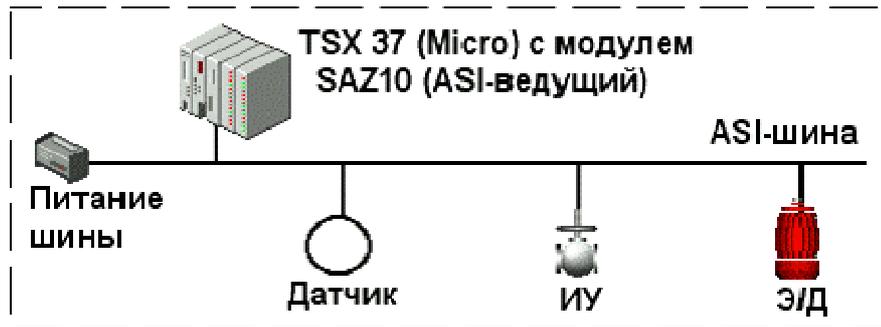


Рисунок 1.11 – Схема подключения периферийных устройств по шине ASI

1.2.4.3 HART- протокол

Очень перспективным технически и выгодным экономически является взаимодействие интеллектуальных приборов с контроллерами через цифровую полевую шину. Это исключает искажение низковольтных аналоговых сигналов в цепях связи контроллеров с датчиками, существенно уменьшает расходы на кабельную продукцию, позволяя к одной шине подключать несколько приборов. Такую возможность предоставляет HART-протокол.

Протокол HART (Highway Addressable Remote Transducer), разработанный фирмой Rosemount Inc. в середине 80-х годов, реализует известный стандарт BELL 202 FSK, основанный на технологии 4 – 20 мА.

Стандарт BELL 202 FSK - это кодировка сигнала методом частотного сдвига для обмена данными на скорости 1200 Бод. Сигнал накладывается на аналоговый измерительный сигнал 4—20 мА.

Схема взаимоотношений между узлами сети основана на принципе Master/Slave. В HART-сети может присутствовать до 2 Master-узлов (обычно один). Второй Master, как правило, освобожден от поддержания циклов передачи и используется для организации связи с какой-либо системой контроля/отображения данных. Стандартная топология – «звезда», но возможна и шинная организация. Для передачи данных по сети используются два режима:

- асинхронный: по схеме «Master-запрос/ Slave-ответ» (один цикл укладывается в 500 мс);
- синхронный: пассивные узлы непрерывно передают свои данные мастер-узлу (время обновления данных в мастер-узле - 250 - 300 мс).

Основные параметры HART-протокола:

- длина полевой шины – 1,5 км;

- скорость передачи данных – 1,2 Кб/с;
- число приборов на одной шине - до 16.

HART-протокол позволяет:

- проводить удаленную настройку датчиков на требуемый диапазон измерения через полевую шину;
- не подводить к датчикам отдельные линии электропитания и не иметь в них блоков питания (электропитание реализуется от блоков питания контроллеров через полевую шину);
- увеличить информационный поток между контроллером и приборами, при наличии самодиагностики в приборах передавать сообщения о неисправностях по полевой шине, а далее - оператору.

1.2.4.4. Fieldbus Foundation.

Fieldbus Foundation - некоммерческая организация (создана в 1994 году), которая объединяет более 120 ведущих мировых поставщиков и конечных пользователей систем управления технологическими процессами и автоматизации производства.

В 1996 году была разработана полевая шина, которая использует модификацию стандарта IEC1158-2 для физического уровня и концепцию PROFIBUS для прикладного уровня. Протокол Foundation Fieldbus (FF) представляет собой открытую, внедренную в промышленности технологию, которая дает пользователям возможность применять лучшие в настоящий момент полевые устройства различных поставщиков и не привязывает их к какому-то определенному производителю.

Fieldbus представляет собой локальную сеть (ЛВС), обладающую возможностью распределять управление по всей сети. Управление процессом включает в себя различные функции: конфигурирование, калибровку, мониторинг, диагностику, а также регистрацию событий, происходящих в различных узлах производственной системы.

В соответствии с многоуровневой моделью открытых систем (OSI) протокол полевой шины использует уровни 1, 2 и 7 (уровень физических устройств, уровень канала связи и спецификация формата сообщений).

Foundation Fieldbus имеет 2 физических уровня:

- физический уровень H1 FF (медленный), обеспечивающий рабочую скорость 31,25 Кбит/с;

- физический уровень H2 FF (быстрый), обеспечивающий рабочую скорость до 1 Мбит/с.

Наиболее распространенная топология полевой шины FF - шинная (рис.1.12) и древовидная.

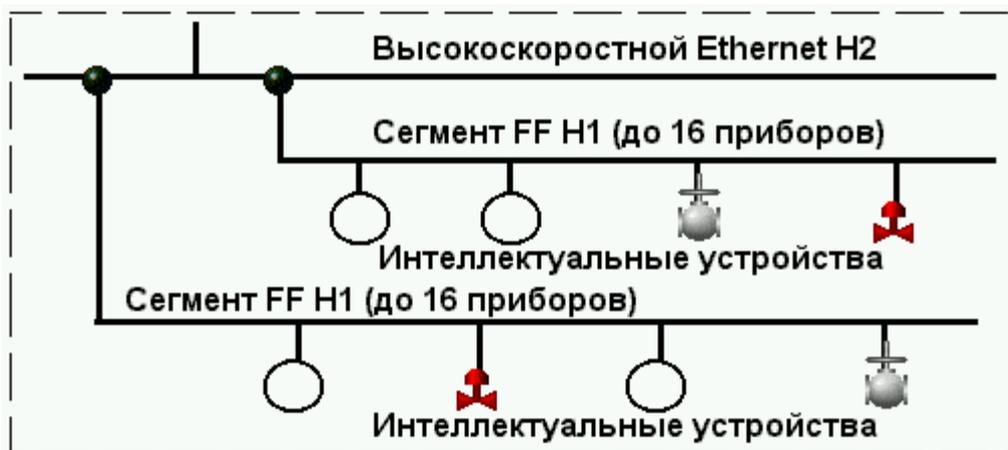


Рисунок 1.12 – Топология полевой шины Foundation Fieldbus

Основные преимущества:

- Снижение капитальных и проектных расходов:
 - уменьшение количества оборудования;
 - уменьшение количества кабелей;
 - ускорение пуско-наладки (автоматизированное конфигурирование датчиков с помощью ПО);
 - упрощение чертежей и уменьшение времени на их разработку;
 - ускорение разработки конфигурации;
 - упрощение монтажа.
- Повышение стабильности процесса.
- Увеличение времени непрерывной работы процесса.
- Снижение расходов на обслуживание и эксплуатацию.

1.2.4.5. Управляющие сети

Класс задач, решаемых этими сетями, сводится к автоматизации конкретных технологических процессов. Отсюда вытекают и соответствующие требования:

- скорость передачи, удовлетворяющая задачам реального времени;
- объем передаваемых данных;
- протяженность сети;
- допустимое количество узлов;

- помехозащищенность и т. п.

Протоколы управляющих сетей

Сегодняшняя ситуация на рынке промышленных управляющих сетей - это ControlNet, PROFIBUS, Modbus, Modbus Plus, DH+, DirectNet, FIPIO, Remote I/O и многие другие сети. Это сети уровня контроллеров и традиционного ввода/вывода (модульного). Каждая из них имеет свои особенности и области применения.

Протокол **MODBUS** можно назвать наиболее распространенным в мире. Для работы со своими устройствами его используют десятки фирм. Протокол привлекает простотой логики и независимостью от типа интерфейса (RS-232C, RS-422, RS-485 или же токовая петля 20 мА).

Протокол работает по принципу Master/Slave (ведущий-ведомый). Конфигурация на основе этого протокола предполагает наличие одного Master-узла и до 247 Slave-узлов. Только Master инициирует циклы обмена данными. Существует два типа запросов:

- запрос/ответ (адресуется только один из Slave-узлов);
- широковещательная передача (Master через выставление адреса 0 обращается ко всем остальным узлам сети одновременно).

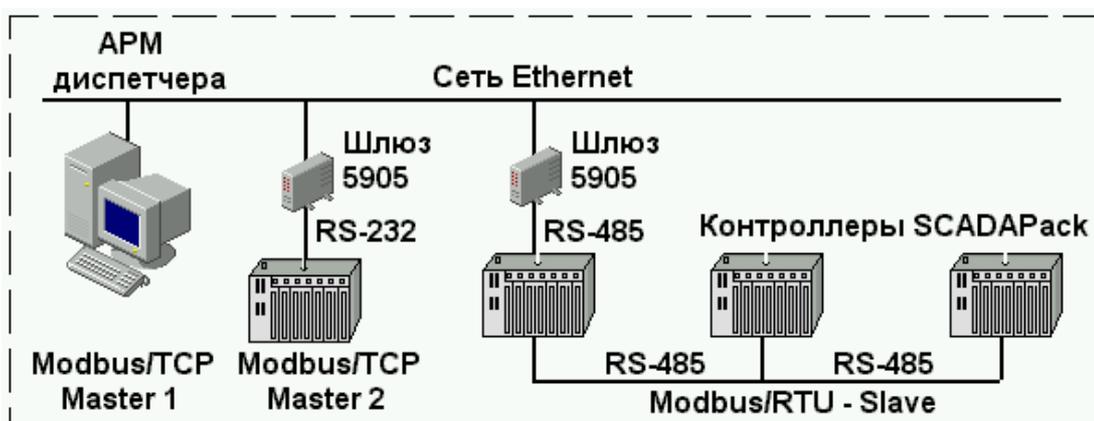


Рисунок 1.13 – Схема подключения контроллеров через интерфейс RS-485

На рисунке 1.13 приведен пример взаимодействия контроллеров SCADAPack/Slaves через интерфейс RS-485, используя стандартный протокол обмена Modbus. Для связи контроллеров SCADAPack с рабочей станцией через сеть Ethernet использован модуль/шлюз Ethernet 5905.

Протокол **PROFIBUS (PROcess FieLd BUS)** разработан в Германии. Стандарт протокола описывает уровни 1, 2 и 7 OSI-модели. В PROFIBUS используется гибридный метод доступа Master/Slave и децентрализованная

процедура передачи маркера. Сеть может состоять из 125 узлов (4 сегмента по 32 узла), из которых 32 могут быть Master-узлами. Адрес 0 зарезервирован для режима широкого вещания. В среде Master-узлов по возрастающим номерам узлов передается маркер, который предоставляет право ведения циклов чтения/записи на шине. Все циклы строго регламентированы по времени, организована продуманная система тайм-аутов. Протокол хорошо разрешает разнообразные коллизии на шине. Настройка всех основных временных параметров идет по сценарию пользователя. Рабочая скорость передачи может быть выбрана в диапазоне 9,6-12 000 Кбит/с.

При построении многоуровневых систем автоматизации часто возникают задачи организации информационного обмена между уровнями. В одном случае необходим обмен комплексными сообщениями на средних скоростях. В другом - быстрый обмен короткими сообщениями с использованием упрощенного протокола обмена (уровень датчиков). В третьем требуется работа в опасных участках производства (нефтегазовые технологии, химическое производство). Для всех этих случаев PROFIBUS имеет решение. Под общим названием понимается совокупность трех отдельных протоколов: PROFIBUS-FMS, PROFIBUS-DP и PROFIBUS-PA.

Протокол PROFIBUS-FMS появился первым и был предназначен для работы на так называемом цеховом уровне. Здесь требуется высокая степень функциональности, и этот критерий важнее критерия скорости. Основное его назначение - передача больших объемов данных.

В задачах управления, требующих реального времени, на первое место выдвигается такой параметр, как продолжительность цикла шины. Реализация протокола PROFIBUS-DP дает увеличение производительности шины (например, для передачи 512 бит данных, распределенных по 32 станциям, требуется всего 6 мс).

Протокол PROFIBUS-PA - это расширение DP-протокола в части технологии передачи, основанной не на RS-485, а на реализации стандарта IEC1158-2 для организации передачи во взрывоопасных средах. Он может использоваться в качестве замены старой аналоговой технологии 4-20мА. Для коммутации устройств нужна всего одна витая пара, которая может одновременно использоваться и для информационного обмена, и для подвода питания к устройствам полевого уровня.

Протокол PROFIBUS-DP поддерживается устройствами разных производителей. Для контроллеров компании Siemens этот протокол является

основным (рис. 1.14). Некоторые контроллеры семейств S7-300 и S7-400 имеют встроенный порт PROFIBUS-DP, другие взаимодействуют с сетью посредством коммуникационных процессоров.

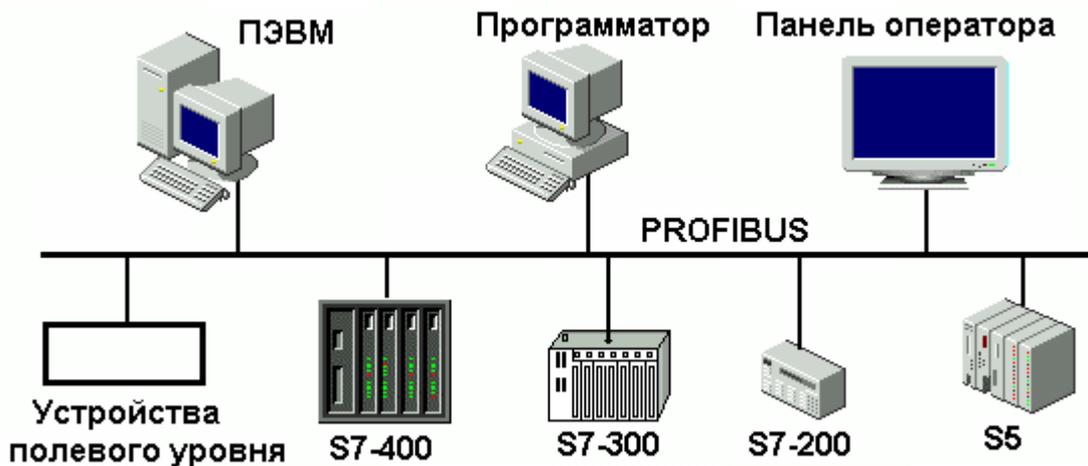


Рисунок 1.14 – Схема подключения контроллеров через протокол PROFIBUS

1.2.4.6. Информационная сеть Ethernet

Ethernet - это локальная сеть для быстрого равноправного (одноранговая сеть) обмена информацией между компьютерами и другими устройствами (контроллерами нижнего уровня, большими контроллерами – концентраторами). В качестве физических средств связи используются толстый коаксиальный кабель 10Base5, тонкий коаксиальный кабель 10Base2, витая пара 10Base-T, оптоволокно 10(100)Base-F. Скорость обмена по сети - 10 Мбод (100Мбод).

Протяженность сети на витой паре - до 100 м, на специализированном оптоволокне - до 2800 м. Количество узлов сети (рабочих станций, серверов и т. п.) определяется многими факторами и может достигать нескольких десятков.

Эта локальная сеть используется в том случае, когда в системе имеют место большие потоки информации, а также при необходимости создания многих пользовательских узлов (рабочих, инжиниринговых станций, серверов и т. д.) в сети.

Большинство контроллеров средней и большой мощности имеют возможность взаимодействия с Ethernet через встроенные порты процессоров или посредством интерфейсных модулей.

Даже микроконтроллеры MicroLogix 1200, MicroLogix 1500 фирмы **Allen-Bradley** могут быть подключены к сети Ethernet через интерфейс 1761-NET-

ENI. Этот интерфейс поддерживает мониторинг программ и их загрузку, сбор данных и равноправный обмен информацией.

А процессоры контроллеров средней мощности PLC 5/20E, PLC 5/40E и PLC 5/60E снабжены встроенным портом Ethernet. Кроме того, в системе имеется модуль интерфейса Ethernet (1785-ENET) для контроллеров PLC 5.

Платформа контроллеров ControlLogix той же компании располагает интерфейсными модулями 1756-ENET/ENBT - 1 порт, 10 Мбит/с (ENET), 10/100 Мбит/с (ENBT).

Контроллеры семейства Quantum (**Schneider Electric**) поддерживают сеть Ethernet TCP/IP посредством интерфейсных модулей:

- 140 NOE 211 00 - 2 порта (передатчик и приемник) с протоколом 10BASE-T, витая пара, скорость передачи данных 10 Мбит/с);

- 140 NOE 251 00 - 2 порта (передатчик и приемник) с протоколом 10BASE-FL, оптоволокно, скорость передачи данных 10 Мбит/с).

Контроллеры семейств S7-300 и S7-400 (компания **Siemens**) поддерживают сеть Ethernet через коммуникационные процессоры CP 343-1 TCP и CP 443-1 TCP.

Контроллеры семейства 90-70 компании **GE Fanuc** имеют разъем для подключения приемопередатчика локальной сети Ethernet, обеспечивающего высококачественную связь между контроллерами.

Коммуникационный процессор MCP-T (**Motorola** Communication Processor) предназначен для взаимодействия с локальной сетью Ethernet по протоколу TCP/IP. Может служить мостом между сетью Modbus и сетью Ethernet при больших объемах передаваемой в сети информации.

1.2.4.7. Эксплуатационные характеристики

Надежность системы управления оценивается следующими косвенными показателями: возможность резервирования сетей, контроллеров, модулей ввода/вывода и т. д.

К наиболее распространенным способам резервирования относятся:

- горячий резерв отдельных компонентов и/или контроллера в целом (при непрохождении теста в рабочем контроллере управление переходит ко второму контроллеру);
- троирование основных компонентов и/или контроллера в целом с голосованием по результатам обработки сигналов всеми контроллерами, составляющими группу (за выходной сигнал

принимается тот, который выдали большинство контроллеров группы, а контроллер, рассчитавший иной результат, объявляется неисправным);

- работа по принципу «пара и резерв». Параллельно работает пара контроллеров с голосованием результатов, а аналогичная пара находится в горячем резерве. При выявлении разности результатов работы первой пары управление переходит ко второй паре. Первая пара тестируется и, либо определяется наличие случайного сбоя и управление возвращается к первой паре, либо диагностируется неисправность и управление остается у второй пары.

Наличие встроенных аккумуляторов и батарей, обеспечивающих работу, способ организации управления при прекращении питания от сети.

Глубина и полнота диагностических тестов.

Условия эксплуатации:

- диапазоны температур и влажности окружающей среды;
- наибольшие вибрации и ударные нагрузки;
- допускаемые электрические и магнитные помехи и т. п.

При выборе программно-технических средств автоматизации объектов на первый план могут быть выдвинуты требования их работоспособности в жестких условиях эксплуатации (например, в широком диапазоне температур). Можно, конечно, разместить аппаратуру в специальных обогреваемых помещениях, но это повлечет за собой значительное увеличение линий связи и удорожание системы автоматизации. С другой стороны, следует иметь в виду, что аппаратура, способная работать при очень низких минусовых температурах (до - 40⁰ С), имеет более высокую стоимость.

Контроллеры, способные функционировать без подогрева в условиях минусовых температур и предназначенные для автоматизации объектов, находящихся на больших расстояниях друг от друга и от пунктов управления, получили название **RTU** (Remote Terminal Unit - удаленное терминальное устройство). Эти устройства в качестве каналов связи используют телефонные линии или радиоканал. Оба эти канала требуют наличия модемов со стороны приемника и передатчика, потому такие системы называют телемеханическими. Пример применения RTU на линейном участке нефтепровода приведен на рисунке 1.15.

Способы монтажа. Способы монтажа контроллеров и модулей ввода/вывода достаточно типизированы. Это и корзины с гнездами для

различных модулей, и базовые платы с разъемами под модули. Количество модулей, размещаемых в корпусе (корзине) или на базовой плате, может быть различным (от 3 до 18). Сконфигурированные в корзинах и на базовых платах контроллеры могут монтироваться на щитах, в шкафах, профильных рейках. Имеются ПТК, построенные по модульному принципу, в которых монтаж любых модулей (процессорных, ввода/вывода, коммуникационных и т. п.) производится непосредственно на профильной рейке.

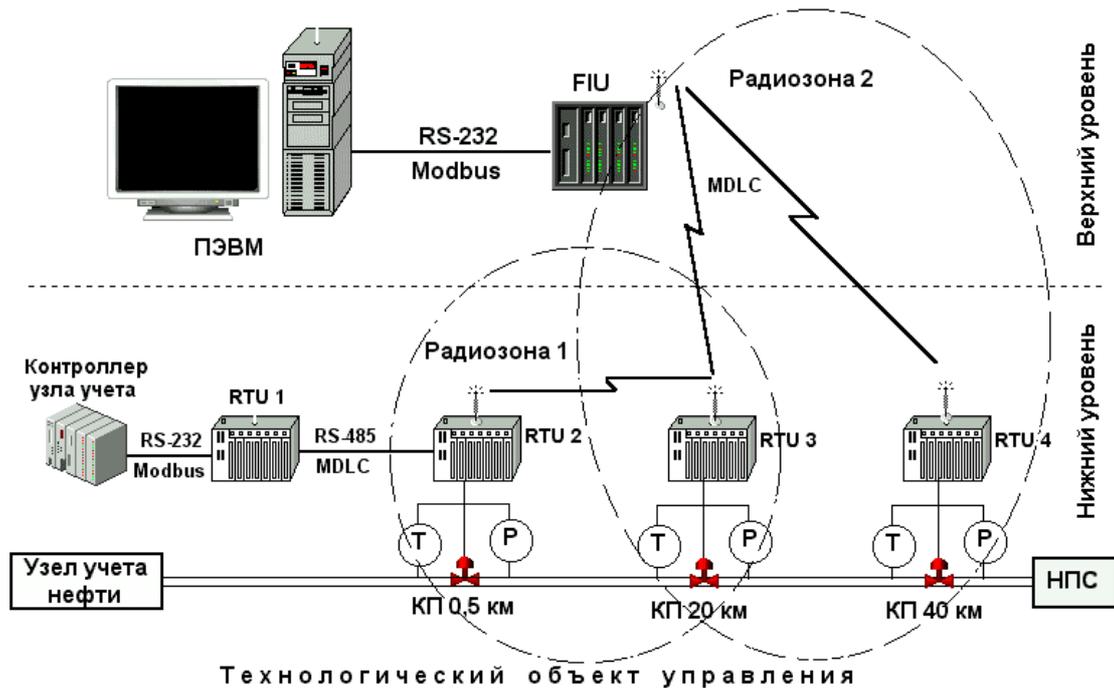


Рисунок 1.15 – Система управления нефтепроводом подключения и узлом учета на базе контроллеров MOSCAD

Тенденции развития контроллеров:

- беспроводная связь (сотовая связь, радиосвязь);
- развитие новых видов нано-микроконтроллеров от одного до десятков вводов/выводов (специализированных и программируемых) благодаря возрастанию мощности микропроцессоров;
- расширение вариантов ввода/вывода для контроллеров одного типа;
- развитие общих и специализированных (для отдельных классов технологических процессов) библиотек программного обеспечения, которые «зашиваются в память контроллеров»;
- сближение контроллеров и ПК по функциям (сейчас сближение происходит по архитектуре, по применяемым процессорам и программному обеспечению).

Происходят существенные изменения в промышленных и полевых сетях. Продолжается распространение сети Ethernet на все уровни управления. Главный недостаток – случайный доступ – минимизируется применением коммутаторов, что позволяет снизить нагрузку на сеть и избегать ее «затыкания» при большом количестве сообщений. Происходит изменение протоколов сети таким образом, что становится реальным жесткий цикл гарантированных по времени сообщений, а также цикл со случайным доступом. На полевом уровне шина FF также соединяется с Ethernet.

В контроллерах начинают использовать алгоритмы самонастройки регуляторов. Самонастройка может выполняться по команде оператора или автоматически – регуляторы с прогнозируемой моделью (адаптивные).

1.2.5. Программное обеспечение АСУ

1.2.5.1 Классификация программных средств систем управления технологическими процессами

В типовой архитектуре SCADA-системы явно просматриваются два уровня:

- **уровень локальных контроллеров**, взаимодействующих с объектом управления посредством датчиков и исполнительных устройств;
- **уровень оперативного управления** технологическим процессом, основными компонентами которого являются серверы, рабочие станции операторов/диспетчеров, АРМ специалистов.

Каждый из этих уровней функционирует под управлением специализированного программного обеспечения (ПО). Разработка этого ПО или его выбор из предлагаемых в настоящее время на рынке программных средств зависит от многих факторов, прежде всего от решаемых на конкретном уровне задач.

Различают **базовое** и **прикладное** программное обеспечение (рис. 1.16).

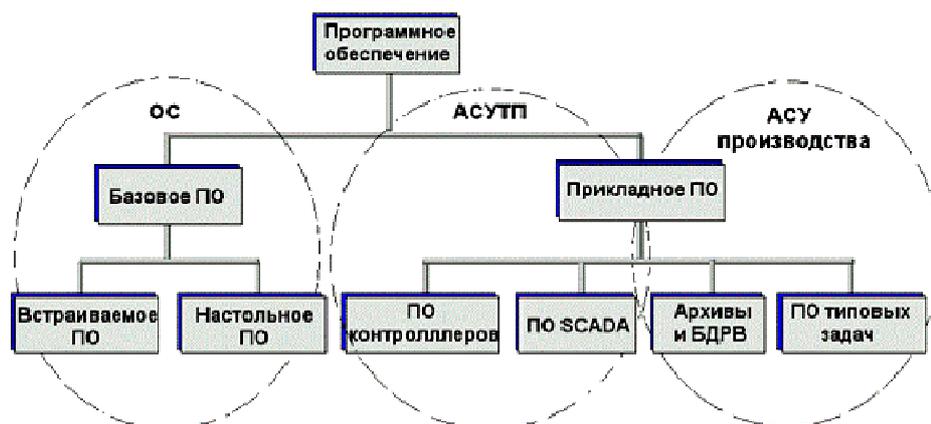


Рисунок 1.16 – Классификация программных средств системы управления

Базовое ПО включает в себя различные компоненты, но основным из них является операционная система (ОС) программно-технических средств АСУТП. Каждый уровень АСУТП представлен «своими» программно-техническими средствами: на нижнем уровне речь идет о контроллерах, тогда как основным техническим средством верхнего уровня является компьютер. В соответствии с этим в кругу специалистов появилась и такая классификация: **встраиваемое** и **настольное** программное обеспечение.

Очевидно, требования, предъявляемые к встраиваемому и настольному ПО, различны. Контроллер в системе управления наряду с функциями сбора информации решает задачи автоматического непрерывного или логического управления. В связи с этим к нему предъявляются жесткие требования по времени реакции на состояние объекта и выдачи управляющих воздействий на исполнительные устройства. Контроллер должен **гарантированно** откликаться на изменения состояния объекта за **заданное** время.

Для решения подобных задач рекомендуется применение **ОС реального времени** (ОСРВ). Такие операционные системы иногда называют детерминированными, подразумевая под этим гарантированный отклик за заданный промежуток времени. Большинство микропроцессорных устройств (в том числе контроллеры и компьютеры) используют механизм прерываний работы процессора. В ОС реального времени, в отличие от ОС общего назначения (не гарантирующих времени исполнения), прерываниям присвоены приоритеты, а сами прерывания обрабатываются за гарантированное время.

Выбор ОС зависит от жесткости требований реального времени. Для задач, критичных к реакции системы управления, в настоящее время

применяются такие операционные системы реального времени, как **OS-9**, **QNX**, **VxWorks**. В системах с менее жесткими требованиями к реальному времени возможно применение версий Windows NT/CE, точнее их расширений реального времени.

OS-9 относится к классу Unix-подобных операционных систем реального времени и предлагает многие привычные элементы среды Unix. Все функциональные компоненты OS-9, включая ядро, иерархические файловые менеджеры, систему ввода/вывода и средства разработки, реализованы в виде независимых модулей. Комбинируя эти модули, разработчик может создавать системы с самой разной конфигурацией - от миниатюрных автономных ядер, ориентированных на ПЗУ контроллеров, до полномасштабных многопользовательских систем разработки.

OS-9 обеспечивает выполнение всех основных функций операционных систем реального времени: управление прерываниями, межзадачный обмен информацией и синхронизация задач.

Операционная система **QNX** разработки канадской фирмы QNX Software Systems Ltd. является одной из наиболее широко используемых систем реального времени. QNX гарантирует время реакции в пределах от нескольких десятков микросекунд до нескольких миллисекунд (в зависимости от быстродействия ПЭВМ и версии QNX). Кроме того, высокая эффективность QNX в задачах управления в реальном времени обеспечивается такими свойствами, как многозадачность (до 250 задач на одном узле), встроенные в ядро системы сетевые возможности, гибкое управление прерываниями и приоритетами, возможность выполнения задач в защищенном и фоновом режимах.

Операционная система QNX нашла применение как на нижнем уровне АСУТП (ОС для контроллеров), так и на верхнем уровне (ОС для программного обеспечения SCADA).

Операционная система реального времени **VxWorks** предназначена для разработки ПО встроенных компьютеров, работающих в системах «жесткого» реального времени. К операционной системе VxWorks прилагается и инструментальная среда Tornado фирмы Wind River Systems со средствами разработки прикладного программного обеспечения. Его разработка ведется на инструментальном компьютере в среде Tornado для последующего исполнения на целевом компьютере (контроллере) под управлением VxWorks.

ОС VxWorks поддерживает целый ряд компьютерных платформ, в том числе Intel 386/486/Pentium, PowerPC, DEC Alpha. К платформам, поддерживаемым инструментальной средой Tornado, относятся Sun (Solaris), HP 9000/400,700, DEC Alpha, PC (Windows 95 и NT) и другие.

Операционная система **Windows** знакома всем как настольная система. Но это, прежде всего, относится к платформам Windows 3.xx/95, в которых действительно отсутствует поддержка реального времени. Ситуация резко изменилась с появлением Windows NT. Сама по себе Windows NT не является операционной системой реального времени в силу ряда ее особенностей. Система поддерживает аппаратные (а не программные) прерывания, отсутствует приоритетная обработка отложенных процедур и др. Но в конце XX века ряд фирм предприняли серьезные попытки превратить Windows NT в ОС жесткого реального времени. И эти попытки увенчались успехом. Компания VenturCom разработала модуль Real Time Extension (RTX) - подсистему реального времени (PB) для Windows NT. Эта подсистема имеет собственный планировщик со 128 приоритетами прерываний, который не зависит от NT. Максимальное время реакции на прерывание составляет 20-80 мкс вне зависимости от загрузки процессора. Теперь при каждом прерывании от таймера приоритет передается критичным по времени задачам. А в оставшееся от их работы время могут выполняться «медленные» процессы: ввод/вывод, работа с диском, сетью, графическим интерфейсом и т. п.

32-разрядная **Windows CE** была создана компанией Microsoft для малых компьютеров (калькуляторов), но в силу ряда достоинств стала претендовать на роль стандартной ОС реального времени. К числу этих достоинств относятся:

открытость и простота стыковки с другими ОС семейства Windows;

время реакции порядка 500 мкс;

значительно меньшие по сравнению с другими ОС Windows требования к ресурсам памяти и возможность построения бездисковых систем.

А в 1999 году компанией Direct by Kooyo ОС Windows CE была впервые установлена на платформу микроPLC.

Выбор операционной системы программно-технических средств **верхнего уровня** АСУТП определяется прикладной задачей (ОС общего пользования или ОСРВ). Но наибольшую популярность и распространение получили различные варианты ОС Windows (Windows NT/2000). Ими оснащены программно-технические средства верхнего уровня АСУТП,

представленные персональными компьютерами (ПК) разной мощности и конфигурации - рабочие станции операторов/диспетчеров и специалистов, серверы баз данных (БД) и т. д.

Такая ситуация возникла в результате целого ряда причин и тенденций развития современных информационных и микропроцессорных технологий.

Вот несколько основных аргументов в пользу Windows:

- Windows имеет очень широкое распространение в мире, в том числе и в Украине, в связи с чем легко найти специалиста, который мог бы сопровождать системы на базе этой ОС;

- ОС имеет множество приложений, обеспечивающих решение различных задач обработки и представления информации;

- ОС Windows и Windows-приложения просты в освоении и обладают типовым интуитивно понятным интерфейсом, поддерживают общедоступные стандарты обмена данными;

- системы на базе ОС Windows просты в эксплуатации и развитии, что делает их экономичными как с точки зрения поддержки, так и при поэтапном росте.

Microsoft развивает информационные технологии (ИТ) для Windows высокими темпами, что позволяет компаниям, использующим эту платформу «идти в ногу со временем».

Также следует учитывать и то, что неотъемлемой частью верхнего уровня АСУ ТП является человек, время реакции которого на события недетерминировано и зачастую достаточно велико. Да и сама проблема реального времени на верхнем уровне не столь актуальна.

В 90-х годах широкое распространение получила ОС реального времени QNX. Имеется множество примеров использования QNX на всех уровнях иерархической структуры АСУТП (от контроллеров до серверов и рабочих станций). Но в последние годы активность компании на рынке SCADA-систем значительно снизилась, что привело и к снижению числа продаж этого программного продукта. Объясняется это тем, что еще в 1995 году компания QNX Software Systems Ltd. объявила об «уходе» во встроенные системы.

С точки зрения разработки системы управления предпочтительна такая программная архитектура, в которой ПО всех уровней управления реализовано в единой операционной системе. В этом случае «автоматически» снимаются все вопросы, связанные с вертикальным взаимодействием различных программных компонент системы управления. Но на практике это

далеко не так. Достаточно часто в разрабатываемых системах контроля и управления нижний и верхний уровни реализуются в разных ОС. И наиболее характерна ситуация, когда на уровне контроллера используется ОС реального времени, а на уровне оператора/диспетчера SCADA-система функционирует под Windows NT. Без специализированных решений по организации взаимодействия между подсистемами здесь не обойтись.

Для функционирования системы управления необходим и еще один тип ПО - **прикладное программное обеспечение (ППО)**.

Известны два пути разработки прикладного программного обеспечения систем управления:

- создание собственного прикладного ПО с использованием средств традиционного программирования (стандартные языки программирования, средства отладки и т.д.);

- использование для разработки прикладного ПО существующих (готовых) инструментальных средств.

Первый вариант является наиболее трудоемким. Применение высокоуровневых языков требует соответствующей квалификации разработчиков в теории и технологии программирования, знания особенностей конкретной операционной системы, тонкостей аппаратного обеспечения (контроллеров). С точки зрения основных критериев - стоимости и времени разработки - этот вариант неприемлем в большинстве случаев.

Второй вариант является более предпочтительным. Почему? А потому, что на сегодняшний день в мире уже создано несколько десятков инструментальных систем, хорошо поддерживаемых, развиваемых и нашедших применение при создании десятков и сотен тысяч проектов автоматизации. Эти проверенные временем программные средства упрощают (разработчики интерфейсов - не высококлассные программисты, а специалисты по автоматизации), ускоряют и значительно удешевляют процесс разработки.

С точки зрения области применения готовые инструментальные средства можно разделить на два класса:

- средства, ориентированные на разработку программ управления внешними устройствами, контроллерами - **CASE-системы (Computer Aided Software Engineering)**;

– средства, ориентированные на обеспечение интерфейса оператора/ диспетчера с системой управления – **SCADA**-системы (**Supervisory Control And Data Acquisition** - диспетчерское управление и сбор данных).

Контроллеру требуется **программа**, в соответствии с которой он взаимодействует с объектом. В одних случаях речь идет только о сборе данных с объекта, в других - о логическом управлении (например, выполнении блокировок). Наконец, одно из основных применений контроллера - реализация функций непрерывного управления отдельными параметрами или технологическим аппаратом (процессом) в целом.

Фирмы, производящие оборудование для построения систем автоматизации, всегда стремились сопровождать свою продукцию набором программных инструментов, с помощью которых пользователь по определенным правилам и соглашениям мог бы описывать логику работы контроллера. На раннем этапе развития этих программных средств набор поддерживаемых ими функций обеспечивался нестандартными языками. Со временем правила и соглашения совершенствовались и на определенном этапе были оформлены в виде специальных языков программирования, образовав то, что сейчас называется **CASE**-инструментарием.

В 1992 году Международная Электротехническая Комиссия (МЭК, IEC - International Electrotechnical Commission,) взяла под контроль процессы, связанные с развитием этого типа прикладного ПО. Были выдвинуты требования открытости системы, выполнение которых позволило бы унифицировать программные средства и упростить разработку:

– возможность разработки драйверов для контроллеров самими пользователями, т.е. сопровождение программных продуктов по программированию контроллеров специальными инструментальными средствами;

– наличие коммуникационных средств (интерфейсов) для взаимодействия с другими компонентами системы управления;

– возможность портации ядра системы на ряд программно-аппаратных платформ.

На рынке появилось большое количество пакетов, удовлетворяющих вышеописанным требованиям. Практически во всех этих пакетах среда разработки реализована в **Windows**-интерфейсе, имеются средства загрузки разработанного приложения в исполнительную систему.

Названия некоторых из этих пакетов приведены ниже:

- RSLogix 500, RS Logix 5, RSLogix 5000 фирмы Rockwell Software для программирования контроллеров различных семейств Allen-Bradley;
- DirectSOFT для контроллеров семейства Direct Logic фирмы Kooyo;
- пакеты PL7 и Concept - ПО для программирования контроллеров различных семейств компании Schneider Electric;
- пакеты STEP 5, STEP 7 Micro, STEP 7 для программирования контроллеров семейств S5 и S7 фирмы Siemens;
- пакет Toolbox для конфигурирования контроллеров семейства Moscad;
- пакет TelePACE для программирования контроллеров серий TeleSAFE Micro 16 и SCADAPack фирмы Control Microsystems.

1.2.5.2. Виды программного обеспечения

При решении задач реализации (построения) СУ обычно используются специализированные программные пакеты, которые достаточно условно можно разбить на подмножества:

CASE—средства (Computer Aided Software Engineering), предназначенные для программирования задач, реализуемых подсистемами нижнего уровня АСУТП на промышленных микроконтроллерах (ремиконтах);

ОСРВ - операционные системы реального времени: pSOS, VRTX, LynxOS, VxWorks, QNX, OS9 и др.;

SCADA—системы (Supervisory Control And Data Acquisition), которые предназначены для автоматизированного конфигурирования АСУТП из таких элементов, как микроконтроллеры, компьютеры, технологические станции и т. д. и программирования задач, отнесённых к SCADA – уровню;

ПТК - программно-технические комплексы:

- Spectrum (Foxboro, США),
- Intelligent Automation Series (Foxboro, США),
- Centum, Yew Series (Yokogawa, Япония),
- СКАТ (Россия);

ЭСРВ - экспертные систем реального времени, к числу которых относятся:

- G2 (фирма Gensym),
- RTWorks (Talarian, США),
- COMDALE/C (Comdale Tech., Канада),
- COGSYS (SC, США),

- ILOG Rules (ILOG, Франция);

СУБД – системы управления базами данных;

MRP-системы (MRP – Material Requirements Planning) - автоматизированное планирование потребности в сырье и материалах для производства;

MRP II (Manufacturing Resource Planning) – планирование ресурсов предприятия;

ERP-системы (ERP - Enterprise Resource Planning – планирование/управление ресурсами предприятия с точки зрения бизнеса);

EAM-системы (EAM - Enterprise Asset Management - управление основными фондами и имуществом).

Логика развития АСУТП в промышленности диктует необходимость интеграции разработок специализированных аппаратно-программных средств, в дальнейшем встроенных систем, применяемых для обработки информации, контроля и управления рассредоточенными по территории объектами.

Программные средства верхнего уровня АСУТП (SCADA-пакеты) предназначены для создания прикладного программного обеспечения пультов контроля и управления, реализуемых на различных компьютерных платформах и специализированных рабочих станциях. SCADA - пакеты позволяют при минимальной доле программирования на простых языковых средствах разрабатывать многофункциональный интерфейс, обеспечивающий оператора/диспетчера не только полной информацией о технологическом процессе, но и возможностью им управлять.

В своем развитии SCADA - пакеты прошли тот же путь, что и программное обеспечение для программирования контроллеров. На начальном этапе (80-е годы) фирмы-разработчики аппаратных средств создавали собственные (закрытые) SCADA-системы, способные взаимодействовать только со «своей» аппаратурой. Начиная с 90-х годов, появились универсальные (открытые) SCADA - программы.

Понятие открытости является фундаментальным, когда речь идет о программно-аппаратных средствах для построения многоуровневых систем автоматизации. Более подробно об этом будет сказано ниже.

Сейчас на российском рынке присутствует несколько десятков открытых SCADA-пакетов, обладающих практически одинаковыми функциональными возможностями. Но это совсем не означает, что любой из них можно с одинаковыми усилиями (временными и финансовыми) успешно адаптировать к той или иной системе управления, особенно, если речь идет о ее

модернизации. Каждый SCADA-пакет является по-своему уникальным, и его выбор для конкретной системы автоматизации, обсуждаемый на страницах специальной периодической прессы почти на протяжении последних десяти лет, по-прежнему остается актуальным.

Ниже приведен перечень наиболее популярных в России SCADA-пакетов.

- Trace Mode/Трейс Моуд (AdAstrA) - Россия;
- InTouch (Wonderware) - США;
- FIX (Intellution) - США;
- Genesis (Iconics Co) - США;
- Factory Link (United States Data Co) - США;
- RealFlex (BJ Software Systems) - США;
- Sitex (Jade Software) - Великобритания;
- Citect (CI Technology) - Австралия;
- WinCC (Siemens) - Германия;
- RTWin (SWD Real Time Systems) - Россия;
- САРГОН (НВТ - Автоматика) - Россия;
- MIK\$Sys (МИФИ) - Россия;
- Cimplicity (GE Fanuc) - США;
- RSView (Rockwell Automation) - США и многие другие.

Последовательность представления пакетов в приведенном выше перечне в достаточной степени случайна. Констатируется лишь сам факт существования той или иной системы. Предлагается исходить из предпосылки, что SCADA-пакет существует, если с помощью него уже реализовано хотя бы несколько десятков проектов. Вторая предпосылка - нет абсолютно лучшей SCADA-системы для всех случаев применения. SCADA - это всего лишь удобный инструмент в руках разработчика, и ее адаптация к конкретной системе автоматизации - вопрос квалификации и опыта.

До недавнего времени задача регистрации информации в реальном времени могла быть решена либо на уровне программного обеспечения концентратора (контроллера верхнего уровня), либо на уровне SCADA-системы. При этом речь идет о больших потоках данных о процессе, поступающих от большого количества датчиков (нескольких сот или тысяч) в реальном масштабе времени и с высокой частотой (периоды опроса – порядка секунд и даже долей секунд). На уровне АСУТП эта информация нужна для оперативного управления технологическим процессом.

Данные технологических процессов специфичны. Они, как правило, могут быть представлены в виде временных рядов «значение – время». Для их сбора и хранения практически любой SCADA-пакет имеет в своем составе подсистему регистрации исторических данных (архив) с возможностью последующей выборки требуемых для анализа данных и их представления в виде трендов. Но такие архивы не предназначены для длительного хранения больших объемов информации. К тому же, речь здесь идет о так называемых локальных архивах. Архив SCADA-пакета хранит информацию о переменных лишь одного конкретного технологического процесса. Но предприятие имеет в своем составе целый ряд технологических процессов, системы управления которыми выполнены, как правило, на различной программно-аппаратной платформе.

В получении оперативных и объективных технологических данных сегодня заинтересованы практически все службы предприятия. Однако характер необходимой информации различен для различных уровней управления. На верхнем уровне (АСУП) нужна только интегрированная (предварительно подготовленная) информация о технологических процессах (данные типа «нарастающим итогом», средних значений за определенные промежутки времени, общее количество произведенных продуктов и т.д.).

Для хранения такой информации хорошо адаптированы базы данных реляционного типа (РБД). Данные в этих базах статичны, связаны многими отношениями, должны быть легко выбираемы по различным сложным критериям. Однако РБД не приспособлены для хранения огромного количества значений параметров, получаемых от SCADA-систем и накапливаемых за достаточно длительное время (до трех и более лет).

В результате, информация, имеющаяся и успешно используемая в АСУТП, недоступна для верхнего уровня.

Таким образом, назрела необходимость создания и внедрения в процесс управления так называемых исторических архивов производственных данных или баз данных реального времени (БДРВ) масштаба предприятия.

Во-первых, такие системы должны обеспечить сбор данных с различных источников производственной информации на предприятии (SCADA-систем, DCS-систем, лабораторных систем - LIMS, различных СУБД и т. п.) и их долговременное хранение в едином формате. Во-вторых - обеспечить доступ к информации специалистам и руководителям всех уровней и служб по

стандартным протоколам с помощью специализированных клиентских приложений.

Такие системы от различных производителей (в том числе и от производителей SCADA-систем) уже появились в России и с каждым днем находят все более широкое применение. Среди них IndustrialSQL Server – компонент интегрированного пакета FactorySuite (Wonderware), iHistorian – компонент семейства Intellution Dynamics и другие.

Существует целый ряд задач управления, не перекрываемых ни классом АСУП, ни классом АСУТП. Частично эти задачи не перекрываются из-за отсутствия возможностей программного обеспечения этих уровней системы управления. Среди них находятся и задачи, решение которых может оказать решающее влияние на эффективность предприятия в целом: диспетчеризация производства, оперативное планирование, управление качеством продукции и многие другие.

Наличие базы данных реального времени масштаба предприятия – это только лишь предпосылка для их решения (необходимое, но недостаточное условие). Ряд разработчиков инструментальных систем предлагают использовать с этой целью специальный тип программных продуктов. Это могут быть небольшие системы, предназначенные для решения отдельных типовых задач, например, системы расчета и согласования материальных балансов. Появился ряд интегрированных систем, поддерживающих, наряду с функциями хранения и представления информации, решение задач расчета тепловых и материальных балансов, планирования, оптимизации и т.п. К наиболее известным программным продуктам этого класса ПО относятся InfoPlus компании Aspen Tech, «Калькулятор качества» фирмы ПЕТРОКОМ, PI System (Plant Information System) компании OSIsoft.

Современное развитие информационных технологий (ИТ) создало предпосылки для успешной интеграции всех уровней управления многоуровневой системы и создания интегрированной информационной системы предприятия.

1.2.5.2. SCADA-системы

Средний уровень (уровень управления по показателям качества продуктов и эффективности производства) может быть реализован с использованием SCADA-систем отечественных и зарубежных производителей, например:

- Trace Mode (AdAstra, Россия);

- GENIE (Advantech, Тайвань);
- Genesys (Iconics, США);
- Real Flex (BJ, США);
- FIX (Intellution, США);
- Factory Suite, InTouch (Wanderware, США);
- Citect (CiTechnologies, США) и др.

Перечисленные выше программные продукты предназначены для использования на действующих технологических установках в реальном времени и, следовательно, требуют использования компьютерной техники в промышленном исполнении, отвечающей наиболее жестким требованиям в смысле надежности, стоимости и безопасности.

К SCADA-системам предъявляются особые требования:

- соответствие нормативам «реального времени» (в т.ч. и «жесткого реального времени»);
- способность адаптироваться как к изменениям параметров среды в темпе с этими изменениями, так и к условиям работы информационно-управляющего комплекса;
- способность работать в течение всего гарантийного срока без обслуживания (бесперебойная работа годами);
- установка в отдаленных и труднодоступных местах (как географически - малообжитые районы, так и технологически - колодцы, эстакады).

Основные возможности SCADA-систем:

- сбор первичной информации от устройств нижнего уровня;
- архивирование и хранение информации для последующей обработки (создание архивов событий, аварийной сигнализации, изменения технологических параметров во времени, полное или частичное сохранение параметров через определенные промежутки времени);
- визуализация процессов;
- реализация алгоритмов управления, математических и логических вычислений (имеются встроенные языки программирования типа VBasic, Pascal, C и др.), передача управляющих воздействий на объект;
- документирование как технологического процесса, так и процесса управления (создание отчетов), выдача на печать графиков, таблиц, результатов вычислений и др.;
- сетевые функции (LAN, SQL);

- защита от несанкционированного доступа в систему;
- обмен информацией с другими программами (например, Outlook, Word и др. через DDE, OLE и т.д.).

Понятие открытости ПО

Различают два вида открытости программного обеспечения: аппаратная и программная.

Аппаратная открытость – поддержка или возможность работы с оборудованием сторонних производителей.

Современная SCADA не ограничивает выбора аппаратуры нижнего уровня, т.к. предоставляет большой выбор драйверов или серверов ввода-вывода.

Программная открытость - для программной системы определены и открыты используемые форматы данных и процедурный интерфейс, что позволяет подключить к ней внешние, независимо работающие компоненты, в том числе разработанные отдельно программные и аппаратные модули сторонних производителей.

Для подсоединения драйверов ввода-вывода к SCADA используются два механизма:

- стандартный динамический обмен данными (DDE – Dynamic Data Exchange и др.),
- по внутреннему протоколу, известному только фирме-разработчику.

В большинстве SCADA используется DDE, однако из-за ограничений по производительности и надежности он не совсем пригоден для реального времени. Взамен него Microsoft предложила более эффективное средство: OLE (Object Linking and Embedding – включение и встраивание объектов).

На базе OLE появился новый стандарт OPC (OLE for Process Control), ориентированный на рынок промышленной автоматизации. Новый стандарт позволяет, во-первых, объединять на уровне объектов различные системы управления и контроля, во-вторых, устраняет необходимость использования различного нестандартного оборудования и соответствующих коммуникационных программных драйверов.

Варианты обмена SCADA-систем с приложениями и физическими устройствами через OPC приведены на рисунке 1.17.

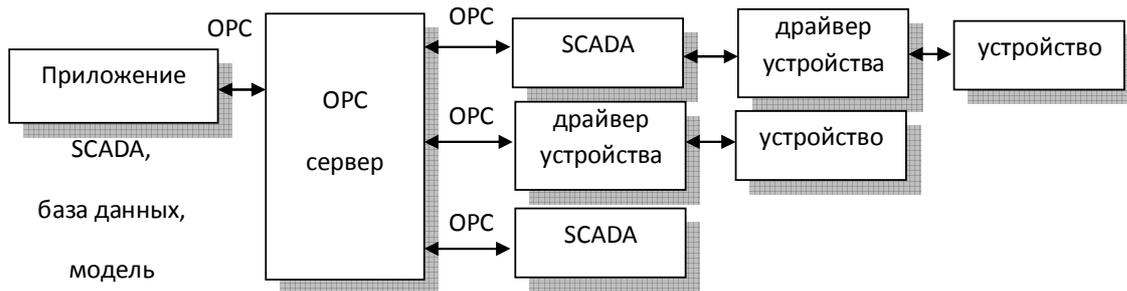


Рисунок 1.17 – Схема SCADA-систем с приложениями и физическими устройствами через OPC

1.2.6. Распределенные АСУ

1.2.6.1. Определение, назначение, функциональные отличия от SCADA

Распределенной системой управления (PCY) принято называть большую систему управления, поставляемую в полном комплекте одним производителем. При этом в комплект системы всегда входят контроллеры (управляющие процессоры), платы и модули ввода/вывода, сетевое оборудование, рабочие станции, программное обеспечение - все от одного производителя.

Часто производитель PCY создавал свои сети управления и свои рабочие станции, поскольку на момент их рождения и сеть Ethernet, и компьютеры (PC) были достаточно слабы.

PCY обычно разрабатывались (и сейчас разрабатываются) для автоматизации непрерывных технологических процессов - это то, что называют АСУТП.

PCY никогда не применялись для управления процессами упаковки, сварки автомобилей, разлива пива в бутылки и другими дискретными процессами.

Функционально PCY отличались (и до сих пор отличаются) от систем ПЛК+СКАДА (PLC + SCADA) следующими свойствами:

- База данных распределена между контроллерами, но выглядит единой с точки зрения инженера. Именно это свойство и заложено в название «PCY».
- Операторский интерфейс тесно интегрирован в систему. Это не ПО SCADA, которое нужно «привязывать» к аппаратным средствам (железу).

Здесь все работает сразу после включения питания и без какой-либо настройки.

- Интенсивная и обширная обработка тревог (алармов) и событий реализуется также без каких-либо усилий со стороны разработчика.
- Возможность вести разработку конфигурации и вносить изменения он-лайн, (то есть, не останавливая процесса управления).
- Возможность менять отказавшее оборудование и расширять систему (добавлять новые узлы и платы) без отключения питания.
- Глубокая диагностика от уровня операторского интерфейса до отдельного канала ввода/вывода без какой-либо настройки.
- Возможность резервирования любого компонента системы (контроллер, модуль ввода/вывода, операторские станции) на аппаратном уровне и без какой-либо настройки программного обеспечения.

Все это, разумеется, делает начальную цену PCS более высокой по сравнению с ПЛК+СКАДА, но на порядок снижает время разработки и внедрения.

Понятие «распределенная система» не относится к территориальным признакам. Территориально распределенные системы принято называть «системами телемеханики», «системами телеметрии» или просто «СКАДА-системами».

Отметим, что вышеперечисленные свойства относятся к классическим PCS (DCS) - TDC3000, PlantScape фирмы Honeywell; I/A Series фирмы Foxboro; CENTUM CS3000 фирмы Yokogawa и другим.

Компании - производители DCS

- ◆ **Foxboro (I/A Series);**
- ◆ **Honeywell (PlantScape);**
- ◆ **Fisher-Rosemount (Delta-V);**
- ◆ **ABB (Symphony);**
- ◆ **Yokogawa (Centum XL);**
- ◆ **Valmet (Dimatic).**

1.2.6.2. Краткая характеристика DCS-систем

Система **CENTUM CS3000** предназначена для управления достаточно большими технологическими процессами и производствами. Она гибко масштабируема и организована по доменному принципу (состоит из сегментов). Система может включать до 16 доменов, каждый из которых

включает максимум 64 станции управления (из них не более 16 станций оператора). Максимальное количество станций на всю систему - 256.

Домены (сегменты) сети объединяются в единую систему управления с помощью конвертеров шины BCV (Bus Converter). Возможно построение иерархической системы (3-х уровневая шина с двумя конвертерами шины).

Станция оператора поддерживает до 100 000 параметров (станция LHS4000 - до 1 000 000 параметров).

Минимальная конфигурация системы - одна станция управления и одна станция оператора.

Конфигурация системы CENTUM CS3000 с несколькими сегментами сети V-net представлена на рисунке 1.18.

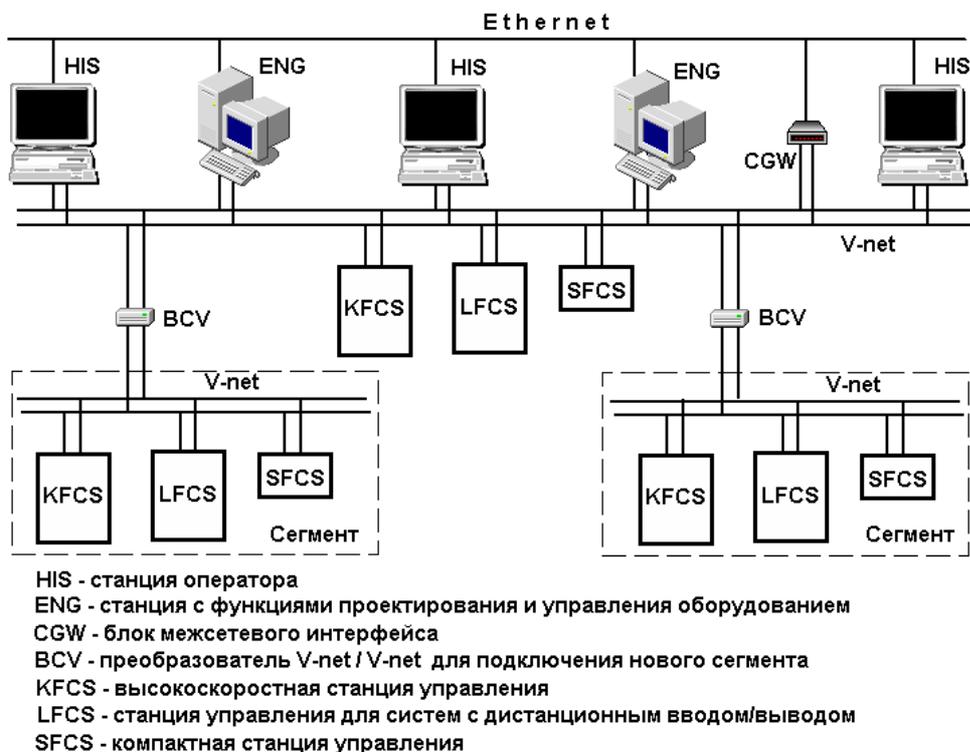


Рисунок 1.18 – Конфигурация системы CENTUM CS3000

В системе имеется два типа станций управления:

- **стандартная станция** с дублированными CPU, представляющими собой работающую пару (два CPU на одной плате) и резерв, с дублированной шиной V-net и платами питания, модулями ввода/вывода;

- **компактная станция** (один шкаф).

Существует два типа стандартных станций управления:

- станция KFCS, в которой управляющие блоки FCU и узлы блоков ввода/вывода соединяются шиной ESB (расширенная объединительная плата) или дистанционной шиной ER;

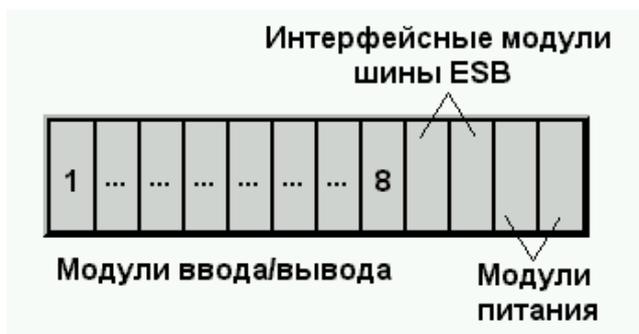
- станция LFCS, в которой управляющие блоки FCU и узлы блоков ввода/вывода соединяются шиной RIO.

Станции KFCS предназначены для высокоскоростного управления. Они включают в свой состав следующие компоненты:

- блок управления (FCU), включающий внешний интерфейс с сетью V-net, а также дублированные процессорные платы, блоки питания, аккумуляторные батареи и интерфейсные платы шины ESB;

- узел блока модулей ввода/вывода, включающий аналоговые, дискретные и многоточечные модули ввода/вывода, интерфейсные модули связи с блоком управления (ESB) и удаленными узлами (ER);

- модули связи с полевой шиной (FF H1).



Имеется два типа узлов блока модулей ввода/вывода:

- **локальный** узел блока ввода/вывода, подключаемый непосредственно к блоку управления (FCU) и находящийся в шкафу станции (рис. ниже);

- **дистанционный** (удаленный) узел блока ввода/вывода с интерфейсом Ethernet, монтируемый в удаленном шкафу рядом с датчиками и исполнительными устройствами.

Для подключения к блоку управления **локальных** узлов, устанавливаемых в шкафу станции управления, используется шина ESB. Шина ESB может иметь резервирование, а ее максимальная протяженность составляет 110 м, а скорость - 128 Мбит/с.

Для подключения к блоку управления **удаленных** узлов с помощью интерфейсного модуля, устанавливаемого в шкафу станции управления, используется шина ER. Эта шина также может быть зарезервирована.

Узлы блоков ввода/вывода, расположенные на шине ER, устанавливаются в удаленных шкафах или на стойках. Максимальное

расстояние при передаче составляет 185 м при использовании Ethernet-совместимого коаксиального кабеля 10Base2, 500 м - при использовании коаксиального кабеля 10Base5 и до 2 км - при использовании повторителей оптической шины.

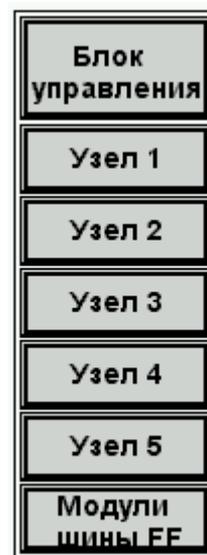
Компоненты станции управления KFCS монтируются в специальном шкафу или в стойках. Станция управления поддерживает до 10 блоков ввода/вывода (до 8 модулей ввода/вывода в каждом блоке).

Компоновка специального шкафа станции управления KFCS: передняя часть - блок управления FCU и 5 блоков ввода/вывода; задняя часть - 5 блоков ввода/вывода.

Пример монтажа блоков на передней части специального шкафа показан на рисунке справа.

Станции LFCS адаптированы для систем управления с большим количеством ввода/вывода.

В станции управления LFCS с подключенными устройствами через шину RIO реализовано резервирование центрального процессора. Возможно также резервирование шины RIO и различные варианты монтажа в шкафу или на стойке. В варианте с резервированием блока управления резервирование имеют процессорная плата, блок питания, аккумуляторный блок и интерфейсный модуль шины RIO.



Узлы блоков ввода/вывода, подключаемые к блоку управления с помощью шины RIO, не обязательно должны находиться в шкафу станции управления. При удалении блоков ввода/вывода от станции на расстояние до 750 м используется экранированная витая пара. Применение повторителей шины и оптоволоконной связи увеличивает расстояние до 20 км, причем повторители и оптоволоконные линии можно чередовать до четырех раз.

Основными компонентами системы **PlantScape (Honeywell)** являются:

- гибридный контроллер для дискретного управления и управления интегрированным процессом;
- функциональный сервер;
- операторский интерфейс (HMI);
- программное обеспечение сервера и контроллеров;
- сети управления ControlNet.

Компоненты системы **PlantScape** были разработаны так, чтобы функционировать как **единая высоко оптимизированная система**,

обеспечивая выполнение таких функций и такую эффективность, которые обычно недоступны для систем со слабой взаимосвязью человеко-машинного интерфейса (HMI) и программируемых логических контроллеров (PLC).

Процессоры системы поддерживают до 64 модулей ввода/вывода независимо от плотности модулей. Максимальное количество аналоговых модулей - 32. Модули ввода/вывода могут быть размещены как локально, так и удаленно. Архитектура системы **PlantScape** представлена на рисунке 1.19.

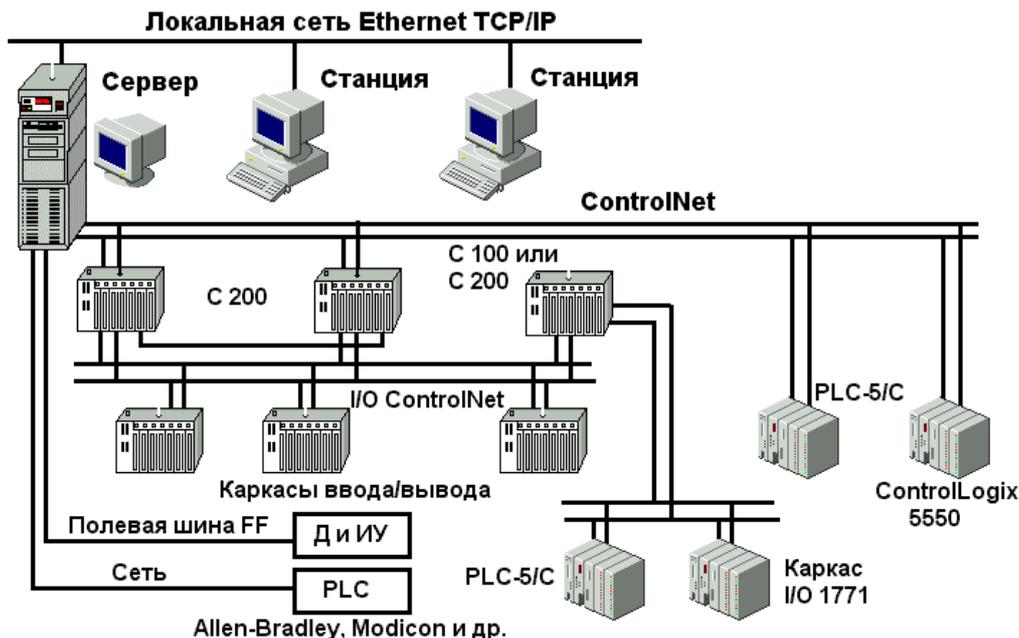


Рисунок 1.19 – Архитектура системы **PlantScape**

Взаимодействие компонентов системы на уровне управления осуществляется с помощью открытой сети ControlNet, которая обеспечивает связь контроллеров с сервером, контроллеров между собой и контроллеров с вводом/выводом. По этой сети сервер получает данные из контроллеров для обновления дисплеев, осуществляет сбор исторических данных и информации об алармах. ПО Control Builder пользуется этой сетью для загрузки и мониторинга алгоритмов управления.

Пропускная способность сети ControlNet с учетом резервирования составляет 5 Мбит/с и характеризуется возможностью детерминированной передачи данных. С физической точки зрения средства передачи данных представляют собой коаксиальный кабель с поддержанием шинной топологии типа «магистрالی с ответвлениями». Максимальная длина кабеля с медным покрытием сегмента сети составляет 1 км (максимальная длина зависит от

количества разветвителей). Установка промежуточных повторителей, количество которых может достигать 5, позволяет использовать кабель с медным покрытием длиной до 6 км. Использование дополнительных волоконно-оптических удлинителей ControlNet позволяет увеличить длину сети до 22 км. Каждый сегмент супервизорной/равноправной сети поддерживает до 6 контроллеров без резервирования или до 5 контроллеров с резервированием. Каждый управляющий процессор может объединять до 8 шасси ввода/вывода через сеть ввода/вывода.

Система PlantScape может быть интегрирована с контроллерами различных фирм-производителей. Это взаимодействие может быть реализовано двумя путями: через сеть ControlNet и непосредственно через сервер.

Для того, чтобы устройства могли связываться друг с другом через сеть ControlNet, требуется использовать протокол, понятный обоим устройствам. На сегодняшний день такими протоколами являются ControlNet и DH+, поддерживаемые некоторыми устройствами фирмы Allen-Bradley. К ним относятся PLC-5/C, и ControlLogix5550, поддерживающие сеть ControlNet, а также PLC-5 на DH+.

Кроме того, система PlantScape имеет встроенную коммуникацию Foundation Fieldbus (FF H1), поддерживаемую сервером.

➤ Архитектура **I/A Series (Foxboro)** долгие годы была основана на концепции **узла (Node)**, который являлся базовым элементом построения систем управления технологическими процессами. В соответствии с такой архитектурой каждый узел системы работает независимо и выполняет все функции, связанные с автоматизацией процесса. Он может быть связан с другими узлами Foxboro или устройствами других фирм через совместимые сети.

Узел состоит из набора модулей двух типов – процессорных модулей и модулей ввода/вывода, которые объединены между собой посредством шины узла **Nodebus**. Узел представляет собой промышленный шкаф с набором модулей, соединенных с рабочими станциями (операторскими и инженерными) и полевыми устройствами.

Типичная система управления I/A Series, включающая один узел, приведена на рисунке 1.20.

В системе имелось четыре типа процессорных модулей:

- **прикладные процессоры (AP)** – компьютеры, обычно подключаемые к запоминающим устройствам большой емкости для передачи данных в обоих направлениях;

- **процессоры рабочих станций (WP, AW)** – компьютеры, к которым подключаются видеомониторы, клавиатура и другие устройства рабочих станций;

- **процессоры связи** - интерфейсы и шлюзы для обеспечения взаимодействия компонентов системы управления через локальные сети, распределенные сети, устройства RS-232/RS-485;

- **управляющие процессоры (CP)**, к которым подключаются модули ввода/вывода полевой шины.

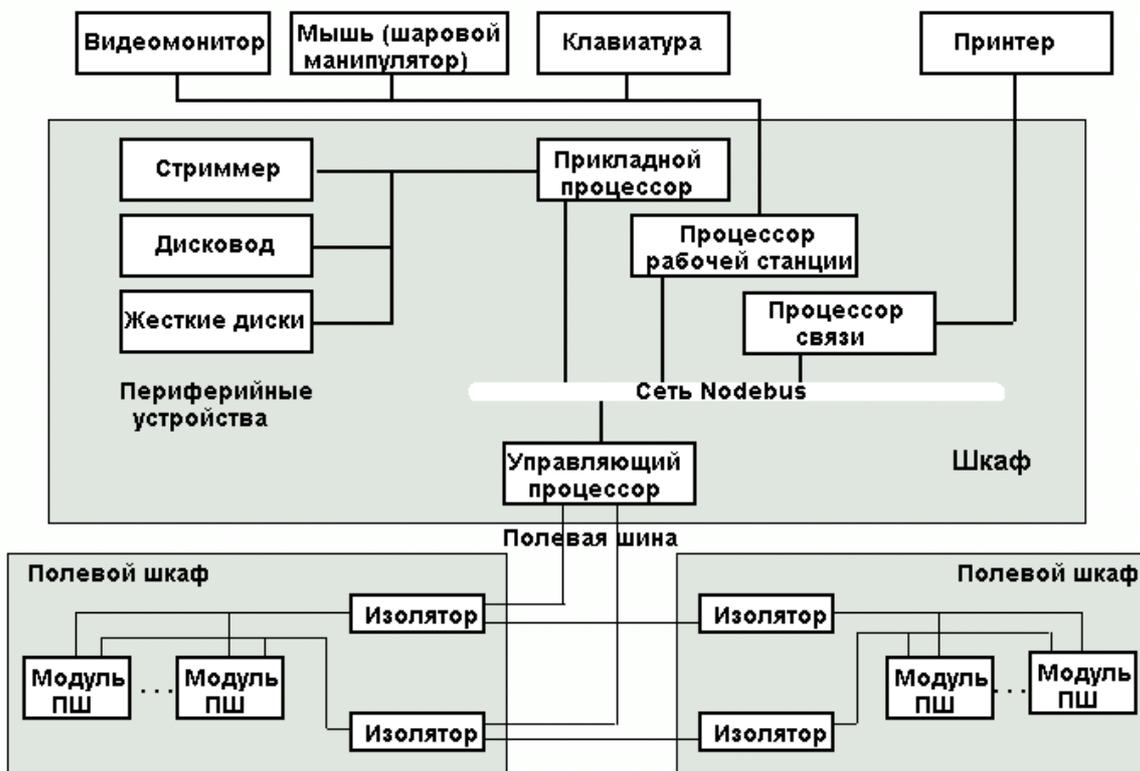


Рисунок 1.20 – Система управления на базе одного узла

Примечание. Разделение по функциям рабочих станций объясняется низкой производительностью процессоров персональных компьютеров того времени. Функции операторского интерфейса выполняли рабочие станции **WP**, функции конфигурирования управляющих процессоров – рабочие станции **AW**, функции работы с файлами, устройствами памяти, функции управления оборудованием, хранения конфигурации системы - рабочие станции **AP**. Набор компонентов узла, представленный на рисунке 1.20, не является обязательным и определяется конфигурацией системы.

На ранних этапах развития системы I/A Series в качестве модулей ввода/вывода использовались модули **FBM** (FBM1, FBM2...) монтируемые в каркасах и шкафах. К ним подсоединялись датчики технологических параметров и исполнительные устройства.

При использовании удаленного ввода/вывода связь с управляющими процессорами обеспечивалась изоляторами полевой шины **FBI**. Изолятор полевой шины применялся для обеспечения гальванической развязки и уменьшения цифрового взаимовлияния удаленной полевой шины и системы ввода/вывода. Изоляторы устанавливались в каркасы для монтажа модулей ввода/вывода.

Управляющие процессоры (**CP - Control Processors**) – ядро системы I/A Series - обеспечивают обработку полевых сигналов с модулей FBM. Управляющий процессор содержит в памяти базу данных и алгоритмы управления процессом, и в соответствии с ними происходит обработка сигналов. Управляющие процессоры обладают большой производительностью, что позволяет осуществлять операции с плавающей точкой и реализовывать сложные алгоритмы управления. Первым управляющим процессором был CP10. Затем широкое распространение получили более производительные CP30 и CP40 и их модификации CP30B и CP40B.

Локальная сеть I/A Series **Carrierband** обеспечивает удаленный обмен данными между узлами системы управления.

С развитием цифровой техники совершенствовалась и I/A Series. Деление рабочих станций на WP (операторские) и AW (инжиниринговые) стало условным. Отпала необходимость выделять прикладные станции AP в связи с возросшей производительностью персональных компьютеров. На смену изоляторам FBI пришли коммуникационные модули FCM, на смену связным процессорам – специальные модули системных интеграторов. Постепенно возрастала производительность и управляющих процессоров. В конце 90-х годов появились управляющие процессоры CP60. Была разработана новая серия модулей - FBM200, которые взаимодействовали с управляющим процессором через коммуникационные модули FCM.

Первоначально система I/A Series работала на компьютерах под управлением Unix-подобной операционной системы (Solaris) и, соответственно, всё программное обеспечение было написано под Unix.

Появление популярной операционной системы Microsoft Windows NT стимулировало выпуск очередной версии I/A Series – шестой.

Архитектура I/A Series шестой версии приведена на рисунке 1.21.

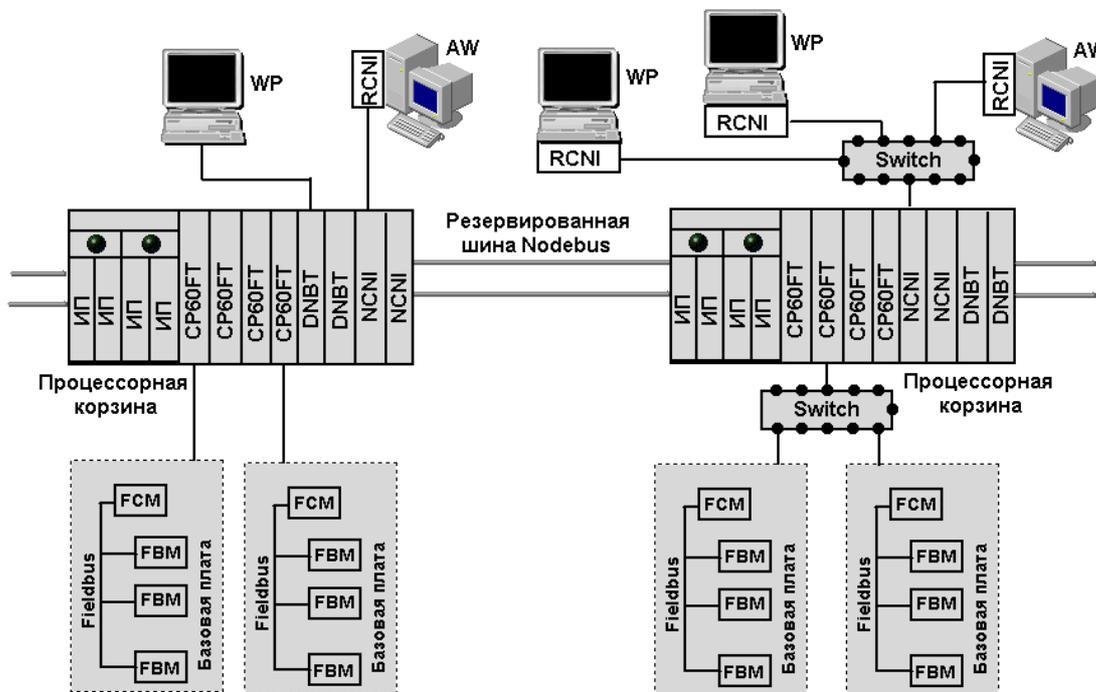


Рисунок 1.21 – Архитектура I/A Series шестой версии

Резервированная шина Nodebus объединяет все станции системы, обеспечивая обмен информацией между ними. Шина располагается в процессорных корзинах для управляющих процессоров и интерфейсных модулей. Можно последовательно соединить 4 корзины. Для более крупных конфигураций используются расширители шины Nodebus – усилители-повторители сигнала.

Интерфейсные модули применяются для подключения рабочих станций к шине Nodebus. Применяются два типа интерфейсных модулей:

- модуль DNBT (ранняя версия);
- модули RCNI/NCNI (новая версия).

Модуль DNBT устанавливается в процессорную корзину и обеспечивает интерфейс между рабочей станцией и шиной Nodebus. На каждую станцию требуется свой коммуникационный модуль. Максимальная длина кабеля между рабочей станцией и DNBT (CP) составляет 150 м, скорость передачи данных 10Мбит/с.

Модули NCNI/RCNI обеспечивают более гибкое построение системы. Модуль NCNI располагается в процессорной корзине. Он соединён с шиной

Nodebus и модулем RCNI (1.21). Модуль RCNI соединён непосредственно с рабочей станцией. Применение модулей RCNI/NCNI более предпочтительно по следующим причинам:

- расстояние между рабочей станции и CP может достигать 2 км, так как между RCNI и NCNI может быть установлено оптоволоконное расширение;
- скорость обмена данными с рабочей станцией может выбираться 10 - 100 Мб/сек;
- можно подключать несколько RCNI к одному NCNI при помощи коммутаторов, т.е. использование одного установочного места в процессорной корзине дает возможность подключить несколько рабочих станций (их количество определяется возможностями коммутатора и свободными IP-адресами).

В одной системе управления можно использовать одновременно оба типа модулей.

Подсистема ввода/вывода состоит из модулей FBM200 и коммуникационных модулей FCM. Данные модули устанавливаются на базовых платах, внутри которых находится шина Fieldbus. Связь между FBM и FCM реализуется по протоколу HDLC со скоростью 2Мб/с. Модули FCM преобразуют пакеты HDLC в пакеты Ethernet 10Мб/с для взаимодействия с управляющими процессорами. К одному управляющему процессору можно подключить через коммутатор до 6 коммуникационных модулей FCM.

В 2004 году появилась восьмая версия системы I/A Series, принципиально отличающаяся от прежних версий. В восьмой версии реализован совершенно другой принцип построения сети управления, маршрутизации, передачи данных, а также представлено новое поколение управляющих процессоров.

Упрощенная архитектура I/A Series восьмой версии представлена на рисунке 1.22.

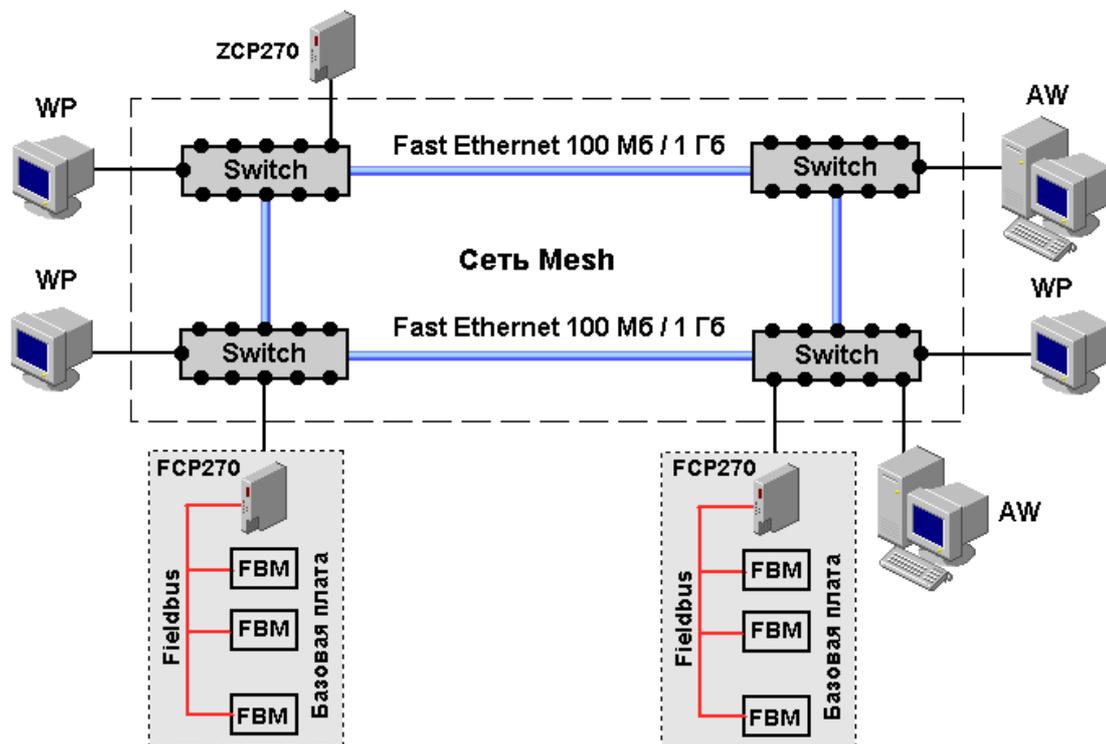


Рисунок 1.22 – Архитектура I/A Series восьмой версии

В этой версии центральным компонентом системы является сеть управления Mesh, которая соединяет управляющие процессоры, рабочие станции и подсистемы ввода/вывода в сеть 100Мб/1Гб. Сеть управления Mesh представляет собой коммутируемую сеть Fast Ethernet, основанную на стандартах IEEE 802.3u (Fast Ethernet) и IEEE 802.3z (Gigabit Ethernet). Сеть состоит из коммутаторов Ethernet, образующих определенную топологию.

Резервированная сеть управления Mesh предоставляет многочисленные каналы связи между любыми двумя устройствами сети, что обеспечивает высокую надёжность.

Устройствами системы, подключаемыми к коммутаторам, являются:
рабочие станции, подключаемые к коммутаторам без использования интерфейсных модулей;

управляющие процессоры FCP270, напрямую взаимодействующие с подсистемами ввода/вывода;

управляющие процессоры ZCP270, взаимодействующие с подсистемами ввода/вывода через коммуникационный модуль FCM100Et.

В настоящее время системы I/A Series 6-7 и 8 версий несовместимы. Но разрабатывается модуль, который позволит включать в 8 версию системы сегменты, выполненные на шине Nodebus.

Рабочие станции обеспечивают интерфейс между системой и человеком для управления технологическим процессом, а также для конфигурирования и поддержки самой системы управления.

В настоящее время один компьютер способен выполнять все необходимые операции по конфигурированию системы, отображению информации и хранению данных. Тем не менее, в системе I/A Series различают операторские рабочие станции (WP) и инженерные рабочие станции (AW). Компьютер станции AW, как правило, имеет больший объём оперативной памяти по сравнению с компьютером операторской станции WP (1024 Мб и 512 Мб, соответственно).

1.2.6.3. Процессоры и сети в DCS-системах

Задача управляющих процессоров и контроллеров DCS-систем – поддержка большого количества контуров регулирования и логического управления. Большинство контуров критично ко времени выдачи управляющих воздействий. Это предопределяет жесткие требования к процессорным платам, типам процессоров и рабочим частотам, объему оперативной памяти.

Характеристика процессоров системы I/A Series приведена в таблице.

Процессор	CP60	ZCP270	FCP270
Тип процессора	AMD DX5	AMD Elan SC520	AMD Elan 520
Частота, МГц	133	100	100
Память RAM, Мб	8	16 SDRAM	16 SDRAM
Память Flash, Мб	-	32	32
Скорость связи с FBM	2 Мб/с	2 Мб/с	2 Мб/с
Число подключенных модулей	Max 120, по 30 на FCM, по 24 на FBI	Max 120	Max 30

Управляющий процессор C200 (система **PlantScape**) представляет собой двухплатный модуль удвоенной ширины на базе процессора 100 MHz PowerPC 603E с ОЗУ (8 Мбайт) и функцией выявления и исправления ошибок. В качестве постоянной памяти используется ПЗУ (4 Мбайт) с параллельным стиранием и с защитой от ошибок по четности. Встроенная литиевая батарейка служит для сохранения резервной копии базы данных контроллера,

а дополнительный модуль батарей шириной в два слота обеспечивает функцию подзарядки вместо замены литиевой батарейки.

Этими же причинами обусловлены и параметры сетей и шин, применяемых в DCS-системах.

V-net (CENTUM CS3000) - сеть управления реального времени со скоростью обмена данными 10 Мбит/с. Эта сеть объединяет такие компоненты системы управления как станция управления, станция оператора, BCV, CGW.

Сеть может быть зарезервирована. Протяженность сети при соединении со станцией оператора - 185 м, при подключении других устройств - до 500 м. Расширение сети достигается применением повторителей и оптических повторителей (максимум 4), что позволяет удлинить сеть до 20 км.

Система с одной станцией оператора с установленными на ней функциями проектирования не требует сети Ethernet.

С помощью Ethernet можно объединить между собой станцию оператора и инжиниринговую станцию, а также супервизорные системы.

Станции управления типа KFCS, предназначенные для высокоскоростного управления, используют внутреннюю шину ESB для подключения **ЛОКАЛЬНЫХ** узлов ввода/вывода, имеющую скорость обмена 128 Мбит/с.

В последней версии I/A Series центральным компонентом системы является сеть управления Mesh, которая соединяет управляющие процессоры, рабочие станции и подсистемы ввода/вывода в сеть 100Мб/1Гб.

Управляющий процессор FCP270 непосредственно соединен волоконно-оптическим кабелем 100Мб/с Ethernet с сетью управления Mesh.

«Снизу» управляющий процессор FCP270 соединен с полевой шиной без использования интерфейсного модуля FCM. Скорость обмена данными с полевыми устройствами (датчиками, исполнительными механизмами) осуществляется по шине Fieldbus - 2 Мб/с (протокол HDLC).

ControlNet (PlantScape) - это гибкая высокопроизводительная сеть, поддерживающая как супервизорный/равноправный обмен информацией (контроллеры с HMI), так и сетевой ввод/вывод. Это открытая сеть, спецификация которой принадлежит и контролируется ControlNet International, для которой Honeywell является членом-учредителем. Пропускная способность с учетом резервирования составляет 5 Мбит/с и характеризуется возможностью детерминированной передачи данных. С физической точки зрения средства передачи данных представляют собой

коаксиальный кабель с поддержанием шинной топологии типа «магистрالی с ответвлениями».

1.2.6.4. Надежность DCS-систем

CENTUM CS3000. В станции управления могут быть зарезервированы платы CPU, внешние интерфейсы сети V-net, интерфейсные платы шины RIO и внутренняя шина узла. Имеются модели с резервным источником питания.

На каждой процессорной плате находится два процессора (рис. 1.23.). Каждый процессор выполняет одни и те же управляющие вычисления, а результаты вычислений сравниваются между собой. Если результаты согласуются, то они передаются в память и на интерфейсную плату шины.

Если результаты работы процессоров не совпадают, то сравнивающее устройство (компаратор) воспринимает это как нештатную ситуацию и переключается на резервную плату. Резервная процессорная плата выполняет те же самые вычисления, что и основная плата. При переключении ее в активное состояние вычисленные на ней результаты передаются на интерфейсную шину без прерывания процесса управления.

При обнаружении ошибки состояния CPU производится самодиагностика платы, и если аппаратные средства в норме, плата возвращается из нештатного состояния в резервное.

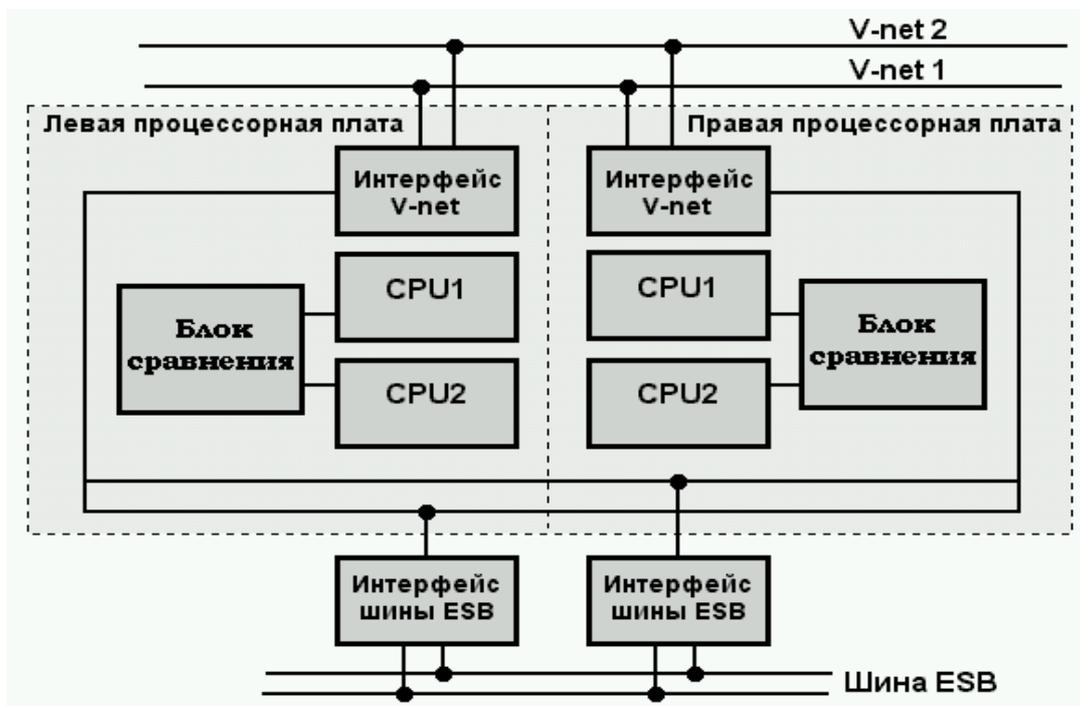


Рисунок 1.23 – Резервирование станции управления системы CENTUM CS3000

I/A Series. Отказоустойчивая версия FCP270 состоит из двух параллельно работающих модулей с двумя отдельными соединениями с сетью управления Mesh. Два модуля управляющего процессора, связанные друг с другом как отказоустойчивая пара, обеспечивают непрерывную работу объекта управления в случае практически любой аппаратной неисправности одного из модулей этой пары.

Оба модуля принимают и обрабатывают информацию одновременно, и неисправности обнаруживаются самими модулями. Одним из важных методов обнаружения неисправности является сравнение коммуникационных сообщений на внешнем интерфейсе модуля. При обнаружении неисправности, коммуникационное сообщение прерывается, и выполняется самодиагностика обоих модулей, чтобы определить, какой из модулей является неисправным. Затем исправный модуль принимает на себя управление, не оказывая влияния на нормальную работу системы. После этого сообщение о прерванном коммуникационном сообщении передается исправным модулем через механизмы повторной передачи коммуникационного протокола.

PlantScape. Резервирование контроллера системы **PlantScape** состоит в использовании двух каркасов с одинаковыми процессорами (рис. 1.24). В соответствии с технологией резервирования определяются ошибки в работе основного процессора, гарантируется синхронизация базы данных, осуществляется безударное переключение.

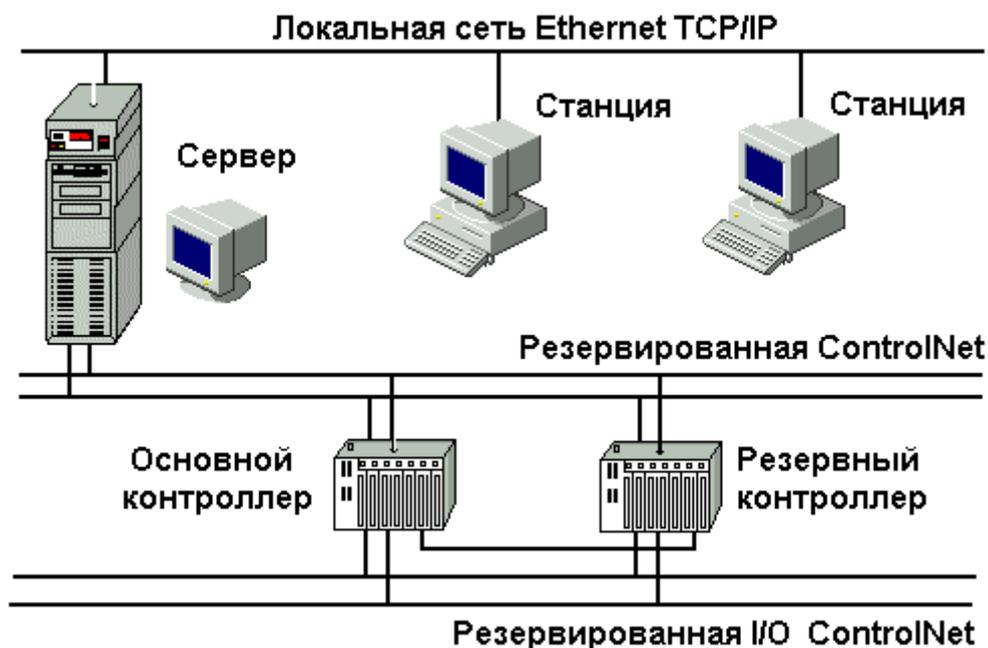


Рисунок 1.24 – Резервирование в системе PlantScape

При конфигурировании резервированного контроллера содержимое каркасов должно быть идентичным и без модулей ввода/вывода. Связь между каркасами осуществляется с помощью модулей резервирования (RM), соединенных между собой оптоволоконным кабелем (скорость обмена - 20Мбит/с). Коммуникационные сети между сервером и контроллером, между контроллером и удаленным вводом/выводом могут быть также зарезервированы (опция). Возможно резервирование и локальной сети.

Итак, комплексная автоматизация технологического процесса может быть решена двумя путями:

- на базе распределенной системы управления (PCU/DCS);
- на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК/PLC) и человеко-машинного интерфейса (ЧМИ/SCADA).

Каждый из этих путей имеет свои положительные и отрицательные стороны.

Подход	Характеристика	+/-
PCU	Очень высокая надежность и степень готовности	+
	Полностью интегрированные инструменты ЧМИ, базы данных и приложения	+
	Оптимальная для непрерывного управления	+

	Дорогая архитектура для многих приложений	-
	Улучшение функциональности сильно усложняет структуру	-
ПЛК с ЧМИ	Привлекательная цена, модульное аппаратное обеспечение	+
	Оптимальная для высокоскоростных логических приложений	+
	Контроллер, ЧМИ и приложение не интегрированы	-
	Не детерминистская, менее современная концепция управления	-
	Нет композитных точек, для каждого параметра используется имя	-

1.6. 1.3. Последовательность создания АСУТП

Общая задача управления технологическим процессом формулируется как задача максимизации (минимизации) некоторого критерия (себестоимости, энергозатраты, прибыли) при выполнении ограничений на технологические параметры, накладываемых регламентом. Решение такой задачи для всего процесса в целом трудоемко или практически невозможно ввиду большого числа факторов, влияющих на ход процесса. Поэтому весь процесс разбивают на отдельные участки, которые характеризуются сравнительно небольшим числом переменных. Обычно эти участки совпадают с законченными технологическими стадиями, для которых могут быть сформулированы свои подзадачи управления, подчиненные общей задаче управления процессом в целом.

Задачи управления отдельными стадиями направлены на оптимизацию (в частном случае, стабилизацию) технологического параметра или критерия, легко вычисляемого по измеренным режимным параметрам (производительность, концентрация продукта, степень превращения, расход энергии). Оптимизацию критерия проводят в рамках ограничений, задаваемых технологическим регламентом. На основании задачи оптимального управления отдельными стадиями процесса формулируют задачи автоматического регулирования технологических параметров для отдельных аппаратов.

Важным этапом в разработке системы автоматизации является анализ основных аппаратов как объектов регулирования, т. е. выявление всех существенных входных и выходных переменных и анализ статических и динамических характеристик каналов возмущения и регулирования.

Исходными данными при этом служат математическая модель процесса и (как первое приближение) статическая модель в виде уравнений материального и теплового балансов. На основе этих уравнений с учетом реальных условий работы аппарата все существенные факторы, влияющие на процесс, разбиваются на следующие группы.

Возмущения, допускающие стабилизацию - это независимые технологические параметры, которые могут испытывать, существенные колебания, однако по условиям работы могут быть стабилизированы с помощью автоматической системы регулирования. К таким параметрам обычно относятся некоторые показатели входных потоков. Так, расход питания можно стабилизировать, если перед аппаратом имеется буферная емкость, сглаживающая колебания расхода на выходе из предыдущего аппарата; стабилизация температуры питания возможна, если перед аппаратом установлен теплообменник, и т. п. При проектировании системы управления целесообразно предусмотреть автоматическую стабилизацию таких возмущений. Это позволит повысить качество управления процессом в целом. В простейших случаях на основе таких систем автоматической стабилизации возмущений строят разомкнутую (относительно основного показателя процесса) систему автоматизации, обеспечивающую устойчивое ведение процесса в рамках технологического регламента.

Контролируемые возмущения – это те возмущения, которые можно измерить, но невозможно или недопустимо стабилизировать (расход питания, подаваемого непосредственно из предыдущего аппарата: температура окружающей среды и т. п.). Наличие существенных нестабилизируемых возмущений требует применения либо замкнутых по основному показателю процесса систем регулирования, либо комбинированных АСР. в которых качество регулирования повышается введением динамической компенсации возмущения.

Неконтролируемые возмущения – возмущения, которые невозможно или нецелесообразно измерять непосредственно. Первые - это падение активности катализатора, изменение коэффициентов тепло- и массопередачи и т.п. Примером тому может служить давление греющего пара в заводской сети, которое колеблется случайным образом и является источником возмущения в тепловых процессах. Выявление возможных неконтролируемых возмущений – важный этап в исследовании процесса и разработке системы управления. Наличие таких возмущений требует, как и в

предыдущем случае, обязательного применения замкнутых по основному показателю процесса систем автоматизации.

Возможные регулирующие воздействия. Это материальные или тепловые потоки, которые можно изменять автоматически для поддержания регулируемых параметров.

Выходные переменные. Из их числа выбирают регулируемые координаты. При построении замкнутых систем регулирования в качестве регулируемых координат выбирают технологические параметры, изменение которых свидетельствует о нарушении материального или теплового баланса в аппарате.

К ним относятся: уровень жидкости – показатель баланса по жидкой фазе; давление – показатель баланса по газовой фазе; температура – показатель теплового баланса в аппарате; концентрация – показатель материального баланса по компоненту.

Анализ возможных регулирующих воздействий и выходных координат объекта позволяет выбрать каналы регулирования для проектируемых ЛСР. При этом в одних случаях решение определяется однозначно, а в других имеется возможность выбора, как регулируемой координаты, так и регулирующего воздействия для заданного выхода. Окончательный выбор каналов регулирования проводят на основе сравнительного анализа статических и динамических характеристик различных каналов. При этом учитывают такие показатели, как коэффициент усиления, время чистого запаздывания, его отношение к наибольшей постоянной времени канала τ/T .

На основе анализа технологического процесса как объекта регулирования проектируют систему автоматизации, обеспечивающую решение поставленной задачи регулирования. Начинают с проектирования одноконтурных АСР отдельных параметров: они наиболее просты в наладке и надежны в работе, поэтому широко используются при автоматизации технологических объектов.

Однако при неблагоприятных динамических характеристиках каналов регулирования (большом чистом запаздывании, большом отношении τ/T) даже в случае оптимальных настроек регуляторов качество переходных процессов в одноконтурных ЛСР может оказаться неудовлетворительным. Для таких объектов анализируют возможность построения многоконтурных ЛСР, в которых качество регулирования можно повысить, усложняя схемы

автоматизации, т.е. применяя каскадные, комбинированные, взаимосвязанные ЛСР.

Окончательное решение о применении той или иной схемы автоматизации принимают после моделирования различных ЛСР и сравнения качества получаемых процессов регулирования.

1.7. 1.4. Вопросы для самопроверки

1. Что представляет собой аппаратная структура современной АСУТП и какие функции на нее возложены?
2. Назначение устройств связи с объектом. Какие функции, возлагают на УСО?
3. Промышленные сети. Какие требования предъявляют к современной организации сетей?
4. Как осуществляется программная реализация систем управления?
5. Как выглядит структура современной АСУТП, и какие функции, с точки зрения теории управления, на нее возлагают?
6. Какие типы полевых шин и их характеристики Вам известны? Примеры протоколов.
7. Проведите классификацию программных средств АСУТП.
8. Что представляют собой операционные системы реального времени?
9. В чем заключаются особенности открытых систем?
10. Что представляет собой SCADA-система? Какие функции возлагаются на оператора?
11. Какие существуют направления на пути создания многоуровневых систем управления и их сравнительная характеристика?
12. Что представляют собой DCS-системы? Их общая характеристика, компоненты, область применения. Примеры.
13. Проведите сравнение характеристик сетей DCS и SCADA-систем.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ УПРАВЛЯЕМЫХ ПРОЦЕССОВ

1.8. 2.1. Линейные многомерные объекты управления

Основой функционирования АСУ ТП являются математические модели технологических процессов. Модель есть некоторое нетождественное представление объекта системы или процесса. Математической моделью объекта (системы) называют его описание на каком-либо формальном математическом языке (алгебраические, дифференциальные и интегральные уравнения с соответствующими начальными и краевыми условиями), позволяющее выносить суждение о некоторых параметрах объекта при проведении формальных процедур над его описанием. При автоматизации технологических процессов математическая модель дает возможность рассчитывать различные выходные параметры процесса и соответствующие управляющие воздействия.

2.1.1. Математические модели процессов

Для построения современной высокоэффективной системы управления необходимо, как правило, иметь описание объекта управления в виде математической модели. В классической теории автоматического регулирования использовались модели вида

$$y(s) = g(s)u(s) + g_d(s)f(s),$$

где $y(s)$, $u(s)$ и $f(s)$ – преобразования Лапласа выхода $y(t)$, управления $u(t)$ и контролируемого возмущения $f(s)$, а $g(s)$ и $g_d(s)$ — передаточные функции по управлению и по возмущению соответственно (рисунок 2.1). Однако для многих процессов необходимо использовать значительно более сложные модели рассмотрим некоторые из них.

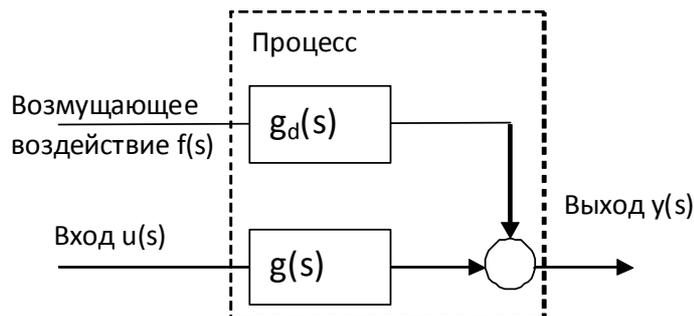


Рисунок 2.1 – Линейная система с одним входом и одним выходом (одномерная линейная система)

Для описания линейных многомерных объектов с *сосредоточенными параметрами*¹ используются системы линейных обыкновенных дифференциальных уравнений или соответствующие изображения по Лапласу.

Многомерный объект управления характеризуется существованием нескольких входов (точек приложения управляющих и возмущающих воздействий) и нескольких выходов, определяемых управляемыми величинами. Наряду с понятием многомерного объекта иногда применяют – *многосвязный объект. Отличительной особенностью многосвязных объектов является то, что каждая выходная, управляемая величина зависит не от одной, а от нескольких входных, управляющих величин, а также нескольких возмущений.*

Простейший пример многомерной (многосвязной) модели с сосредоточенными параметрами – это обобщение модели в виде одномерной передаточной функции (рис. 2.1) на случаи нескольких входов и выходов (рис. 2.2).

На рисунке 2.2 показана система с k возмущениями, m входами и q выходами, связанными зависимостью

$$\bar{y}(s) = G(s)\bar{u}(s) + G_d(s)\bar{f}(s), \quad (2.1)$$

где $\bar{y}(s), \bar{u}(s), \bar{f}(s)$ – векторы, а $G(s)$ и $G_d(s)$ – матрицы

¹ Термином «сосредоточенные параметры» характеризуются объекты управления, в которых отсутствует зависимость переменных состояния, управления и т. п. от пространственных координат.

соответствующих размерностей:

$$\bar{y}(s) = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_q \end{bmatrix}, \bar{u}(s) = \begin{bmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_m \end{bmatrix}, \bar{f}(s) = \begin{bmatrix} f_1 \\ \dots \\ f_k \end{bmatrix},$$

$$G(s) = \begin{pmatrix} g_{11}(s) & \dots & g_{1m}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{q1}(s) & \dots & g_{qm}(s) \end{pmatrix}, G_d(s) = \begin{pmatrix} g_{11d}(s) & \dots & g_{1md}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{q1d}(s) & \dots & g_{qmd}(s) \end{pmatrix}.$$

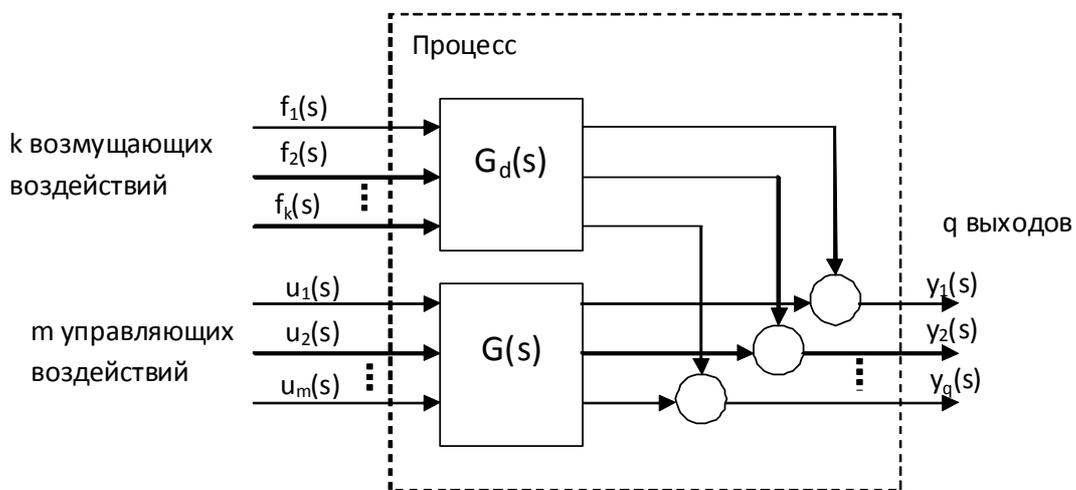


Рисунок 2.2 – Многомерная (многосвязная) линейная система с k возмущающими воздействиями, m управлениями и q выходами

Эквивалентной вышеприведенной модели линейной системы с сосредоточенными параметрами является модель во временной области

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + Df(t), x(t_0) = x_0, \quad (2.2)$$

$$y = Cx(t), \quad (2.3)$$

где $x_i(t)$ — переменные состояния, $i = 1, 2, \dots, n$; $y_j(t)$ — наблюдаемые выходы, $j = 1, 2, \dots, q$; $u_r(t)$ — входы или управления, $r = 1, 2, \dots, m$; $f_s(t)$ — возмущения, $s = 1, 2, \dots, k$.

Частотное (2.1) или временное [см. (2.2), (2.3)] представления выбираются из соображений удобства, так как в случае постоянных матриц A , B , C и D они эквивалентны.

Для построения подобных моделей можно использовать два пути: применять фундаментальные физические соотношения и виде (дифференциальных) законов сохранения вещества, энергии и т. д. или восстанавливать параметры моделей по эмпирическим данным, причем второй путь чаще применяется на практике. Какие бы соображения ни использовались при построении моделей рассматриваемого класса, ими могут быть описаны многие реальные объекты управления.

Пример 2.1. В качестве примера отличия многомерного и многосвязного объектов рассмотрим систему уравнений

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4 + u_1, \\ \dot{x}_2 &= a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4 + a_{25}x_5 + u_2, \\ \dot{x}_3 &= a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{34}x_4 + a_{35}x_5 + u_1, \\ \dot{x}_4 &= a_{42}x_2 + a_{43}x_3 + a_{44}x_4, \\ \dot{x}_5 &= a_{52}x_2 + a_{54}x_4 + a_{55}x_5 + u_2, \\ y_1 &= x_1, \\ y_2 &= x_5.\end{aligned}$$

Однозначно можно сказать, что объект является многомерным, поскольку на объект действуют два входных управляющих воздействия u_1, u_2 и есть два выходных параметра y_1 и y_2 . Однако сразу сложно понять, является ли объект многосвязным. 3. Объединим уравнения, содержащие управление u_1 , в одну подсистему, а управление u_2 – в другую. При этом уравнение, не содержащее управление, включим в подсистему, содержащую управление u_1 :

$$\begin{aligned}S_1 &\left\{ \begin{aligned}\dot{x}_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4 + u_1, \\ \dot{x}_3 &= a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{34}x_4 + a_{35}x_5 + u_1, \\ \dot{x}_4 &= a_{42}x_2 + a_{43}x_3 + a_{44}x_4, \\ y_1 &= x_1.\end{aligned}\right. \\ S_2 &\left\{ \begin{aligned}\dot{x}_2 &= a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4 + a_{25}x_5 + u_2, \\ \dot{x}_5 &= a_{52}x_2 + a_{54}x_4 + a_{55}x_5 + u_2, \\ y_2 &= x_5.\end{aligned}\right.\end{aligned}$$

После разделения на подсистемы видно, что объект действительно

является многосвязным, поскольку видно взаимное влияние перекрестных связей подсистем друг на друга через соответствующие переменные. Пусть в этой же системе коэффициенты $a_{12}, a_{32}, a_{35}, a_{42}, a_{23}, a_{24}, a_{54}$ равны нулю. В таком случае объект уже не будет являться многосвязным. Таким образом, можно сделать обобщающий вывод: всякий многосвязный объект естественно является многомерным, однако не каждый многомерный объект может быть многосвязным.

2.1.2. Типовые многосвязные объекты управления

Рассмотрим несколько примеров реальных многосвязных объектов.

Воздушно водяной скруббер (ВВС) как объект управления является наиболее простым примером многосвязной системы (рис. 2.3). Назначение ВВС – охлаждение сжатого воздуха после компрессора.

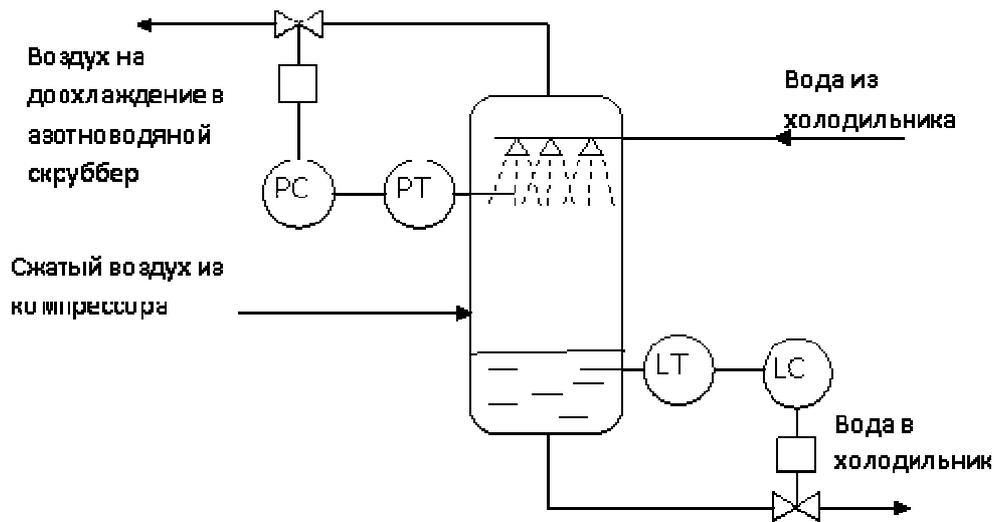


Рисунок 2.3.– Схема управления ВВС

Взаимодействие возникает, например, когда один регулятор регулирует давление в скруббере, а другой – воздействует на уровень жидкости из скруббера. При увеличении уровня жидкости газ в резервуаре сжимается, поэтому структурная схема системы регулирования давления должна включать изменения уровня в качестве возмущения по нагрузке. Возрастание давления приводит к увеличению расхода жидкости из резервуара; таким образом, изменение давления является возмущением для системы

регулирования уровня. В рассматриваемой системе имеет место некоторое саморегулирование, так как более высокое давление, возникшее в результате внезапного увеличения уровня, стремится увеличить расход как жидкости, так и газа.

Паровой котел как объект управления представляет собой более сложную динамическую систему с несколькими взаимосвязанными входными и выходными величинами (рис. 2.4). Однако явно выраженная направленность участков регулирования по основным каналам регулирующих воздействий, таким как расход питательной воды $D_{п.в.}$ — уровень $H_б$, расход воды на впрыск $D_{впр}$ — температура перегретого пара $t_{п.п}$, расход топлива B_T — давление перегретого пара $p_{п.п}$ и др. позволяет осуществлять стабилизацию регулируемых величин с помощью независимых одноконтурных систем, связанных лишь через объект управления. При этом регулирующее воздействие того или иного участка (сплошные линии на рисунке 2.4) служит основным способом стабилизации регулируемой величины, а другие воздействия (пунктирные линии) считаются по отношению к этому участку внутренними или внешними возмущениями.

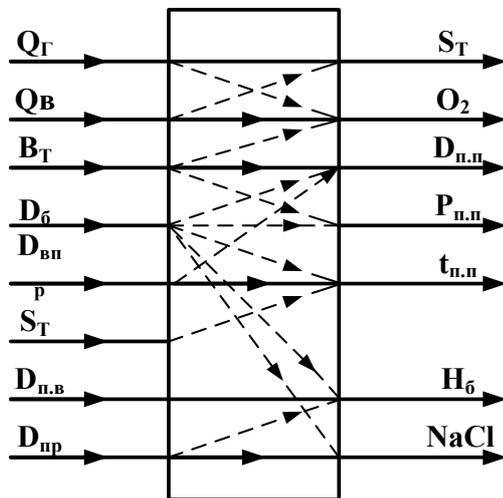


Рисунок 2.4 – Схема взаимосвязей между выходными и входными величинами в барабанном котле

Управляемый процесс парообразования (рис. 2.5) происходит в подъемных трубах циркуляционного контура, снабжающихся водой из опускных труб и экранирующих камерную топку T , в которой сжигается

топливо V_T . Для поддержания процесса горения с заданным коэффициентом избытка α в топку нагнетается вентилятором ДВ воздух Q_v , предварительно нагретый в воздухоподогревателе ВП.

Дымовые газы $Q_{дг}$, образовавшиеся в результате процесса горения, отсасываются из топки дымососом ДС. Они проходят через поверхности нагрева экономайзера ВЭ, воздухонагревателя ВП и удаляются в атмосферу через дымовую трубу. Насыщенный пар из барабана Б поступает в пароперегреватель П1, П2, где перегревается до требуемой температуры за счет радиации факела и конвективного обогрева топочными газами.

Основные регулируемые величины котла — расход перегретого пара $D_{пп}$, давление $p_{пп}$ и температура $t_{пп}$.

При этом расход пара может изменяться в широком диапазоне, а давление и температура поддерживаются в сравнительно узких пределах допустимых отклонений, что обуславливается требованиями заданного режима работы турбины или иного потребителя теплоты.

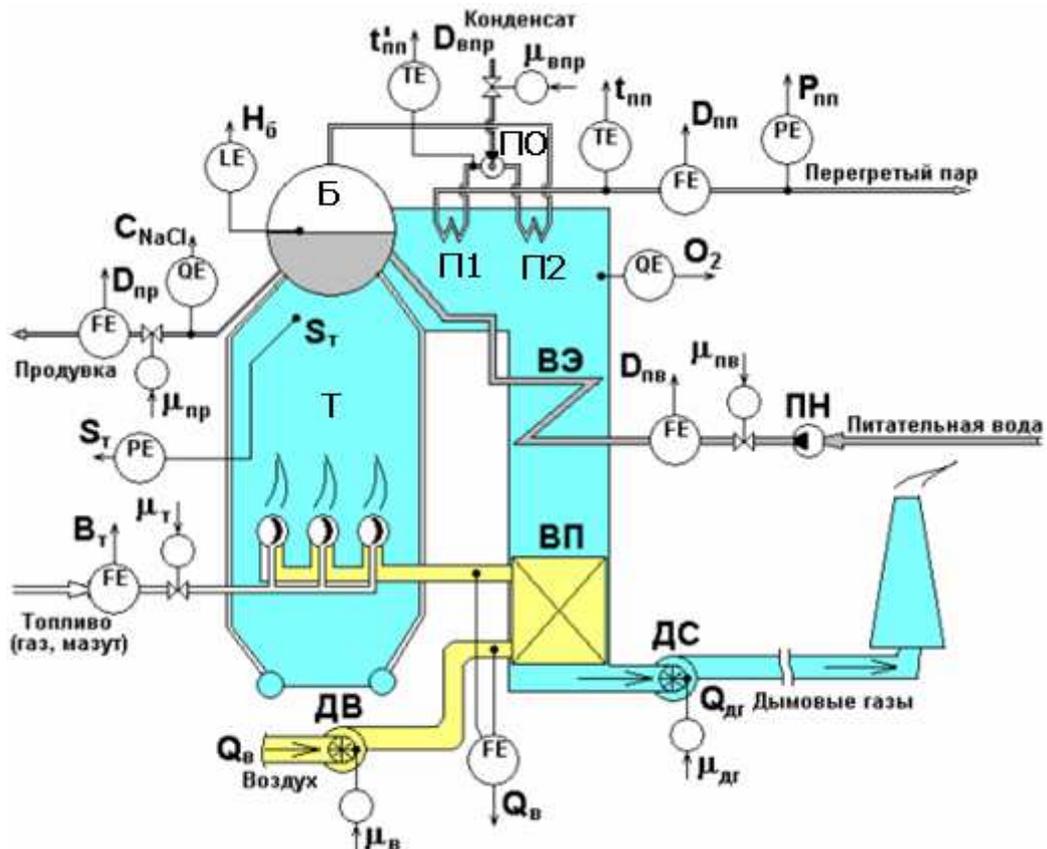


Рисунок 2.5 – Технологическая схема барабанного котла

Температура перегрева пара может поддерживаться вблизи заданного значения, например, посредством изменения расхода охлаждающей воды $D_{впр}$ на пароохладитель ПО. Давление пара отклоняется от заданного значения во всех случаях небаланса между количествами потребляемого пара $D_{пп}$ и генерируемого (вырабатываемого) в экранных трубах D_6 . Небаланс устраняется посредством регулирования тепловыделения в топке, главным образом изменением подачи топлива. Кроме названных, следует поддерживать в пределах допустимых отклонений следующие величины: уровень воды в барабане H_6 (регулируется изменением подачи питательной воды $D_{пв}$); разрежение в верхней части топки S_T (регулируется изменением производительности дымососов, отсасывающих дымовые газы из топки); оптимальный избыток воздуха за пароперегревателем α (регулируется изменением производительности дутьевых вентиляторов, нагнетающих воздух в топку); солесодержание котловой воды в пересчете на NaCl (регулируется изменением расхода воды $D_{пр}$, выпускаемой из барабана и сепаратора непрерывной продувки).

Система автоматического регулирования барабанного парового котла в целом может состоять из отдельных замкнутых систем: 1) по давлению перегретого пара $p_{пп}$ и тепловой нагрузки D_q ; 2) по избытку воздуха в топке, определяемого содержанием O_2 за пароперегревателем,— экономичности процесса горения; 3) по разрежению в верхней части топки S_T ; 4) по температуре перегретого пара; 5) по питанию котловой водой; 6) по качеству котловой воды.

Однако настройки регуляторов, которые выбраны для индивидуально действующих контуров, могут привести к раскачке при одновременной работе всех регуляторов. Эффект взаимодействия особенно велик, когда два или более контура имеют почти одинаковые критические частоты.

Среди многообразия существующих многомерных систем (объектов) можно выделить еще один класс – это однотипные связанные системы.

Многосвязная однотипная система автоматического регулирования состоит из нескольких одинаковых сепаратных систем с перекрестными связями между ними. Таким образом, основным признаком, отличающим

однотипные связанные системы от многосвязных систем других типов, является то, что основные каналы передачи воздействий в объекте одинаковы. Это обстоятельство имеет место в одинаковых агрегатах, объединенных для совместной работы (и в совокупности с объединяющими агрегаты технологическими линиями составляющих объект регулирования), либо в едином объекте симметричной конструкции при регулировании координат объект в симметричных относительно друг друга его частях и т.д. Идентичность регулируемых каналов служит обоснованием, хотя и нестрогим, для их оснащения одинаковыми регуляторами.

Перекрестные связи между сепаратными системами могут действовать либо в объекте, либо в многосвязном регуляторе. В первом случае они отражают существующее взаимодействие между сепаратными системами регулирования через общие источники сырья, энергии, через общую нагрузку и т. д. Во втором случае между сепаратными системами накладываются связи для координации их действий.

При исследовании однотипных связанных систем естественно считать уравнения идентичных по конструкции элементов сепаратных систем совпадающими, пренебрегая их неизбежными индивидуальными отличиями. При этом особенности уравнений определяются характером действующих между сепаратными системами перекрестных связей, их физической природой. Рассмотрим несколько примеров, отличающихся характером перекрестных связей, получим уравнения этих систем, что позволит в дальнейшем провести некоторые обобщения.

Перекрестные связи между системами автоматического регулирования одинаковых параллельных агрегатов могут действовать через общие источники сырья или энергии или через общую нагрузку.

Примером подобного типа объектов является, например, работа параллельно действующих агрегатов, в системе регулирования с общим регулятором, воздействующим на сепаратные САР. Таковым является главный регулятор давления пара в коллекторе котельной, воздействующий на системы регулирования параллельно работающих котельных агрегатов (рис. 2.6); корректоры частоты и напряжения на шинах параллельных

электрических генераторов автономных систем электроснабжения; регулятор давления газа в общем трубопроводе при параллельной работе нагнетателей и др.

Перемещение любого из регулирующих органов (рис. 2.6), например $V_{T,1}$, во-первых, вызывает реакцию соответствующей регулируемой переменной (например, $P_{K,1}$) и, во-вторых, приводит к изменению гидравлического режима коллектора. В рассматриваемом случае соседние агрегаты воспринимают воздействие как пришедшие со стороны нагрузки, так что формы процессов на возмущаемом и любом из соседних агрегатов различны.

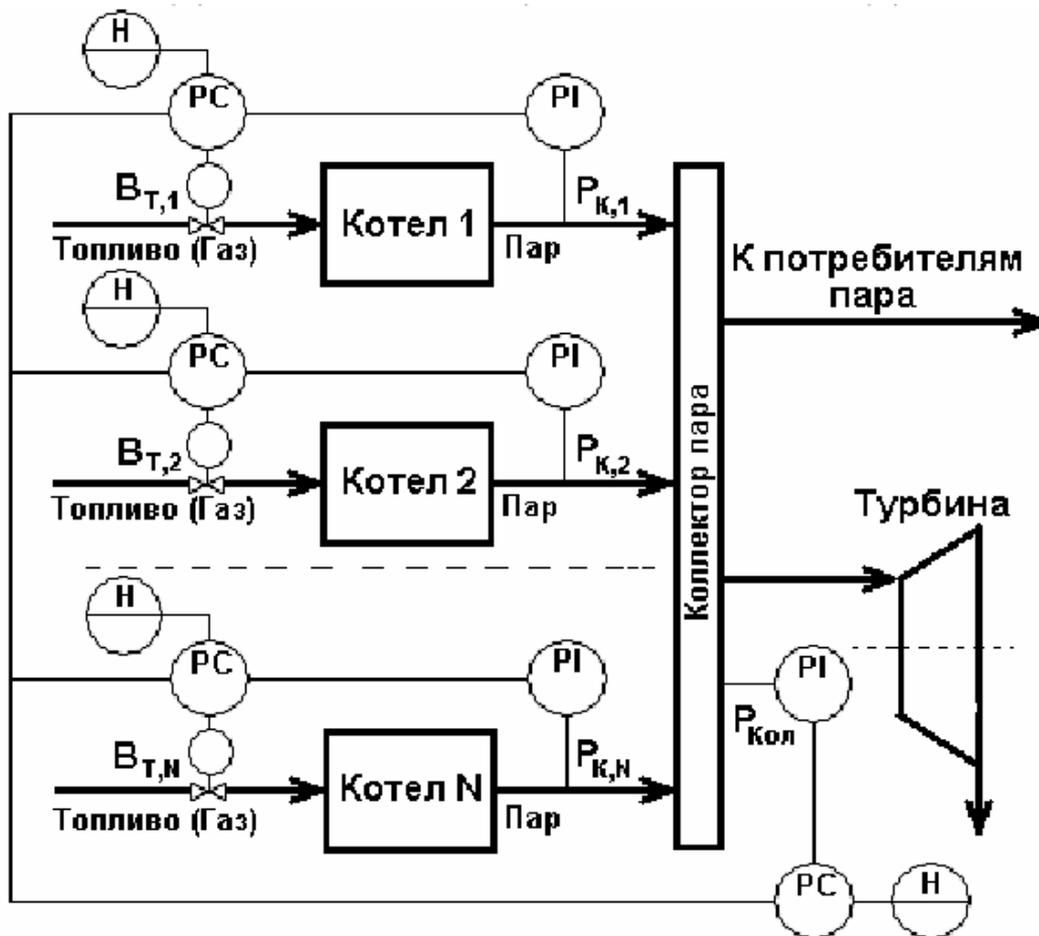


Рисунок 2.6 – Технологическая схема работы нескольких котлоагрегатов на общую нагрузку

Еще одним примером может служить система автоматического распределения дутья по фурмам доменной печи, задача которой – обеспечить

заданное распределение расхода горячего воздуха, вводимого в верхнюю часть горна доменной печи через воздухопроводы (фурмы), по ее периметру (рис. 2.7). Воздух (дутье) подается на верх горна через ряд (обычно 14 – 20) параллельных вводов – фурм. По технологическим причинам дутье распределяется между фурмами неравномерно, что нарушает нормальный ход доменного процесса. Взаимовлияние между регулируемыми каналами определяется в этом случае общим регулируемым источником воздуха (воздуходувкой) и распределенным по объему доменной печи гидравлическим сопротивлением шихты и расплавов.

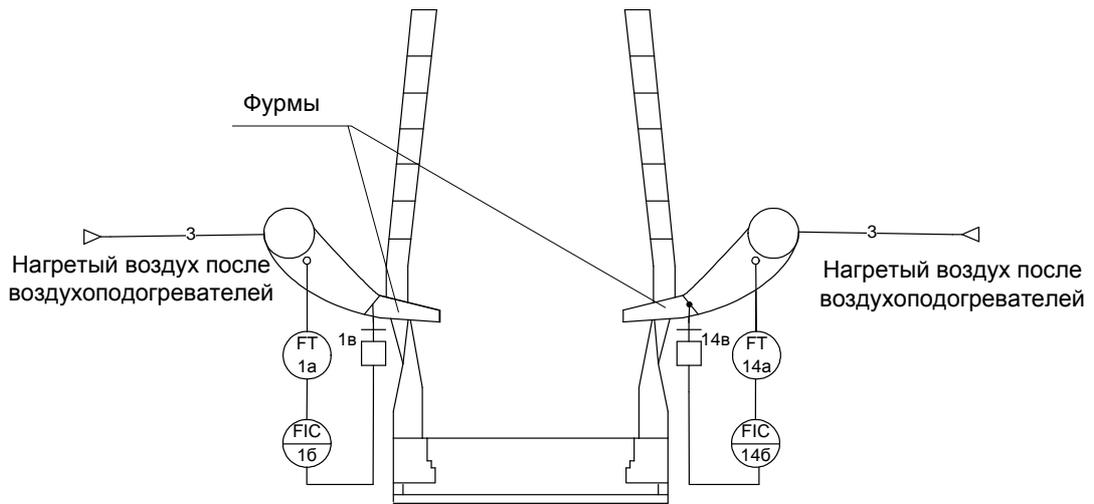


Рисунок 2.7 – Схема системы автоматического распределения дутья по фурмам доменной печи

Таким образом, объект регулирования – система фурм – представляет собой совокупность идентичных регулируемых каналов, *взаимосвязанных* через общую гидравлическую сеть.

1.9. 2.2. Представление во временной и частотной областях

Одна из наиболее типичных задач при управлении технологическими процессами – синтез многомерных систем управления. Если рассматриваемая модель линейна, то ее можно представить в виде следующей системы уравнений в пространстве состояний (во временной области)

$$\dot{x} = Ax + Bu, x(t_0) = x_0, \quad (2.4)$$

$$y = Cx + Du, \quad (2.5)$$

где x – n -мерный вектор состояний, u – m -мерный вектор управлений, y – q -мерный вектор наблюдений (выхода), а матрицы A , B , C , D соответствующих размерностей в общем случае с изменяющимися во времени элементами. В случае автономной системы матрицы не зависят от времени и их элементы являются постоянными параметрами.

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_q \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{1m} \\ \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & \dots & b_{nm} \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ c_{q1} & \dots & c_{qn} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1m} \\ \dots & \dots & \dots \\ d_{q1} & \dots & d_{qm} \end{bmatrix}.$$

Эта модель системы в пространстве состояний будет является основой для последующего анализа.

Также модель линейной системы можно представить в области комплексной частотной переменной s , т.е. в частотной области

$$\bar{y}(s) = G(s)\bar{u}(s). \quad (2.6)$$

В выражении (2.6) черта сверху обозначает преобразование Лапласа соответствующей функции времени; $G(s)$ – матричная передаточная функция, связывающая управление $\bar{u}(s)$ с выходом $\bar{y}(s)$, иногда ее также называют передаточной матрицей, и записывают ее в виде

$$G(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & \dots & g_{1m}(s) \\ \dots & \dots & \dots \\ g_{q1}(s) & \dots & g_{qm}(s) \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Следует отметить, что представление в частотной области не содержит аналога вектора состояния x .

Поскольку одни методы синтеза систем управления проще реализуются во временной области, а другие – в частотной, проектировщик должен уметь быстро переходить от одного представления к другому.

Переход от представления (2.4)–(2.5) к представлению (2.6) единственен, он осуществляется применением преобразования Лапласа к уравнениям (2.4) и (2.5) с нулевыми начальными условиями ($x_0 = 0$)

$$\bar{y}(s) = C(sE - A)^{-1} B\bar{u}(s) + D\bar{u}(s), \quad (2.8)$$

откуда

$$G(s) = C(sE - A)^{-1} B + D. \quad (2.9)$$

Обратный переход к временному представлению значительно сложнее. Это объясняется следующими причинами: 1) обратный переход не единственен, так как в общем случае представление в пространстве состояний содержит больше информации, чем просто передаточная функция; по одной и той же передаточной функции (2.8) можно построить целое семейство уравнений (2.4)–(2.5); 2) из всех возможных систем в пространстве состояний, соответствующих заданной передаточной функции (2.8), обычно выбирают минимальную реализацию, т.е. систему с наименьшей размерностью пространства состояний, хотя и в этом случае неединственность остается, так как есть много способов построения минимальной реализации. Рассмотрим один из наиболее эффективных алгоритмов построения минимальной реализации в случае различных действительных полюсов передаточной функции.

Разложим передаточную матрицу $G(s)$ на простейшие

$$G(s) = \sum_{i=1}^p \frac{M_i}{s + \lambda_i}, \quad (2.10)$$

где $-\lambda_i (i=1, 2, \dots, p)$ – полюса $G(s)$, $M_i - (q \times m)$ – матричные вычеты в этих полюсах, задаваемые выражением

$$M_i = \lim_{s \rightarrow -\lambda_i} [(s + \lambda_i)G(s)]. \quad (2.11)$$

Если n_i – ранг матрицы M_i , то размерность пространства состояний минимальной реализации есть

$$n = \sum_{i=1}^p n_i$$

Построение матриц A , B и C можно выполнить несколькими различными способами, причем результат будет не однозначен. Оптимальное решение – задание квазидиагональной структуры матрицы A .

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & A_{pp} \end{pmatrix}, \quad (2.12)$$

где $A_{ii} = -\lambda_i E_{n_i}$ – диагональные субматрицы, E_{n_i} – единичная матрица размерности n_i .

Матрицы B и C найдем из соображений, что диагональная матрица A приводит к диагональной матрице $(sE - A)^{-1}$, и, следовательно, уравнение (2.9) может быть записано в виде (2.10) с матрицами M_i , вычисляемыми только по элементам B и C

$$M_i = \sum_{j=1}^{n_i} c_{ij} b_{ij}^T, \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad (2.13)$$

где c_{ij} – вектор размерности q , b_{ij} – вектор размерности m .

В этом случае столбцы матриц B^T и C строятся из векторов b_{ij} и c_{ij} по правилу

$$B = \begin{bmatrix} b_{11}^T \\ \vdots \\ b_{1n_1}^T \\ \dots \\ \vdots \\ \dots \\ b_{p1}^T \\ \vdots \\ b_{pn_p}^T \end{bmatrix}, \quad C = \left[c_{11} \quad \dots \quad c_{1n_1} \mid \dots \mid c_{p1} \quad \dots \quad c_{pn_p} \right] \quad (2.14)$$

Пример 2.2. Пусть объект задан передаточной функцией

$$G(s) = \begin{pmatrix} \frac{1}{10s+1} & 0 \\ \frac{0.5}{7s+1} & \frac{2}{2s+1} \end{pmatrix}.$$

Согласно (2.10) получаем разложение на простейшие дроби

$$G(s) = \frac{1}{s + \frac{1}{10}} \cdot \begin{vmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \frac{1}{s+7} \cdot \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ \frac{0.5}{7} & 0 \end{vmatrix} + \frac{1}{s+2} \cdot \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

С полюсами $\lambda_1 = -\frac{1}{10}$; $\lambda_2 = -\frac{1}{7}$; $\lambda_3 = -\frac{1}{2}$. Определим ранги матричных вычетов M_1, M_2, M_3 , получим $n_1 = 1, n_2 = 1, n_3 = 1$, откуда размерность пространства состояний минимальной реализации $n = 1 + 1 + 1 = 3$.

Используя диагональную форму A

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{10} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{7} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2} \end{bmatrix},$$

представим M_i в виде суммы (2.13)

$$M_1 = \begin{vmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0,1 & 0 \end{vmatrix},$$

$$M_2 = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0,5 & 0 \\ 7 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0,07 & 0 \end{vmatrix},$$

$$M_3 = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 & 1 \end{vmatrix},$$

откуда C и B

$$C = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{vmatrix}, \quad B = \begin{vmatrix} 0.1 & 0 \\ 0.07 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

1.10. 2.3. Структурные схемы многомерных систем управления

Теперь, когда в нашем распоряжении имеется достаточно простой аппарат перехода от временного представления линейных многомерных систем с постоянными коэффициентами к частотному их представлению и обратно, займемся анализом многомерных систем управления с обратными связями. В начале рассмотрим простую многомерную структурную схему, показанную на рисунке 2.8. В частотной области выход определяется управляющими и возмущающими воздействиями согласно выражению

$$\bar{y}(s) = G(s)\bar{u}(s) + G_d(s)\bar{f}(s), \quad (2.15)$$

где $G(s), G_d(s)$ – матричные передаточные функции системы по управлению и по возмущению, определенные в (2.7), причем элементы этих матриц задаются выражением¹

$$g_{ij}(s) = \frac{k_{ij} \prod_p (s + \eta_{ij}^p)}{\prod_p (s + \lambda_{ij}^p)}, \quad (2.16)$$

где k_{ij} – коэффициент усиления, (η_{ij}^p) – нули передаточной функции², (λ_{ij}^p) – полюса передаточной функции³.

¹ Как будет рассмотрено в гл.5, иногда эти элементы передаточной матрицы содержат запаздывания.

² Нули — это корни полинома числителя передаточной функции.

³ Полюса— это корни полинома знаменателя передаточной функции

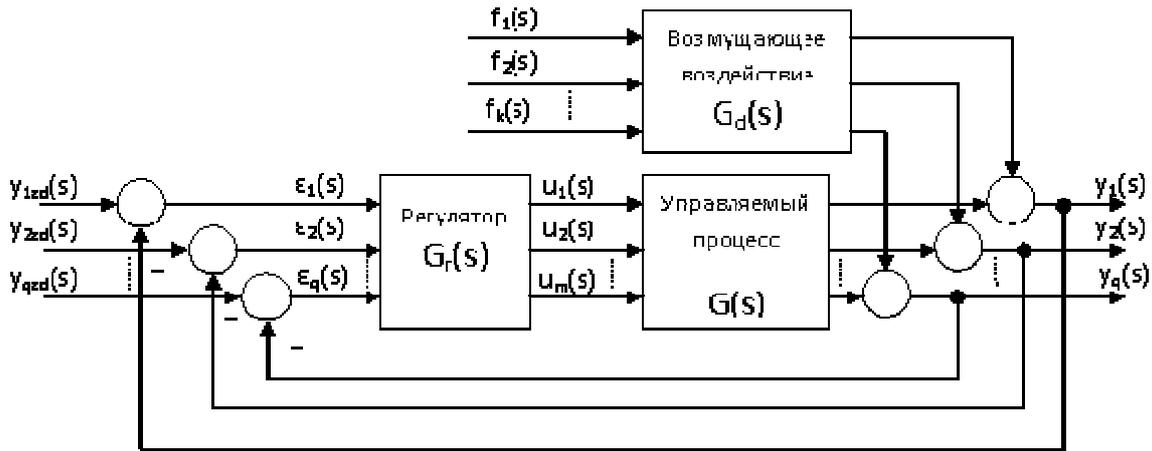


Рисунок 2.8 – Схема многомерной системы регулирования

Эта же самая структурная схема справедлива и для временного представления, однако при этом G и G_d имеют смысл некоторых интегральных операторов. На структурной схеме (рис. 2.8) показан также многомерный регулятор G_r . Матрица G_r может быть произвольной, однако на практике чаще встречается диагональный случай

$$G_r = \begin{vmatrix} g_{r_{11}} & & & 0 \\ & g_{r_{22}} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & g_{r_{mm}} \end{vmatrix}, \quad (2.17)$$

при этом элементы $g_{r_{ii}}$, соответствующие одноконтурным (одномерным) регуляторам, как правило, задают ПИД-закон в частотной области

$$g_{r_{ii}} = k_{pi} \left(1 + \frac{1}{T_{ui}s} + T_{di}s \right), \quad i = 1, 2, \dots, q,$$

или во временной области

$$u_i(t) = k_{pi} \left(\epsilon_i + \frac{1}{T_{ui}} \int \epsilon_i dt + T_{di} \frac{d\epsilon_i}{dt} \right).$$

Здесь ошибка или рассогласование определяется по выражению

$$\epsilon_i(t) = y_{i,zd}(t) - y_i(t).$$

Таким образом, структурные схемы, подобные той, которая изображена на рисунке 2.7, представляют замкнутые линейные системы регулирования как во временной, так и в частотной области.

Операторное уравнение замкнутой системы получается подстановкой в уравнение разомкнутой системы

$$y = G_r \cdot G \cdot \varepsilon + G_d f \quad (2.18)$$

выражения для ошибки

$$\varepsilon = y_{zd} - y, \quad (2.19)$$

где ε – q-мерный вектор отклонения фактического выхода от заданного y_{zd} , f – k-мерный вектор возмущений. Подстановка (2.19) в (2.18) дает

$$y = (E + G \cdot G_r)^{-1} \cdot (G \cdot G_r y_{zd} + G_d f) \quad (2.20)$$

или после упрощения

$$y = T y_{zd} + T_d f, \quad (2.21)$$

где T и T_d – передаточные функции замкнутой системы по управлению и возмущению соответственно

$$T = (E + G \cdot G_r)^{-1} \cdot G \cdot G_r, \quad (2.22)$$

$$T_d = (E + G \cdot G_r)^{-1} \cdot G_d. \quad (2.23)$$

1.11. 2.4. Вопросы для самопроверки

2. Какие способы математического описания технологических процессов Вы знаете?
3. Охарактеризуйте многомерный объект управления. Приведите пример многомерного объекта (процесса).
4. Охарактеризуйте однопольный связанный объект управления. Приведите пример такого объекта. Что представляют собой сепаратные системы?
5. В чем заключаются сложности перехода при представлении математической модели процесса из частотной области к временной?
6. Приведите схему многомерной системы управления с обратными связями.

3. АНАЛИЗ МНОГОМЕРНЫХ СИСТЕМ

Прежде чем переходить к рассмотрению основных методов синтеза регуляторов, рассмотрим некоторые основные концепции, связанные с поведением управляемых систем.

6.4. 3.1. Управляемость

Весьма существенным при анализе систем управления является понятие управляемости. Неформально система управляема, если найдется такое управление $u(t)$, которое обеспечивает ее перевод из произвольного начального состояния x_0 в произвольное же состояние x_d за конечное время. Более строго определение управляемости может быть сформулировано следующим образом.

Система называется *полностью управляемой*, если из любого начального состояния $x_0(t_0)$ она может быть переведена в любое наперед заданное состояние $x_d(t)$ с помощью некоторого управления $u(t)$ за конечное время $t-t_0 \geq 0$.

Возможен случай *частично управляемой системы*, т.е. системы, имеющих подмножества начальных состояний, из которых достижение произвольного желаемого состояния за конечное время невозможно.

Из этого дескриптивного определения для конкретных классов систем можно получить конструктивные условия управляемости. Так, в случае постоянных матриц A и B система (2.4)-(2.5) будет полностью управляема тогда и только тогда, когда ранг¹ ($n \times nm$) матрицы управляемости L_c равен n , где

$$L_c = [B : AB : A^2B : \dots : A^{n-1}B]. \quad (3.1)$$

Управляемость по выходам будет обеспечиваться в том случае, когда управление $u(t)$ будет влиять на все q выходов $y(t)$, т.е. когда равен q ранг соответствующей матрицы управляемости L_c^0 :

$$L_c^0 = [CB : CAB : \dots : CA^{n-1}B]. \quad (3.2)$$

Рассмотрим эту проблему на простых примерах.

¹ Ранг матрицы — наивысший из порядков миноров этой матрицы, отличных от нуля

Пример 3.1. Объект описывается уравнениями

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -a_{11}x_1 + u_1; \\ \dot{x}_2 &= a_{12}x_1 - a_{22}x_2 + u_2.\end{aligned}$$

Определить является ли объект управляемым. Следовательно, имеем

$$A = \begin{bmatrix} -a_{11} & 0 \\ a_{12} & -a_{22} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, AB = \begin{bmatrix} -a_{11} & 0 \\ a_{12} & -a_{22} \end{bmatrix}.$$

Тогда согласно (3.1)

$$L_c = \left[\begin{array}{cc|cc} 1 & 0 & -a_{11} & 0 \\ 0 & 1 & a_{12} & -a_{22} \end{array} \right].$$

Очевидно, что ранг L_c равен 2, поэтому система полностью управляема.

Пример 3.2. Уравнение объекта имеет вид

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 + u, \\ \dot{x}_2 &= -x_2\end{aligned}$$

Здесь имеем

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, AB = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

получаем

$$L_c = \left[\begin{array}{c|c} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \right],$$

$\text{rank}(L_c) = 1$, т.е. система не будет управляемой.

Пример 3.3. Задан объект с двумя входами

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 - u_1 + u_2, \\ \dot{x}_2 &= x_1 + 2x_2 + 2u_2.\end{aligned}$$

В этой системе

$$\begin{aligned}A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}, AB = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ -1 & 5 \end{bmatrix}, \\ L_c &= [B:AB] = \left[\begin{array}{cc|cc} -1 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & -1 & 5 \end{array} \right].\end{aligned}$$

Ранг этой матрицы равен 2. Объект полностью управляем.

6.5. 3.2. Стабилизируемость

Значительно более слабым, чем управляемость, является свойство стабилизируемости. Оно заключается в том, что воздействием регулятора в цепи обратной связи все неустойчивые моды или собственные векторы управляемой системы могут быть сделаны устойчивыми, т.е. все положительные вещественные части собственных чисел могут быть сделаны отрицательными. Ясно, что устойчивая система, т.е. такая система, у которой все собственные числа имеют отрицательные вещественные части, стабилизируема тривиальным образом (без регулятора). Кроме того, понятно, что всякая управляемая система стабилизируема.

Рассмотрим случай линейного регулятора с постоянными коэффициентами, задаваемого в пространстве состояний выражением

$$U(t) = -Kx(t),$$

где K есть $(m \times n)$ – матрица обратной связи. Система (2.4) с таким регулятором приводится к виду

$$\frac{dx}{dt} = (A - BK)x,$$

откуда следует, что стабилизируемость будет иметь место тогда и только тогда, когда можно выбрать матрицу обратной связи K так, что все собственные числа матрицы $(A - BK)$ имеют отрицательные вещественные части. Если рассматривается случай регулирования по выходам, т.е.

$$u(t) = -Ky(t),$$

то система (2.4)-(2.5), для простоты будем полагать матрицу $D = [0]$, приводится к виду

$$\frac{dx}{dt} = (A - BKC)x.$$

В этом случае стабилизируемость обеспечивается таким выбором матрицы K , который гарантирует отрицательность всех действительных частей собственных чисел матрицы $(A - BKC)$.

Подытожим теперь основные свойства понятий управляемости и стабилизируемости, выявленные при рассмотрении примеров. Система управления всегда может быть построена для вполне управляемого объекта и

не всегда для объекта, таковым не являющимся. Если управляемый процесс стабилизируем, а неуправляемые собственные значения (моды) имеют достаточно большие по модулю отрицательные действительные части, все еще возможно построить эффективную систему управления. Однако, если управляемый процесс не является даже стабилизируемым, управление невозможно.

6.6. 3.3. Нормализуемость

Наиболее сильная форма управляемости называется нормализуемостью. Говорят, что система является *нормализуемой*, если каждая координата вектора управления $u(t)$ в отдельности обеспечивает управляемость. Необходимое и достаточное условие этого состоит в том, что матрица нормализуемости L_{c_i} не вырождена:

$$\text{rank } L_{c_i} = \text{rank} [b_i : Ab_i : \dots : A^{n-1}b_i] = n$$

для всех $i = 1, 2, \dots, m$, где $b_i, i = 1, \dots, m$, - столбцы матрицы B . Рассмотренный выше химический реактор является полностью управляемым, но не нормализуемым, поскольку управление u_2 одно не обеспечивает управляемости. Заметим, что для скалярных управлений $u(t)$ управляемость и нормализуемость совпадают.

Пример 3.4. Вернемся к примеру 3.1 и рассмотрим нормализуемость объекта

$$L_{c1} = [b_1 \mid Ab_1] = \begin{bmatrix} 1 & a_{11} \\ 0 & a_{12} \end{bmatrix};$$

$$L_{c2} = [b_2 \mid Ab_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & a_{22} \end{bmatrix}.$$

Ранг матрицы L_{c1} равен 2, т.е. объект нормализуем с помощью управления u_1 или, другими словами, полная управляемость сохраняется и при одном управляющем воздействии, однако, возможно, качество управления при этом ухудшится. Относительно управления u_2 объект не нормализуем, поскольку ранг L_{c2} равен 1, т.е. с помощью этого управления объект частично управляем.

6.7. 3.4. Проблема многосвязности

При синтезе многомерных систем регулирования значительные затруднения связаны с наличием статических и динамических перекрестных связей между различными входами и выходами системы. Если такие связи отсутствуют, а число управляющих воздействий равно числу наблюдаемых координат, то матричная передаточная функция разомкнутой системы будет диагональной

$$G(s) = C(sE - A)^{-1}B = \begin{pmatrix} g_{11} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & g_{pp} \end{pmatrix}.$$

Если диагональна также и матрица G_r , то такой же будет матричная передаточная функция замкнутой системы, связывающая задание y_z с выходом y , при этом каждый отдельный контур регулирования может настраиваться независимо от остальных с использованием обычных методов классической теории регулирования.

К сожалению, для большинства многомерных задач регулирования характерна многосвязность по входам и выходам.

Для определения степени связности многомерной системы используется матрица Бристоля, характеризующая степень связности в статике.

Рассмотрим использование матрицы Бристоля на примере (2×2)-мерной системы, показанной на рисунке 3.1. Обычным способом настройки такой системы будет последовательное размыкание контура 2 и настройка контура 1 по y_1 , а затем размыкание контура 1 и настройка контура 2 по y_2 . Если взаимосвязь между контурами отсутствует ($g_{12} = g_{21} = 0$), то можно ожидать, что после замыкания контуров настроенная таким образом система будет функционировать достаточно эффективно. Однако при наличии взаимосвязей ($g_{12} \neq 0, g_{21} \neq 0$) при замыкании обоих контуров система может вести себя как угодно плохо. Например, в случае настройки первого регулятора объект включает в себя передаточную функцию регулятора второго контура (рис. 3.2) и таким образом первый регулятор придется настраивать на эквивалентный объект с передаточной функцией

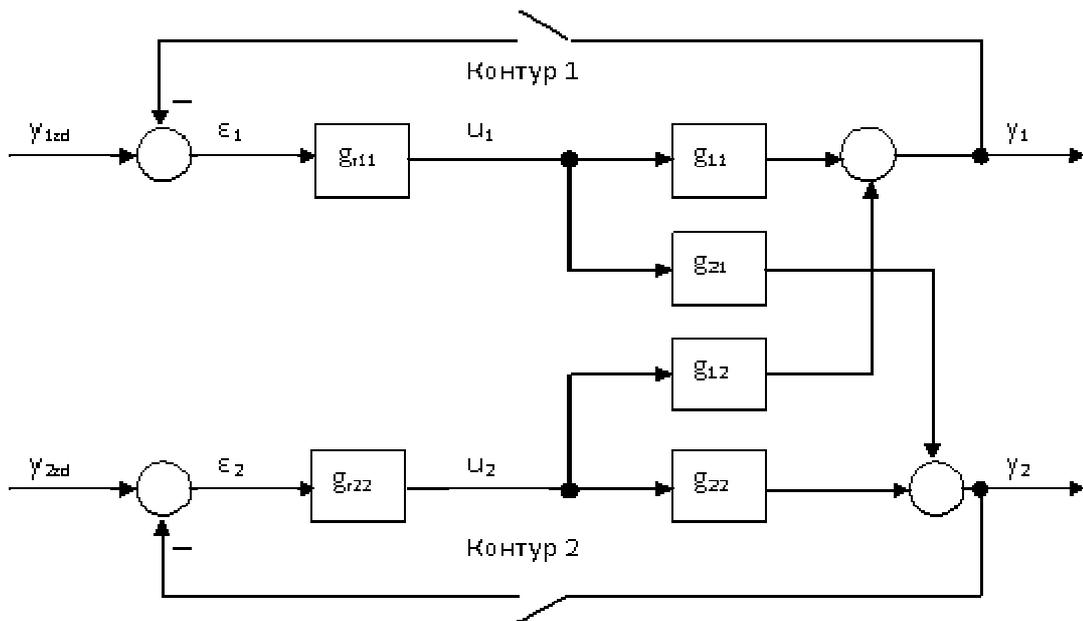


Рисунок 3.1 – Схема двухсвязной системы, допускающая независимую настройку контуров регулирования

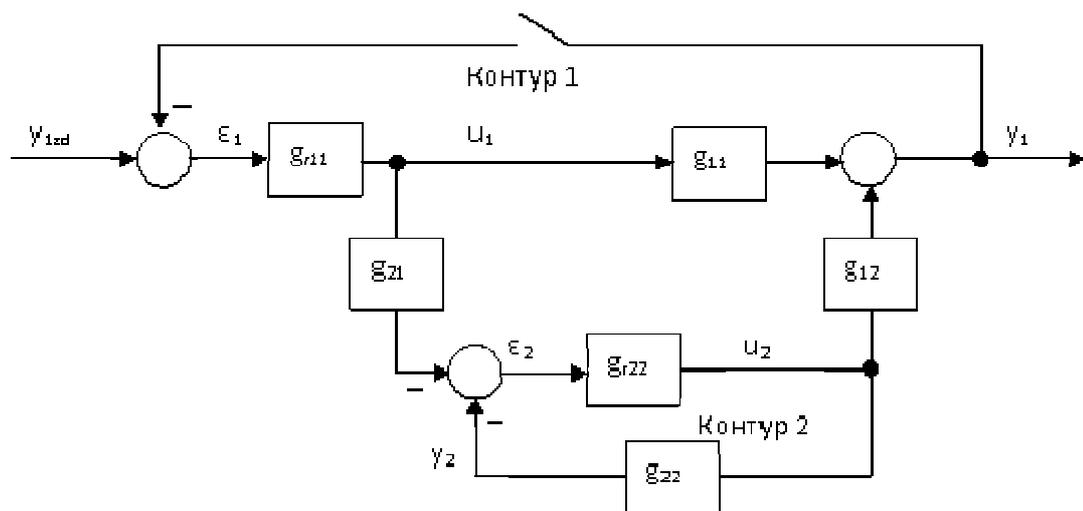


Рисунок 3.2 – Эквивалентная одноконтурная схема двухсвязной системы

$$G_{\text{ekv}} = g_{11} - g_{21}g_{r22}(1 + g_{r22}g_{22})^{-1}g_{12}.$$

Аналогичную эквивалентную передаточную функцию также имеет второй контур регулирования. Второе слагаемое $-g_{21}g_{r22}(1 + g_{r22}g_{22})^{-1}g_{12}$ этой передаточной функции действует как возмущение в первом контуре, причем является функцией воздействия u_1 . Кроме того, любые изменения параметров настройки второго регулятора могут ухудшить настройки в первом и при попытке исправить эту ситуацию, т.е. после настройки

регулятора в первом контуре, снова придется вернуться к настройкам второго контура, и так далее, пока качество управления не окажется удовлетворительным в обоих контурах.

Общей мерой связности в статике служит матрица Бристоля вида

$$B = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \cdots & \beta_{1m} \\ \cdots & \ddots & \cdots \\ \beta_{m1} & \cdots & \beta_{mm} \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

элементы которой определяются в статике следующим образом

$$\beta_{ij} \equiv \frac{\left(\frac{\partial y_i}{\partial u_j}\right)_{\text{все контуры разомкнуты}}}{\left(\frac{\partial y_i}{\partial u_j}\right)_{\text{все контуры, кроме } u_j \text{ замкнуты}}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, m$$

Таким образом, элемент β_{ij} матрицы Бристоля есть отношение двух производных: одна производная установившегося значения выхода y_i разомкнутой системы по управлению u_j , а другая – производная установившегося значения выхода y_i замкнутой системы по отношению к тому же управлению u_j .

Матрицу Бристоля (3.3) вычисляют следующим образом: числитель каждого β_{ij} является (i, j) - элементом передаточной матрицы разомкнутой системы в установившемся состоянии, т.е.

$$\lim_{s \rightarrow 0} g_{ij}(s), \quad (3.4)$$

знаменатель каждого β_{ij} определяется в предположении, что все замкнутые контуры действуют эффективно, т.е. $y_i = \text{const}$ при $i \neq j$ или

$$\left(\frac{\partial y_i}{\partial u_j}\right)_{\substack{\text{все контуры,} \\ \text{кроме } u_j \text{ замкнуты}}} \equiv \left(\frac{\partial y_i}{\partial u_j}\right)_{y_i = \text{const}, i \neq j} = \left(\frac{\partial u_j}{\partial y_i}\right)_{y_i = \text{const}, i \neq j}^{-1}$$

Поскольку $\partial u_j / \partial y_i$ является (i, j) - элементом обратной передаточной матрицы разомкнутой системы в установившемся состоянии, то

$$\partial u_j / \partial y_i \equiv \lim_{s \rightarrow 0} \left[G(0)^{-1} \right]_{ij}, \quad (3.5)$$

получаем следующее выражение для β_{ij}

$$\beta_{ij} \equiv [G(0)]_{ij} [G(0)^{-1}]_{ij}, \quad (3.6)$$

где символом $[\cdot]_{ij}$ обозначен (i, j) - элемент соответствующей матрицы.

Определим на примере (2×2) -мерной системы (рис. 3.1) матрицу Бристоля. На основании (3.4) и (3.5) определим

$$G(0) = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix},$$

$$G(0)^{-1} = \frac{\begin{bmatrix} k_{22} & -k_{12} \\ -k_{21} & k_{11} \end{bmatrix}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}},$$

откуда согласно (3.6)

$$B = \frac{\begin{bmatrix} k_{11}k_{22} & -k_{12}k_{21} \\ -k_{21}k_{12} & k_{11}k_{22} \end{bmatrix}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}}.$$

Анализ матрицы B позволяет указать несколько общих характеристик матрицы Бристоля:

- 1) сумма элементов любой строки или любого столбца равна 1;
- 2) если передаточная матрица диагональна или треугольна, соответствующая матрица Бристоля единична.

Матрица Бристоля служит основным средством для формирования пар вход-выход; при этом используются следующие общие правила:

- 1) анализируя $G(0)$, выбрать пары (u_j, y_i) так, чтобы диагональные элементы были больше недиагональных;
- 2) анализируя B , выбрать пары (u_j, y_i) так, чтобы диагональные элементы доминировали и приближались к 1 по модулю;
- 3) если имеются отрицательные диагональные элементы, для эффективности управления необходимо, чтобы все диагональные элементы были отрицательны.

Из определения меры связности понятно, что наилучшей возможной ситуацией является близость к 0 недиагональных элементов и близость к 1 диагональных элементов матрицы Бристоля (3.3), т.е.

$$B_{\text{идеал}} = \begin{bmatrix} 1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 1 \end{bmatrix}.$$

В этом случае взаимосвязи не существенны, и поведение замкнутой системы аналогично поведению разомкнутой.

При расчетах матрицы Бристоля элементы могут быть положительными (положительная матрица): в системе имеются однонаправленные взаимосвязи, поэтому разбиение матрицы взаимосвязей A необходимо провести так, чтобы все элементы, стоящие в главной диагонали, равнялись 1 или приближались к 1.

Отрицательная матрица Бристоля проявляется наличием отрицательных элементов вдоль главной диагонали – изменение ij -го управления в замкнутой системе приводит к эффекту, противоположному этому же изменению в разомкнутой системе – это наиболее опасная ситуация при управлении.

Пример 3.5. Пусть в результате активного эксперимента со ступенчатыми изменениями управляющих воздействий была определена передаточная матрица объекта G , связывающая выходы со входами:

$$\bar{y}(s) = G(s)\bar{u}(s),$$

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{0,7}{1+9s} & 0 & 0 \\ \frac{2,0}{1+8s} & \frac{0,4}{1+6s} & 0 \\ \frac{2,3}{1+10s} & \frac{2,3}{1+8s} & \frac{2,1}{1+7s} \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

Полученная модель показывает наличие взаимосвязей в объекте управления, причем диагональные элементы передаточной матрицы не являются доминирующими. Рассмотрим возможность формирования отдельных контуров регулирования данным объектом, для чего определим степень связности. Согласно (3.4) имеем

$$G(0) = \begin{bmatrix} 0,7 & 0 & 0 \\ 2,0 & 0,4 & 0 \\ 2,3 & 2,3 & 2,1 \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Вычислим обратную матрицу

$$G(0)^{-1} = \begin{bmatrix} 1,43 & 0 & 0 \\ -7,14 & 2,5 & 0 \\ 6,26 & -2,74 & 0,48 \end{bmatrix}$$

и элементы (3.6) матрицы Бристоля, в результате имеем

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Здесь матрица Бристоля не показывает присутствия каких-либо взаимосвязей в установившемся состоянии, так как связность является односторонней. Настройка может вестись для всех контуров поочередно: сначала контур 1 (u_1, y_1) , затем контур 2 (u_2, y_2) и, наконец, контур 3 (u_3, y_3) . Эта процедура в принципе обеспечивает требуемое поведение системы управления после замыкания всех контуров. Однако, как будет показано в следующей главе, проблема связности для такого объекта решена еще не окончательно, и более сложные системы управления могут привести к лучшим результатам.

В заключение данного подраздела подчеркнем, что матрица Бристоля является *мерой взаимосвязи между входами и выходами в установившемся состоянии*. Для динамических связей общепринятой меры связности, подобной матрице Бристоля, еще нет, несмотря на значительные усилия исследователей в этом направлении. Такая мера была бы очень полезна, поскольку иногда имеются существенные взаимосвязи в динамике даже при отсутствии взаимосвязей в статике.

4. УПРАВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫМИ МНОГОСВЯЗНЫМИ ПРОЦЕССАМИ

6.8. 4.1. Автономное регулирование

При синтезе многомерных систем регулирования значительные затруднения связаны с наличием статических и динамических перекрестных связей между различными входами и выходами системы. Если связи отсутствуют, а число управляющих воздействий равно числу наблюдаемых координат, то матричная передаточная функция разомкнутой системы будет диагональной:

$$G(s) = C(sI - A)^{-1} B = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & g_{nn}(s) \end{bmatrix}.$$

Если матрица $G_r(s)$ также диагональная, то такой же будет матричная передаточная функция замкнутой системы, связывающая задание u_d с выходом y , при этом каждый отдельный контур регулирования может настраиваться независимо от остальных с использованием обычных методов классической теории регулирования.

К сожалению, для большинства многомерных задач регулирования характерна многосвязность по входам и выходам.

Качество многомерных систем регулирования можно значительно повысить, если применить различные методы компенсации (развязывания) перекрестных связей. Это справедливо даже для таких систем, степень связности которых, оцениваемая с помощью матрицы Бристоля, невелика. Среди большого числа способов компенсации перекрестных связей одним из наиболее известных является метод синтеза автономной системы. Суть метода заключается в следующем.

Пусть требуется управлять выходами процесса $y(t)$ с помощью управляющего воздействия $u(t)$. Система управления, в состав которой входит ряд отдельных контуров регулирования и компенсатор перекрестных связей, показана на рисунке 4.1, одномерные регуляторы определяют диагональную структуру передаточной матрицы G_r

$$G_r = \begin{bmatrix} g_{r11} & & & 0 \\ & g_{r22} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & g_{rnn} \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

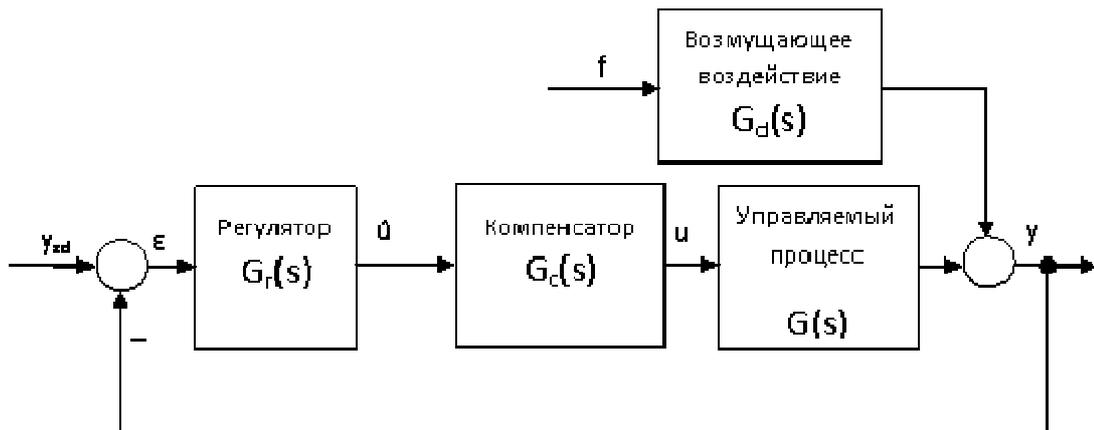


Рисунок 4.1 – Схема многосвязной системы регулирования с компенсатором взаимосвязей (автономная система)

Передаточная матрица замкнутой системы с учетом передаточной матрицы компенсатора G_c (рис. 4.1) будет задаваться выражением

$$y = (E + GG_c G_r)^{-1} GG_c G_r y_{zd} \quad (4.2)$$

или

$$y = T y_{zd}.$$

Компенсатор G_c предназначен для ослабления влияния перекрестных связей. В идеальном случае он должен обеспечивать диагональность матрицы T в каждый момент времени

$$T = \text{diag} \left((E + GG_c G_r)^{-1} GG_c G_r \right) \quad (4.3)$$

или приближение T к E при $t \rightarrow \infty (s \rightarrow 0)$ при некотором выборе настроек параметров регуляторов.

Поскольку матрица G_r диагональная, необходимым условием диагональности T и предельного соотношения $T(0) \rightarrow E$ при возрастании коэффициентов усиления будет выполнение следующего соотношения

$$GG_c = \text{diag}(G(s))$$

или

$$G_c = G^{-1} \text{diag}(G(s)), \quad (4.4)$$

где $\text{diag}(G(s))$ – диагональная матрица, получаемая из G обнулением всех недиагональных элементов.

Если при этом компенсация будет полной, то передаточная матрица замкнутой системы примет вид

$$y = \left(E + GG^{-1} \text{diag}(G)G_r \right)^{-1} GG^{-1} \text{diag}(G)G_r y_{zd}.$$

Надо отметить, что в этом случае достигается полная автономность по задающим воздействиям, и, несмотря на то, что каждое возмущение может влиять на все выходы, эффект возмущения на любой из выходов может быть скомпенсирован отдельным многомерным регулятором $g_{ii}(s)$.

Иногда бывают случаи, когда осуществить полную динамическую компенсацию слишком сложно или даже невозможно. Тогда стараются обеспечить автономность в статике таким выбором компенсатора G_c^{yc} , при котором $\lim_{s \rightarrow 0} T(s)$ – диагональная матрица (yc – индекс установившегося состояния)

$$G_c^{yc} = \lim_{s \rightarrow 0} G_c(s) = \lim_{s \rightarrow 0} G(s)^{-1} \text{diag}(G(s)) = G^{yc^{-1}} \text{diag}(G^{yc}). \quad (4.5)$$

Соответствующая передаточная матрица замкнутой системы определяется выражением

$$y = \left(E + GG^{yc^{-1}} \text{diag}(G^{yc})G_r \right)^{-1} GG^{yc^{-1}} \text{diag}(G^{yc})G_r y_{zd}.$$

При этом оказываются скомпенсированными все перекрестные связи в установившемся состоянии, так что, изменяя коэффициенты усиления отдельных регуляторов, можно повысить качество системы. Однако даже в этой благоприятной ситуации в переходном процессе возможен период заметного влияния динамических связей, вследствие чего отдельные

регуляторы могут действовать на объект в противоположных направлениях. По этой причине, особенно если настройки регуляторов выбраны грубо, нежелательны большие значения интегральных составляющих ПИД – законов.

Пример 4.1. Вернемся к приведенному в примере 3.5 объекту с передаточной функцией (3.7) и рассмотрим для него задачу синтеза статической и динамической автономных систем регулирования.

Статический компенсатор определяется выбором передаточной матрицы G_c в виде (4.5), таким образом, имеем

$$G(0) = \begin{bmatrix} 0,7 & 0 & 0 \\ 2,0 & 0,4 & 0 \\ 2,3 & 2,3 & 2,1 \end{bmatrix}, \text{diag}G(0) = \begin{bmatrix} 0,7 & 0 & 0 \\ 0 & 0,4 & 0 \\ 0 & 0 & 2,1 \end{bmatrix},$$

а с учетом найденной в примере 3.5 обратной матрицы $G(0)^{-1}$ получаем

$$G_c = \begin{bmatrix} 1,43 & 0 & 0 \\ -7,14 & 2,5 & 0 \\ 6,26 & -2,74 & 0,48 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,7 & 0 & 0 \\ 0 & 0,4 & 0 \\ 0 & 0 & 2,1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,00 & 0 & 0 \\ -7,14 & 1,00 & 0 \\ 6,26 & -2,74 & 1,00 \end{bmatrix}.$$

Автономная система регулирования, не учитывающая влияния возмущения, показана на рис. 4.2. Статическая автономность достигается за счет выбора коэффициентов усиления компенсатора в виде

$$g_{c1} = \begin{bmatrix} 1,00 \\ -7,14 \\ 6,26 \end{bmatrix}, g_{c2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1,00 \\ -2,74 \end{bmatrix}, g_{c3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1,00 \end{bmatrix}.$$

Такие коэффициенты обеспечивают использование u_3 только для регулирования y_3 , u_2 – для регулирования y_2, y_3 и u_1 – для регулирования всех трех выходных переменных.

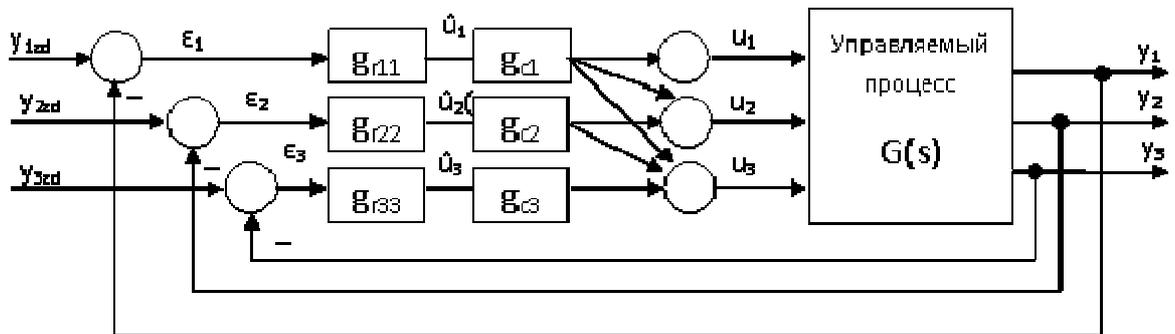


Рисунок 4.2 – Автономная система регулирования для объекта (3.7)

Для определения динамического компенсатора первоначально вычислим

$$\text{diag}G(s) = \begin{bmatrix} \frac{0,7}{1+9s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{0,4}{1+6s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2,1}{1+7s} \end{bmatrix},$$

$$G(s)^{-1} = \begin{bmatrix} 1,43(1+9s) & 0 & 0 \\ \frac{-7,14(1+9s)(1+6s)}{(1+8s)} & 2,5(1+6s) & 0 \\ \left[\frac{7,82(1+9s)(1+6s)(1+7s)}{(1+8s)^2} \right. & \frac{-2,74(1+6s)(1+7s)}{(1+8s)} & 0,48(1+7s) \\ \left. -1,56 \frac{(1+9s)(1+6s)}{(1+10s)} \right] & & \end{bmatrix}.$$

В соответствии с (4.4) получаем

$$G_c(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{-7,14(1+9s)(1+6s)}{(1+8s)} & 1 & 0 \\ \left[\begin{array}{l} \frac{7,82(1+9s)(1+6s)(1+7s)}{(1+8s)^2} \\ -1,56 \frac{(1+9s)(1+6s)}{(1+10s)} \end{array} \right] & \frac{-2,74(1+6s)(1+7s)}{(1+8s)} & 1 \end{bmatrix}$$

или в виде блоков g_{c1}, g_{c2}, g_{c3}

$$g_{c1}(s) = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{-7,14(1+9s)(1+6s)}{(1+8s)} \\ \frac{7,82(1+9s)(1+6s)(1+7s)}{(1+8s)^2} - 1,56 \frac{(1+9s)(1+6s)}{(1+10s)} \end{bmatrix},$$

$$g_{c2}(s) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{-2,74(1+6s)(1+7s)}{(1+8s)} \end{bmatrix}, \quad g_{c3}(s) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Отметим, что для динамической компенсации требуется дифференцирование сигналов, связывающих отдельные контуры регулирования.

Автономное регулирование не всегда оказывается столь эффективным, как в рассмотренном только что примере. Так, если передаточная матрица $G(s)$ содержит элементы чистого запаздывания, динамический компенсатор, как правило, должен включать элементы опережения, использующие будущие значения выходов. Очевидно, что элементы опережения в чистом виде не

могут быть реализованы, однако часто удается получить неплохие результаты, используя вместо них различные прогнозаторы.

Другим существенным моментом является необходимость точно знать передаточную матрицу объекта. Как правило, вместо точной модели процесса G^* при синтезе системы регулирования используется приближенная модель G , в результате чего получается передаточная функция замкнутой системы вида

$$y = \left(E + G^* G^{-1} \text{diag}(G) G_r \right)^{-1} G^* G^{-1} \text{diag}(G) G_r y_{zd} .$$

Если при этом точная и приближенная модели объекта G^* и G значительно отличаются друг от друга, то качество регулирования будет плохим и замкнутая система может даже стать неустойчивой.

Вопросы устойчивости особенно важны в том случае, когда передаточная матрица объекта имеет нули в правой полуплоскости. Эти нули оказываются неустойчивыми полюсами G согласно (4.4), и их не точная компенсация приводит к тому, что в передаточной матрице замкнутой системы появляются неустойчивые полюса.

Еще одним потенциально слабым местом автономных систем регулирования является возможное ухудшение динамических характеристик замкнутой системы при компенсации перекрестных связей. В тех случаях, когда перекрестные связи улучшают динамику системы, следует применять такие приемы регулирования, которые сохраняли бы эти полезные, свойства.

6.9. 4.2. Синтез компенсатора задающих воздействий

Влияние статических перекрестных связей, вызванных изменениями задающих воздействий, можно исключить, применив так называемую компенсацию задающих воздействий или уставок. Соответствующая схема может быть реализована либо непосредственно на аналоговых регуляторах, либо в супервизорном режиме управления от ЭВМ.

Пусть динамика замкнутой системы, показанной на рисунке 4.1, определяется выражением

$$y = T \bar{y}_{zd} + T_d \bar{f} , \quad (4.6)$$

где

$$T = (I + G G_r)^{-1} G G_r . \quad (4.7)$$

Матрица регулятора G_r диагональная, а матрица G , вообще говоря, произвольна.

Представим себе, что схема рисунка 4.1 преобразуется в схему рисунка 4.3 за счет добавления компенсатора задающего воздействия Z :

$$y_{zd} = Z\hat{y}_{zd}, \quad (4.8)$$

где \hat{y}_{zd} – фактическое значение уставки.

Матрица Z в случае (3x3) – системы рис. 4.3 имеет вид

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix}.$$

Подставив (4.8) в (4.6), получим

$$\bar{y} = (E + GG_c)^{-1} (GG_c Z\hat{y}_{zd} + G_d \bar{f}), \quad (4.9)$$

откуда следует, что Z надо выбирать из условий

$$\hat{T}(s) = (E + GG_c)^{-1} GG_c Z \text{ диагональна,}$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \hat{T}(s) = E. \quad (4.10)$$

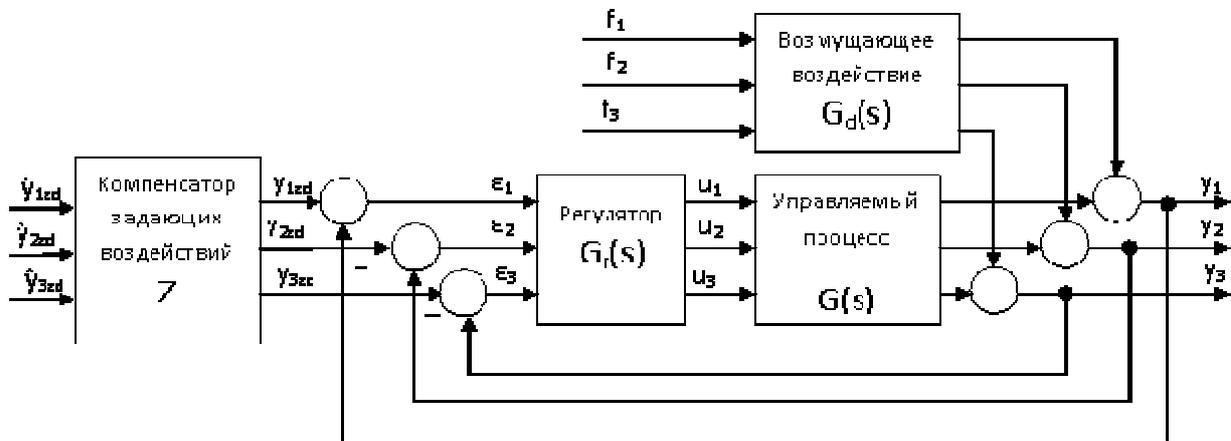


Рисунок 4.3 – Многосвязная система управления с компенсацией задающих воздействий

По теореме о конечном значении находим выражение для Z :

$$Z = \lim_{s \rightarrow 0} \left[(E + GG_c)^{-1} GG_c \right]^{-1}. \quad (4.11)$$

Проиллюстрируем полученные выводы на примере:

Пример 4.2. Рассмотрим объект из примера 3.5, применив к нему схему компенсации задающих воздействий рисунка 4.3. Если матрица регулятора G_r имеет вид

$$G_r = \begin{bmatrix} k_{c_1} & 0 & 0 \\ 0 & k_{c_2} & 0 \\ 0 & 0 & k_{c_3} \end{bmatrix},$$

(т.е. блок G_r блок – схемы рис. 4.3 состоит из трех пропорциональных регуляторов), а G_{yc} задается выражением (3.8), то для Z получим

$$Z = (G_{yc} G_r)^{-1} (E + G_{yc} G_r) = (G_{yc} G_r)^{-1} + E, \quad (4.12)$$

но $(G_{yc} G_r)^{-1} = G_c^{-1} G_{ys}^{-1}$,

где

$$G_r^{-1} = \begin{bmatrix} 1/k_{c_1} & 0 & 0 \\ 0 & 1/k_{c_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1/k_{c_3} \end{bmatrix}, \quad (4.13)$$

$$G_{yc}^{-1} = \begin{bmatrix} 1,43 & 0 & 0 \\ -7,14 & 2,5 & 0 \\ 6,26 & -2,74 & 0,48 \end{bmatrix}. \quad (4.14)$$

Подставляя (4.13) и (4.14) в (4.12), найдем для Z окончательное выражение

$$Z = \begin{bmatrix} \frac{1,43}{k_{c_1}} + 1 & 0 & 0 \\ \frac{-7,14}{k_{c_2}} & \frac{2,5}{k_{c_2}} + 1 & 0 \\ \frac{6,26}{k_{c_3}} & \frac{-2,74}{k_{c_3}} & \frac{0,48}{k_{c_3}} + 1 \end{bmatrix}.$$

При достаточно больших значениях коэффициентов усиления k_{c_i} ($k_{c_i} \rightarrow \infty$) будет выполняться необходимое условие $S \rightarrow I$, и никакой компенсации в статике не требуется.

В качестве упражнения самостоятельно покажите, что в случае использования в рассмотренной схеме вместо П–регуляторов ПИ–регуляторов матрица Z будет единичной, и объясните физический смысл полученного результата. Передаточная функция ПИ – регулятора имеет вид

$$g_{ii_c}(s) = k_{c_i} \left(1 + \frac{1}{\tau_{I_i} s} \right).$$

Основным недостатком рассмотренных систем с автономностью по задающим воздействиям является то, что компенсатор не стоит в цепи связи и не улучшает качества системы по отношению к возмущениям. Однако если изменение уставок осуществляется для противодействия влиянию внешних возмущений, с помощью компенсатора уставок будут уменьшены перекрестные связи, что особенно эффективно при супервизорном управлении от ЭВМ через аналоговые регуляторы.

6.10. 4.3. Модальное управление

Еще один подход к синтезу многомерных систем регулирования дает теория модального управления. Эта теория существенным образом основывается на линейности рассматриваемых моделей; с ее помощью можно устанавливать желаемые значения собственных чисел замкнутой системы. Разберем основные положения модального управления на примере стандартной линейной системы в пространстве состояний

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (4.15)$$

$$y = Cx. \quad (4.16)$$

Будем предполагать, что в уравнениях (4.15), (4.16) размерности векторов управления и выхода совпадают и равны размерности пространства состояний, что A , B , C – постоянные матрицы и что все собственные числа матрицы A действительны и различны. Эти предположения не являются ограничивающими, они служат лишь для упрощения последующих выводов. Будем строить управление в виде пропорциональной обратной связи по выходам

$$u(t) = -G_c y = -G_c Cx. \quad (4.17)$$

Напомним теперь определение собственных чисел и векторов. Если Λ – диагональная матрица собственных чисел квадратной матрицы A :

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & 0 \\ & \dots & \\ 0 & & \lambda_n \end{bmatrix}, \quad (4.18)$$

то справедливы следующие соотношения:

$$R\Lambda = AR, \quad (4.19)$$

$$\Lambda L = LA, \quad (4.20)$$

где R и L - матрицы нормированных собственных векторов (левых и правых) матрицы A, т.е. R и L определяются как решения векторных уравнений:

$$Ar_i = \lambda_i r_i, \quad i=1,2,\dots,n, \quad (4.21)$$

$$l_i^T A = \lambda_i l_i^T, \quad i=1,2,\dots,n, \quad (4.22)$$

а собственные числа λ_i являются решениями характеристического уравнения

$$|A - \lambda_i E| = 0, \quad i=1,2,\dots,n. \quad (4.23)$$

Все векторы l_i и r_i нормируются так, чтобы они были ортонормальны:

$$l_i^T r_j = \delta_{ij}, \quad r_i^T l_j = \delta_{ij} \quad (4.24)$$

или же в матричной форме:

$$LR = RL = E, \quad (4.25)$$

где

$$R = [r_1 \dots r_n], L = [l_1 \dots l_n]^T. \quad (4.26)$$

Умножая (4.19) слева на L, а (4.20) – на R и используя (4.25), получим следующие выражения

$$\Lambda = LAR \quad (4.27)$$

$$RAL = A \quad (4.28)$$

Подставляя (4.17) и (4.28) в (4.15), найдем

$$\dot{x} = (RAL - BG_c C)x. \quad (4.29)$$

Если теперь взять матрицу G_c так, чтобы выполнялось равенство

$$G_c = B^{-1}RK, \quad (4.30)$$

где диагональная матрица K представляет собой матричный коэффициент усиления в цепи обратной связи

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & k_n \end{bmatrix}, \quad (4.31)$$

а матрица наблюдения C равна L , то получим уравнение (4.29) в преобразованном виде

$$\dot{x} = R(\Lambda - K)Lx. \quad (4.32)$$

Сделав замену переменных

$$y = Lx, \quad (4.33)$$

получим уравнение относительно y

$$\dot{y} = (\Lambda - K)y. \quad (4.34)$$

Поскольку $(\Lambda - K)$ - диагональная матрица, система (4.34) разлагается на независимые уравнения первого порядка, решениями которых являются функции

$$y_i = \alpha_i e^{(\lambda_i - k_i)t}, \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (4.35)$$

Возвращаясь к прежним переменным, получим решение в пространстве состояний

$$x = \sum_{i=1}^n \alpha_i r_i e^{(\lambda_i - k_i)t}. \quad (4.36)$$

Здесь коэффициенты α_i определяются начальными условиями. Изменяя k_i , можно как угодно менять собственные числа замкнутой системы, при этом между разными выходами y_i нет взаимосвязей, т.е. изменение коэффициента усиления k_i влияет только на i - моду. Это означает, что имеется возможность управлять модами замкнутой системы, причем перекрестные связи между координатами состояния не сказываются на выходе. В качестве недостатков представленной методики следует отметить, что используются только пропорциональные регуляторы, матрица C должна совпадать с L и, как показывает практика, трудна настройка системы. Схема системы приведена на рисунке 4.5.

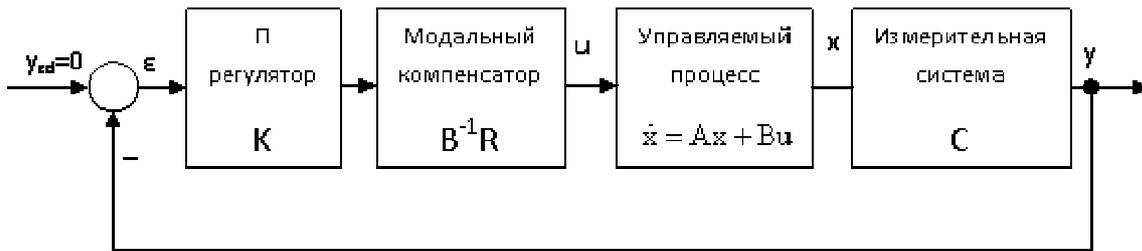


Рисунок 4.5 – Система модального управления

Если размерность вектора управления m меньше размерности вектора состояния, то модальное управление может быть применено к первым m собственным векторам матрицы A .

Пример 4.3. Пусть модель процесса в безразмерных переменных имеет вид

$$\dot{x}_1 = b_{11}x_1 + u_1, \quad (4.37)$$

$$\dot{x}_2 = b_{21}x_1 + b_{22}x_2 + u_2 \quad (4.38)$$

Допустим, что координаты x_1 и x_2 могут наблюдаться непосредственно:

$$y = Cx. \quad (4.39)$$

Обратную связь по состоянию введем с помощью пропорциональных регуляторов, полагая уставную нулевой ($y_{zd}=0$)

$$\begin{aligned} u_1 &= -k_{11}x_1; \\ u_2 &= -k_{22}x_2. \end{aligned} \quad (4.40)$$

Подставив (4.40) в (4.37) и (4.38), получим систему уравнений

$$\dot{x}_1 = (b_{11} - k_{11})x_1, \quad (4.41)$$

$$\dot{x}_2 = b_{21}x_1 + (b_{22} - k_{22})x_2 \quad (4.42)$$

Полученные уравнения показывают, что хотя с помощью k_{22} и можно регулировать x_2 , имеется сильная взаимосвязь между x_1 и x_2 .

Для применения модального управления определим сначала собственные числа и собственные векторы матрицы A .

$$A = \begin{vmatrix} b_{11} & 0 \\ b_{21} & b_{22} \end{vmatrix}.$$

Решим характеристическое уравнение

$$[A - \lambda E] = \begin{vmatrix} b_{11} - \lambda & 0 \\ b_{21} & b_{22} - \lambda \end{vmatrix}$$

или $\lambda^2 - (b_{22} + b_{11})\lambda + b_{22}b_{11}$, откуда $\lambda_1 = -b_{11}$, $\lambda_2 = -b_{22}$.

С помощью стандартных приемов линейной алгебры собственные векторы матрицы A и транспонированной к ней матрицы (т.е. правые и левые собственные векторы) можно представить в виде столбцов и строк присоединенной матрицы $\text{adj}(A - \lambda E)$, не решая векторного уравнения $(A - \lambda E)x = 0$.

Присоединенная матрица в данном случае имеет вид

$$\text{adj}(A - \lambda E) = \begin{vmatrix} -b_{22} + \lambda & 0 \\ -b_{21} & -b_{11} + \lambda \end{vmatrix}.$$

Ее столбцы определяют правые собственные векторы, т.е. собственные векторы матрицы A при

$$\lambda = \lambda_1 \quad r_1 = \begin{bmatrix} b_{11} - b_{22} \\ -b_{21} \end{bmatrix},$$

$$\lambda = \lambda_2 \quad r_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -b_{21} \end{bmatrix}.$$

Ее строки определяют собственные векторы, т.е. собственные векторы матрицы A^T при

$$\lambda = \lambda_1 \quad l_1 = \begin{bmatrix} b_{21} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\lambda = \lambda_2 \quad l_2 = \begin{bmatrix} b_{21} \\ b_{11} - b_{22} \end{bmatrix}.$$

Поскольку собственные векторы определяются с точностью до скалярного множителя, т.е. до своей нормы (длины), систему собственных векторов можно сделать ортонормальной, умножив их все на константу

$$\frac{1}{b_{11}(b_{11} - b_{22})}.$$

После всех преобразований получим:

$$R = \begin{bmatrix} \frac{1}{b_{21}} & 0 \\ -1 & 1 \\ \frac{1}{(b_{11} - b_{22})} & \frac{1}{(b_{11} - b_{22})} \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} b_{21} & 0 \\ b_{21} & b_{11} - b_{22} \end{bmatrix}.$$

И должно выполняться равенство $LR = E$.

Если взять в качестве C матрицу собственных векторов L , для расчета матрицы обратной связи воспользуемся уравнениями

$$\begin{aligned} y_1 &= b_{21}x_1, \\ y_2 &= b_{21}x_1 + (b_{11} - b_{22})x_2, \end{aligned}$$

откуда $u = -RKLx$,

где

$$RKL = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 \\ \frac{b_{21}(k_{22} - k_{11})}{b_{11} - b_{22}} & k_{22} \end{bmatrix}.$$

Возвращаясь к переменным состояниям, получим уравнения

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= (b_{11} - k_{11})x_1, \\ \dot{x}_2 &= b_{21} \left(1 + \frac{k_{22} - k_{11}}{b_{11} - b_{22}} \right) x_1 + (b_{22} - k_{22})x_2. \end{aligned} \quad (4.43)$$

Соответствующие уравнения для выходов примут вид

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= (b_{11} - k_{11})y_1, \\ \dot{y}_2 &= (b_{22} - k_{22})y_2 \end{aligned}$$

и в них уже нет перекрестных связей.

Проанализируем особенности модального управления, выявившиеся в рассмотренном примере. Во-первых, как уже отмечалось, все выходы управляются независимо друг от друга, без каких-либо перекрестных связей. Это очень полезно, если можно сформировать соответствующие задающие воздействия, что несложно, поскольку переход от наблюдений к состояниям задается формулами $y_{zd} = Lx_{zd}$, $x_{zd} = Ry_{zd}$. Во-вторых, если выбрать коэффициенты усиления k_{11} и k_{22} так, чтобы выполнялось равенство

$$k_{22} - k_{11} = b_{11} - b_{22}, \quad (4.44)$$

то из уравнения (4.43) видно, что связи между переменными состояниями также удастся убрать. Это, впрочем, не является свойством модального управления, но определяется лишь структурой рассматриваемой задачи.

6.11. 4.4. Вопросы для самопроверки

1. В чем отличие критерия управляемости от критерия нормализуемости?
2. Как осуществляется оценка степени связности технологического процесса? Укажите общие характеристики этой оценки.
3. Что представляет собой автономная система? Как осуществляется автономность многосвязных систем?
4. В каких случаях осуществляют компенсацию задающих воздействий?
5. Укажите сложности реализации автономного управления. Какими достоинствами и недостатками обладают автономные системы?
6. В чем заключаются особенности модального управления?
7. В чем заключаются преимущества модального управления от автономного управления?

5. УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

6.12. 5.1. Управление с обратной связью для линейных объектов с распределенными параметрами

Для систем с распределенными параметрами распределенными параметрами (СРП) характерна зависимость состояний и выходов от пространственных координат. Естественными моделями в этом случае являются уравнения с частными производными, интегральные уравнения или трансцендентные передаточные функции. Отметим, что одним из важнейших подклассов рассматриваемого класса систем являются технологические объекты управления с чистым запаздыванием. Многочисленные задачи управления для систем с распределенными параметрами возникают в практике АСУТП. Рассмотрим простейший пример, поясняющий существо проблемы.

Рассмотрим задачу управления температурой в баке с перемешиванием (рис. 5.1). Температурный режим поддерживается регулятором, изменяющим (относительное) поступление горячего входного потока; уровень жидкости в баке регулируется клапаном переполнения, а общий входной поток стабилизируется на заданном уровне, несмотря на то, что отношение горячего и холодного входных потоков изменятся. Неудачная конструкция системы привела к тому, что смещение горячего и холодного потоков происходит на значительном удалении от бака, что вносит дополнительное запаздывание в процесс. Составим уравнение теплового баланса бака объема V , пренебрегая потерями тепла в окружающую среду:

$$\rho C_p V (dT / dt) = \rho C_p (FT_f(t) - FT), \quad (5.1)$$

где $T_f(t)$ – температура на входе в бак, определяется температурами горячего T_n и холодного T_c входных потоков и отношением их расходов $\lambda(t)/(1-\lambda)$; ρ – плотность; C_p – теплоемкость. Будем учитывать также запаздывание, вносимое движение жидкости при ее расходе F по

теплоизолированному трубопроводу длиной L с площадью поперечного сечения a_c . Составим уравнение теплового баланса для трубопровода:

$$\rho C_p \left[dT_p(z,t) / dt \right] + \rho C_p (F / a_c) \left[dT_p(z,t) / dz \right] = 0, \quad 0 < z < L, \quad (5.2)$$

где $T_p(z,t)$ - распределение температуры по длине трубопровода.

Краевые условия на входе и выходе из трубопровода определяются соотношениями

$$T_p(0,t) = \lambda(t) T_H + [1 - \lambda(t)] T_C, \quad (5.3)$$

$$T_f(t) = T_p(L,t). \quad (5.4)$$

Уравнение (5.2) является гиперболическим уравнением с частными производными первого порядка, оно имеет очевидное решение

$$T_p(L,t) = T(0, t - \alpha), \quad (5.5)$$

где $\alpha = La_c / F$ - время прохождения жидкостью трубопровода.

Подставляя (5.3) и (5.4) в (5.5), получим

$$T_f(t) = T_C + (T_H - T_C) \lambda(t - \alpha). \quad (5.6)$$

Используя это выражение для $T_f(t)$ в (5.1), приходим к уравнению

$$\theta (dT / dt) = [T_C + (T_H - T_C) \lambda(t - \alpha) - T], \quad (5.7)$$

где $\theta = V / F$ - среднее время пребывания жидкости в баке. Пусть $T = T_s$, $\lambda = \lambda_s$ отклонения от этого установившегося состояния, а $y = T - T_s$, $u = \lambda - \lambda_s$ отклонения от этого установившегося состояния. В новых переменных уравнение (5.7) запишется так:

$$\theta (dy / dt) = (T_H - T_C) u(t - \alpha) - y, \quad y(0) = 0. \quad (5.8)$$

Соответствующее частотное представление имеет вид

$$\bar{y}(s) = \left\{ \left[(T_H - T_C) e^{-\alpha s} \right] / (\theta_s + 1) \right\} \bar{u}(s). \quad (5.9)$$

Наличие чистого транспортного запаздывания, отличающее (5.8) и (5.9) от рассмотренной ранее модели с сосредоточенными параметрами, значительно усложняет проблему синтеза управляющего устройства, причем это относится как к теоретическим, так и к прикладным вопросам. Далее рассмотрим объекты управления с запаздыванием и процедуры построения законов управления для этих объектов.

6.13. 5.2. Технологические процессы с запаздыванием и их математические модели

Одним из важнейших классов систем с распределенными параметрами являются системы с последствием, или с запаздываниями, которые используются при описании разнообразных промышленных объектов управления. Во многих технологических процессах химической, нефтехимической, металлургической, горной и других промышленности часто встречается вид запаздывания, называемый транспортным. Такое **запаздывание** образуется, если в технологическом процессе вещество, энергия и т.п. перемещаются с определенной скоростью из одной точки в другую без какого-либо изменения его свойств и характеристик. При этом различают запаздывания как в канале управления, так и в переменных состояниях.

Запаздывание в управлении появляется, например, при установке исполнительного механизма на расстоянии от управляемого объекта.

Наглядным примером объекта с таким запаздыванием является стан холодной прокатки металла (рис. 5.1).

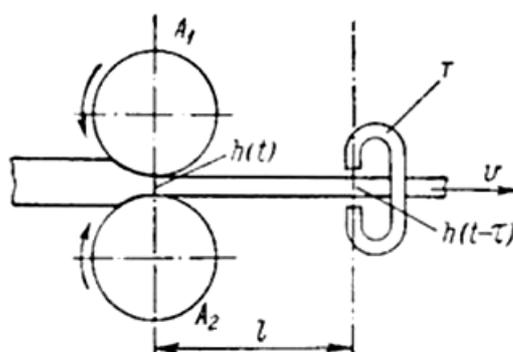


Рисунок 5.1 – Схема расположения датчика толщины листа

Датчик толщины листа T по конструктивным соображениям не может находиться непосредственно под вальцами, а только на некотором удалении от оси валков A_1, A_2 (рис. 5.1). Если лист движется с постоянной скоростью и никаких изменений толщины в промежутке между вальцами и толщиномером не происходит, то толщина листа в месте расположения толщиномера

изменяется во времени как $h(t - \tau)$, если $h(t)$ есть толщина при выходе из валков. Время запаздывания

$$\tau = \frac{l}{v},$$

где l — расстояние между осями валков и толщиномером;

v — скорость перемещения листа.

Вследствие этого выходная величина объекта – толщина листа – имеет транспортное или «чистое» запаздывание относительно регулирующего воздействия – степени обжатия металла валками.

Другим примером объектов, содержащих транспортные запаздывания, может служить система регулирования количества угля на ленточных транспортерах. Эта система должна обеспечить постоянство подачи угля в мельницу. Уголь подается из бункера с помощью ленточного транспортера на весы, откуда он поступает в мельницу. Требуемый вес угля может быть задан массой груза, помещенном на одном плече весов. Разница между заданной величиной (массой груза) и действительной массой угля подается в виде сигнала ошибки на регулятор, который формирует управляющий сигнал на исполнительный механизм, перемещающий заслонку бункера угля.

Изменение количества угля, поступающего из бункера на транспортер в момент времени t , измеряется не сразу, а спустя некоторое время τ , в течение которого этот уголь будет перемещаться на весы. Этот интервал времени зависит от скорости транспортировки угля и расстояния от точки измерения до точки управления.

Динамические свойства подавляющего большинства технологических процессов аппроксимируются апериодическими звеньями первого (иногда второго и третьего) порядка с чистым запаздыванием

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об}}{T_{об}p + 1} e^{-\tau p}. \quad (5.10)$$

Причем в процессе их функционирования изменяются коэффициент усиления, постоянная времени и время чистого запаздывания. Диапазон изменения коэффициента усиления составляет для различных объектов 1,5-2 раза, постоянной времени – 1,2-1,5 раза и времени чистого запаздывания – до 1,5 раз. Причем время чистого запаздывания существенно зависит от места установки средств отбора информации и от производительности агрегата. Следующий пример иллюстрирует это.

Систему нагрева воды, изображенную на рисунке 5.2, также можно считать объектом с запаздыванием. Вода нагревается в корпусе аппарата, с помощью электрического нагревательного элемента (ТЭНа), а ее расход управляется насосом вдоль теплоизолированного трубопровода к выходу системы. Вход управления - электрическая энергия W нагревателя, а выход объекта - температура T в конце трубопровода. Линейная модель процесса может быть получена с помощью простой процедуры идентификации близко к рабочей точке W_0, T_0 . Когда увеличивается количество энергии W , температура в нагревателе также увеличивается.

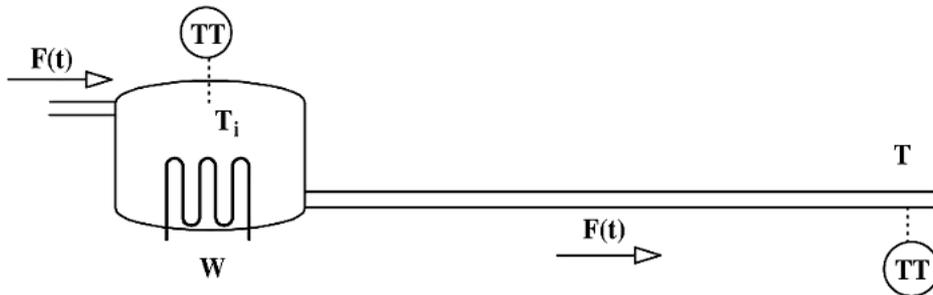


Рисунок 5.2 – Нагретый корпус с длинным трубопроводом

Поскольку трубопровод заполнен водой с начальной температурой T_0 , то любое изменение температуры, измеряемой датчиком ТТ на выходе, воспринимается не сразу, и необходимо ожидать, пока горячая вода не достигнет конца трубопровода прежде, чем датчик почувствует это изменение. Таким образом, после запаздывания, определяемого расходом жидкости и длиной трубопровода, выходная температура T начинает повышаться с той же самой динамикой как температура в корпусе.

Если расход воды F постоянен, то запаздывание τ можем вычислить, используя величину расхода F и объем канала V как

$$\tau = \frac{V}{F}.$$

На рисунке 5.3 показано поведение температуры на выходе T при ступенчатом изменении мощности W . Мощность подводимой энергии W изменяется от 40 % до 50 % (пунктирная линия) в момент времени $t=1с$, а температура (сплошная линия) увеличивается от 55 °С до 65 °С. Отметим, что температура в корпусе T_i (штрих-пунктирная линия) начинает повышаться с $t = 1с$, в то время как температура на конце трубопровода реагирует только когда $t=6с$, таким образом, есть запаздывание, равное 5с из-за времени,

необходимого на транспортировку. Поэтому можно связать эти две температуры $T_i(t)=T(t+5)$.

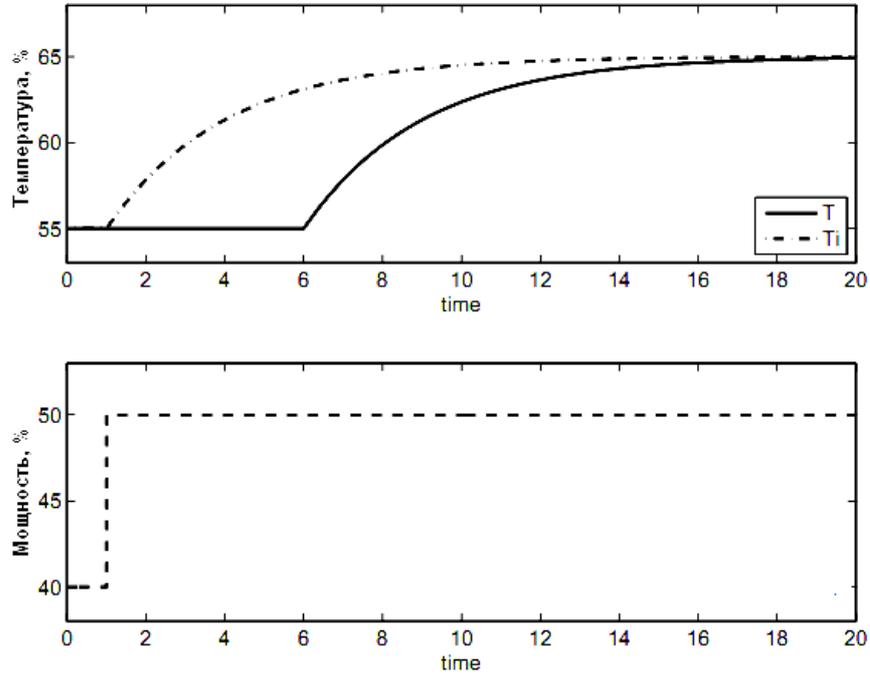


Рисунок 5.3 – Графики изменения температуры нагрева воды на ступенчатое увеличение мощности нагрева: T_i – (штрих-пунктирная линия), T – (сплошная линия) и W – (пунктирная линия)

Предположим теперь, что используется линейная модель, описывающая динамическое отношение между изменениями на T_i (ΔT_i) и изменениями на W (ΔW). Передаточная функция между ΔT_i и ΔW определяется как

$$G(p) = \frac{\Delta T_i(p)}{\Delta W(p)} \Rightarrow \Delta T_i(p) = G(p)\Delta W(p).$$

Если рассматривать общее запаздывание τ , то, используя преобразование Лапласа ($L\{x(t+\tau)\} = e^{\tau p}L\{x(t)\}$), получим

$$\Delta T_i(p) = e^{\tau p}\Delta T(p) \Rightarrow \Delta T(p) = \Delta T_i(p)e^{-\tau p},$$

таким образом, передаточная функция

$$\frac{\Delta T(p)}{\Delta W(p)} = G(p)e^{-\tau p}, \quad \tau > 0$$

является линейной моделью, наиболее часто используемой, чтобы представить поведение процесса с запаздыванием.

Во многих случаях запаздывание вызывается эффектом, произведенным накоплением большого количества емкостей и их характеристик, а также сопротивлений при переходе энергии или вещества. Такое запаздывание называют переходным. Оно почти не зависит от нагрузки объекта и сказывается на скорости изменения регулируемого параметра, снижая ее, т.е. замедляя изменение последнего. Рассмотрим, например, ряд n одинаковых цилиндрических аппаратов, находящихся под атмосферным давлением (рис. 5.4). В этой системе расход на выходе корпуса i (F_{iO}) поступает в аппарат $i+1$, т.е. расход на входе $i+1$ аппарата является $F_{(i+1)I} = F_{iO}$.

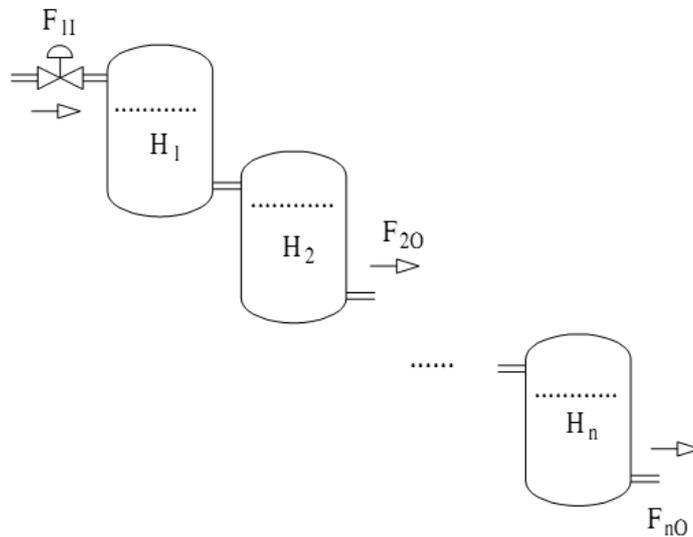


Рисунок 5.4 – Каскад аппаратов

Когда уровень жидкости в аппаратах близок к рабочей точке, динамика уровня в каждом корпусе H_i может быть смоделирована линейной системой уравнений

$$A \frac{dH_i}{dt} = F_{iI} - F_{iO},$$

$$F_{iO} = KH_i,$$

где A - площадь поперечного сечения аппарата, а K является константой, которая определяется по конструктивным характеристикам корпуса аппарата. Таким образом, передаточная функция определяется связью расхода жидкости на входе в i аппарат и ее уровень как

$$H_i = \frac{1/K}{Tp + 1} F_{iI}, \quad T = A/K.$$

Для 1-го корпуса

$$H_1(p) = \frac{1/K}{Tp+1} F_{1I}(p)$$

и для 2-го корпуса

$$H_2(p) = \frac{1/K}{Tp+1} F_{2I}(p) = \frac{1/K}{Tp+1} F_{1O}(p) = \frac{1/K}{Tp+1} KH_1(p).$$

Используя выражение $H_1(p)$, получим

$$H_2(p) = \frac{1/K}{Tp+1} \frac{1}{Tp+1} F_{1I}(p) = \frac{1/K}{(Tp+1)^2} F_{1I}(p).$$

Применяя эту процедуру последовательно, можно определить передаточную функцию ($W(p)$), имеющую отношение $F_{nI}(p)$ к уровню в n -ом аппарате ($H_n(p)$)

$$H_n(p) = W(p) F_{1I}(p) = \frac{K_e}{(Tp+1)^n} F_{1I}(p), \quad K_e = 1/K.$$

Рассмотрим пример системы, состоящей из восьми аппаратов, т.е. $n=8$, и имеющей следующие параметры $K=2$ и $T=1$ с. В этом случае

$$W(p) = \frac{0.5}{(p+1)^8}.$$

На рисунке 5.5 показано динамическое поведение системы при изменении уровня жидкости на 20% (от 60 % до 80 %). Как видно из реакции системы (рис. 5.5), время запаздывания приблизительно равно 2с.

Можно обобщить анализ предыдущей системы для любого процесса, имеющего N последовательно соединенных элементов первого порядка, и имеющего, каждый в отдельности, постоянную времени, равную τ/N . Таким образом, получается передаточная функция (для удобства коэффициент усиления принят равным единице)

$$W(p) = \frac{1}{\left(1 + \frac{\tau}{N} p\right)^N}.$$

Изменяя значение N от 1 до ∞ , переходный процесс объекта первого порядка сдвигается по времени, что приводит к чистому запаздыванию, равному τ

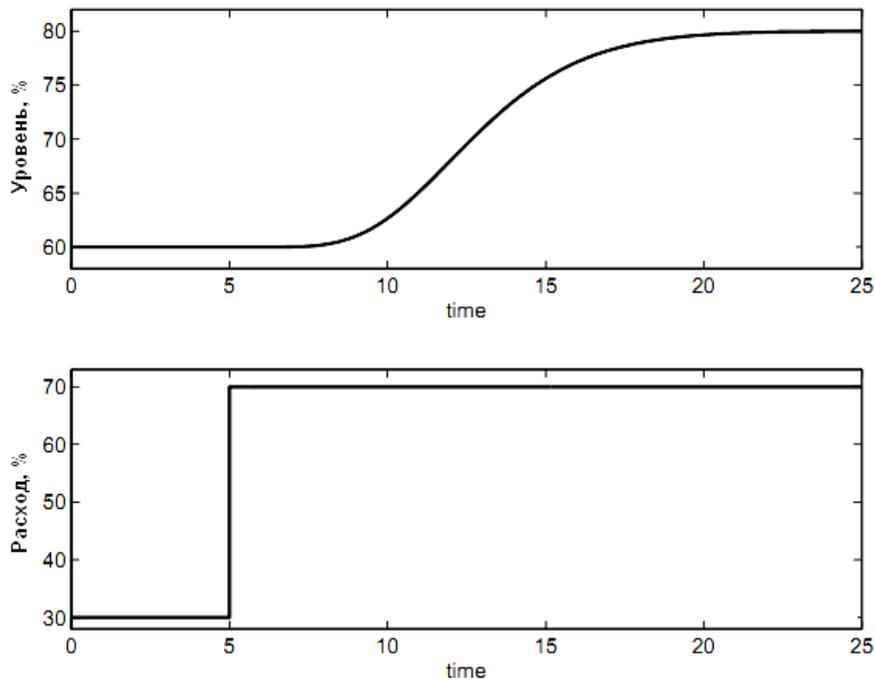


Рисунок 5.5 – Переходный процесс по уровню в системе, состоящей из 8-ми корпусов при ступенчатом изменении расхода жидкости на входе

$$e^{-\tau p} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\left(1 + \frac{\tau}{N} p\right)^N}$$

Когда одна постоянная времени намного больше, чем другие (встречается во многих процессах), меньшие постоянные времени обеспечивают инерционную (емкостную) задержку, которая проявляется как чистое запаздывание. Такое запаздывание называется «емкостным». В этой ситуации динамические эффекты происходят главным образом из-за этой большей постоянной времени. Поэтому возможно приблизить модель очень высокого порядка, комплекса, динамического процесса к упрощенной модели, состоящей из процесса первого порядка, объединенного с элементом запаздывания. Несколько производственных процессов имеют «эффект запаздывания», произведенный накоплением большого числа систем первого порядка.

Наличие запаздывания фактически характеризует каждую систему автоматического управления, однако во многих практических расчетах, с целью их упрощения, проектировщики пренебрегают им, но это допустимо лишь в случаях, когда величина запаздывания t очень мала и не оказывает

существенного влияния на функционирование системы. В частности, запаздывание сильно влияет не только на устойчивость системы, но и время регулирования, т.е. длительность переходного процесса системы после начала отклонения регулируемого параметра.

Математические модели звена запаздывания.

Рассмотрим звено с запаздыванием, которое характеризуется следующей зависимостью между входной величиной $x(t)$ и выходной величиной $y(t)$

$$y(t) = x(t - \tau). \quad (5.11)$$

Время запаздывания τ в уравнении (5.11) может быть постоянной величиной. В случае когда $\tau = \text{const}$, уравнение (5.11) в операторной форме имеет вид

$$Y(p) = e^{-p\tau} X(p).$$

Таким образом, передаточная функция звена с постоянным запаздыванием $W_e(p)$ запишется

$$W_e(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = e^{-p\tau}. \quad (5.12)$$

В случае переменного запаздывания передаточную функцию в общем виде, аналогичном выражению (5.12), получить невозможно, так как она зависит от входной величины $x(t)$ и самой функции переменного запаздывания $\tau(t)$.

С математической точки зрения функцию (5.12) можно разложить в быстросходящиеся ряды. К подобным видам разложения можно отнести, например, ряд Тейлора

$$W_e(p) = e^{-p\tau} \approx 1 - p\tau + \frac{(p\tau)^2}{2!} - \frac{(p\tau)^3}{3!} + \dots, \quad (5.13)$$

которое в операторной форме можно записать передаточной функцией вида

$$W_e(p) = e^{-p\tau} \approx \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{1 + \frac{p\tau}{n}} \right]^n. \quad (5.14)$$

Поскольку ряд (5.14) является медленно сходящимся, то, следовательно, нельзя ограничиться малым числом членов разложения.

Поэтому приближение $e^{-p\tau}$ производят с помощью функций передачи минимально-фазового вида. Известным примером такого подхода разложения является ряд Паде.

Аппроксимации Паде представляют собой отношение двух полиномов, построенных из коэффициентов разложения в ряд Тейлора заданной функции, а передаточную функцию можно записать

$$W_e(p) = e^{-p\tau} = \lim_{(n+m) \rightarrow \infty} \frac{F_{nm}(p\tau)}{G_{nm}(p\tau)}, \quad (5.15)$$

где

$$F_{nm}(p\tau) = 1 - \frac{mp\tau}{(n+m)!} + \frac{m(m-1)(p\tau)^2}{(n+m)(n+m-1)2!} - \frac{m(m-1)(m-2)(p\tau)^3}{(n+m)(n+m-1)(n+m-2)3!} + \dots;$$

$$G_{nm}(p\tau) = 1 + \frac{np\tau}{(n+m)!} + \frac{n(n-1)(p\tau)^2}{(n+m)(n+m-1)2!} + \frac{n(n-1)(n-2)(p\tau)^3}{(n+m)(n+m-1)(n+m-2)3!} + \dots$$

В практике исследований систем управления при аппроксимации передаточной функции звена запаздывания пользуются одним и реже двумя членами ряда Паде (5.15). Однако, как показывает опыт, это оказывается не всегда удачным вследствие значительных погрешностей аппроксимации, а при использовании одного члена ряда Паде в ряде случаев происходит существенное искажение переходной функции объекта.

Желаемый порядок ряда вычислялся по так называемой функции «риска» из условия обеспечения минимальной допустимой ошибки модели звена запаздывания

$$\Delta\varphi = \varphi_3 - \varphi_M \leq \varepsilon_{\text{доп}},$$

где $\Delta\varphi$ – ошибка в фазовой характеристике;

φ_3 – фазовая характеристика звена запаздывания;

φ_M – фазовая характеристика модели звена запаздывания;

$\varepsilon_{\text{доп}}$ – максимально допустимая ошибка адекватности модели звену.

Минимальный порядок разложения может быть определен из условия

$$\max \left| \varphi_3(\omega_{\max}) - \varphi_M(\omega_{\max}) \right| \leq \varepsilon_{\text{доп}}, \quad (5.16)$$

где ω_{\max} – минимальное значение частоты, ограничивающее частотный диапазон, в котором выполняется аппроксимация, может определяться на основании критерия устойчивости Найквиста, $\omega_{\max} = \omega^H$ (ω^H – частота, при

которой модуль АФЧХ остальной части системы $W(j\omega)$ равен 1. Таким образом, алгоритм определения минимального порядка разложения для моделирования объектов с чистым запаздыванием имеет вид:

Шаг 1: задается точность аппроксимации $\varepsilon_{\text{доп}}$ ФЧХ звена запаздывания. В конкретном случае $\varepsilon_{\text{доп}}$ выбирают с учетом удовлетворительных требований к качеству решений предметной задачи, ради которой синтезируется модель;

Шаг 2: задается, если не определен, интервал $(0, \omega_{\text{max}})$ частотного диапазона, в котором требуется обеспечить требуемую адекватность модели;

Шаг 3: строится семейство графиков ФЧХ звена запаздывания и ФЧХ моделей Паде различных порядков (рис. 5.6);

Шаг 4: на полученном семействе графиков ФЧХ из точки $\omega = \omega_{\text{max}}$ опускается перпендикулярная прямая до пересечения с графиком ФЧХ звена запаздывания;

Шаг 5: определяют ε в точке $\omega = \omega_{\text{max}}$ для различных порядков n , при которых обеспечивается условие (5.16);

Шаг 6: частота $\omega = \omega_{\text{max}}$ в некоторых случаях принимается равной частоте среза.

Таким образом, порядок модели звена запаздывания необходимо выбирать для каждого конкретного случая. И чем выше задана точность адекватности модели звену, тем выше порядок разложения, что не всегда удобно при последующем синтезе оптимального регулятора.

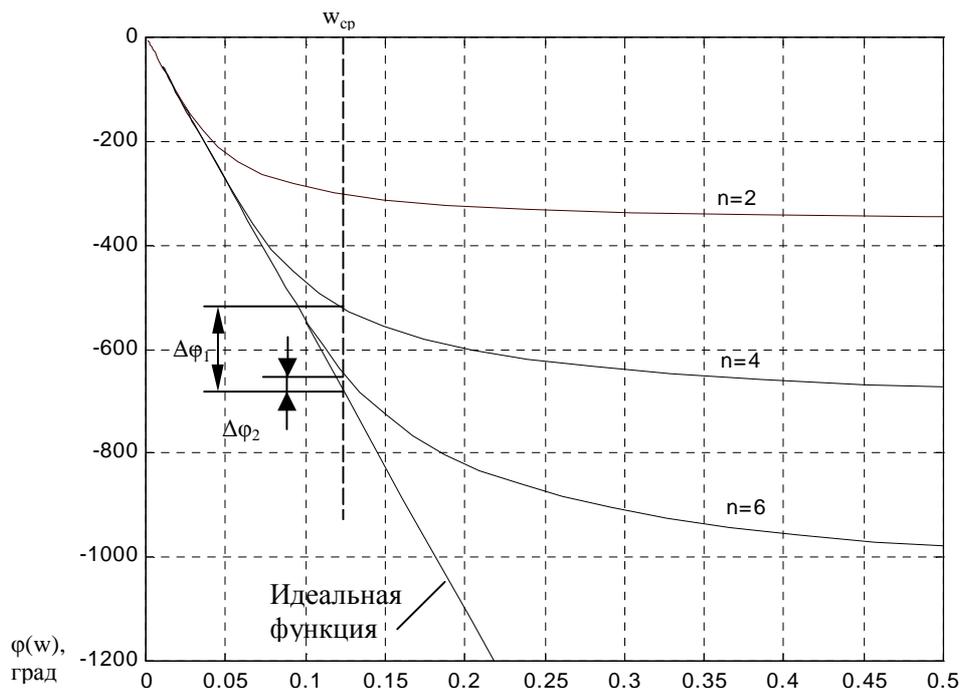


Рисунок 5.6 – Фазовые характеристики приближения вида (5.15)

Вместе с тем, необходимо отметить следующее. Во-первых, рассматриваемую модель можно отнести только к объектам с запаздыванием, имеющим безынерционную передаточную функцию. Во-вторых, при наличии инерционной части объекта следует учитывать также и фазовую характеристику этой инерционной части, т.е.

$$\Delta\varphi = \varphi_3 - \varphi_M - \varphi_0 \leq \varepsilon_{\text{доп}},$$

где φ_0 – фазовая характеристика инерционной части объекта.

Тогда

$$\Delta\varphi = -\omega\tau + 2n \cdot \arctg\left(\frac{\omega\tau}{2n}\right) + \sum_{i=1}^m \arctg(T_i\omega), \quad (5.17)$$

где n – порядок аппроксимации звена запаздывания;

m – порядок инерционной части объекта;

T_i – постоянные времени объекта.

Или при условии $\frac{\omega\tau}{2n} < 1$, получим

$$\Delta\varphi \approx -\frac{(\omega\tau)^3}{12n^2} + \sum_{i=1}^m \arctg(T_i\omega). \quad (5.18)$$

Значит с учетом фазовой характеристики инерционной части объекта можно уменьшить порядок аппроксимации модели объекта, причем тем больше, чем больше постоянные времени T_i .

Кроме этого, при выборе порядка аппроксимации запаздывания рядом Паде нет необходимости строить семейство графиков ФЧХ и графическим способом определять оптимальную модель разложения, достаточно на основании (5.18) найти порядок модели разложения

$$n = \sqrt{\frac{(\omega\tau)^3}{12\left(\sum_{i=1}^m \arctg(T_i\omega) - \varepsilon_{\text{доп}}\right)}}, \quad (5.19)$$

т.е. задав значение $\varepsilon_{\text{доп}}$ максимально допустимой ошибки адекватности модели звену запаздывания и выбрав частоту $\omega = \omega_{\text{max}}$, можно найти по предложенному выражению порядок разложения, округлив полученное значение до ближайшего целого числа в большую сторону.

Таким образом, формула (5.19) позволяет не строить семейство ФЧХ различных аппроксимирующих моделей и графоаналитическим путем определять порядок разложения.

6.14. 5.3. Методы управления объектами с запаздыванием

5.3.1. Управление системами с запаздыванием в управлении

Большинству процедур синтеза управляющих устройств для процессов с запаздыванием (исключая лишь те, которые связаны с оптимальными методами и о которых речь пойдет ниже в этом разделе) присуще использование прогнозирующего блока для компенсации запаздываний в контуре управления. В этом случае для синтеза регулятора можно применять стандартные процедуры, описанные в разделе 4. Имеются различные способы прогноза, которые можно применять для компенсации запаздываний по состояниям, выходам или управлениям. Однако более простой прогнозатор (предиктор, упредитель) Смита, хорошо зарекомендовавший себя при управлении процессами с запаздываниями по выходам и управлениям, или каскадное регулирование, компенсацию возмущений, компенсацию взаимодействий и т.д. Мы ограничимся лишь методами, ориентированными непосредственно на компенсацию запаздываний, сосредоточив внимание на недавних результатах по синтезу многомерных компенсаторов для случая процессов со многими запаздываниями.

Начнем с задачи синтеза компенсатора для одномерного процесса с запаздыванием. В конце 50-х годов был предложен так называемый прогнозатор Смита. Структурная схема соответствующей системы управления показана на рисунке 5.7.

Цель введения компенсатора с передаточной функцией

$$W_y(s) = W_m(s)(1 - e^{-\tau s}) \quad (5.20)$$

(он называется упредителем Смита) – уменьшить «вредное» влияние запаздывания на время τ в замкнутой системе, а точнее исключить функцию $e^{-\tau s}$ из характеристического уравнения замкнутой системы. Действительно, если компенсатор отсутствует ($W_y(s)=0$), то выход замкнутой системы задается выражением

$$x(s) = [1 + W_p(s)W_o(s)e^{-\tau s}]^{-1} W_o(s)e^{-\tau s} W_p(s)x_{\text{зад}}(s) \quad (5.21)$$

и соответствующее характеристическое уравнение содержит запаздывание τ :

$$1 + W_p(s) W_o(s) e^{-\tau s} = 0. \quad (5.22)$$

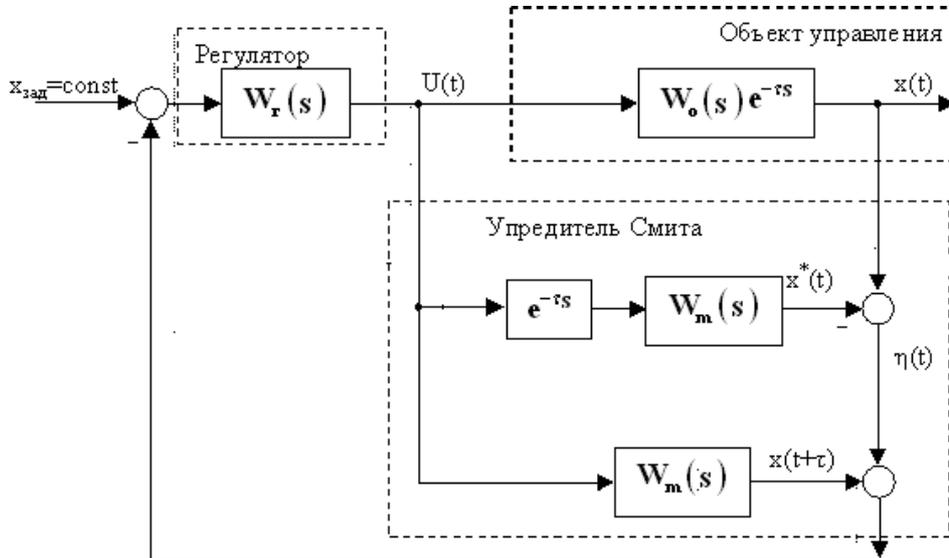


Рисунок 5.7 – Одномерная система регулирования с прогнозатором Смита для объекта с одним запаздыванием в управлении

После введения прогнозатора Смита (5.20) выход замкнутой системы задается выражением

$$x(s) = \left[1 + W_p(s) W_o(s) \right]^{-1} W_p(s) W_o(s) e^{-\tau s} x_{\text{зад}}(s)$$

и соответствующее характеристическое уравнение уже не содержит запаздывания:

$$1 + W_p(s) W_o(s) = 0,$$

таким образом, можно выбирать достаточно большие значения коэффициентов усиления, не опасаясь неустойчивости замкнутой системы.

Передаточная функция цепи регулятора выбирается таким образом, чтобы обеспечить наилучшее качество регулирования объектом, содержащим только одно звено $W_m(s) = W_o(s)$. Дополнительная обратная связь формирует сигнал, идентичный сигналу, который со временем появится на выходе системы, и подает его на вход регулятора до тех пор, пока не появится сигнал из главной цепи обратной связи. Как только этот сигнал появится, величина сигнала с упредителя станет равной нулю.

При наличии упредителя (5.20) передаточная функция регулятора запишется в виде

$$W_{py}(s) = \frac{W_p(s)}{1 + W_p(s)W_m(s)(1 - e^{-s\tau})}.$$

Передаточная функция системы регулирования с упредителем будет определяться из уравнения

$$W_{zc}(s) = \frac{W_o e^{-s\tau} \frac{W_p}{1 + W_p W_m (1 - e^{-s\tau})}}{1 + W_o e^{-s\tau} \frac{W_p}{1 + W_p W_m (1 - e^{-p\tau})}} = e^{-p\tau} \frac{W_o W_p}{1 + W_o W_p}.$$

Если передаточная функция регулятора выбрана таким образом, что обеспечиваются минимальные значения статической и динамической ошибок в системе, содержащей объект без запаздывания, то при наличии запаздывания качество переходного процесса не изменится, а произойдет лишь смещение выходной величины $x(t)$ по времени на значение, равное τ .

Если блок $W_m(s)$ в цепи дополнительной обратной связи не точно воспроизводит функцию $W_o(s)$ реального объекта, то в системе появляется переходный процесс, так как корректирующий сигнал обратной связи в этом случае не соответствует истинному сигналу.

Рассмотрим влияние возмущающего воздействия $f(t)$ на выходную величину системы с упредителем. Если возмущение приложено на входе объекта и воздействует на выходную величину с той же передаточной функцией, что и регулирующее воздействие, то в этом случае

$$\begin{aligned} W_{zc}^f(s) &= \frac{W_o e^{-s\tau}}{1 + W_o s e^{-\tau s} \frac{W_p}{1 + W_p W_o (1 - e^{-\tau s})}} = \\ &= W_o e^{-s\tau} - \frac{W_o W_p}{1 + W_o W_p} W_o e^{-2\tau s}. \end{aligned}$$

Реакция выходной величины $x(t)$ на скачкообразное изменение возмущения на входе объекта $f(t)$ представляет собой импульс, передний и задний фронты которого определяются видом передаточных функций

W_o и $\frac{W_o W_p}{1 + W_o W_p}$, при этом время переходного процесса всегда будет больше 2τ .

Элемент прогнозирования регулятора Ресвика (рис. 5.8), основан на системе со вспомогательной обратной связью, причем в цепи обратной связи находится элемент запаздывания.

Уравнения выхода на основе схемы имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon(s) &= x_3(s) - y(s), \\ U_p(s) &= \varepsilon(s) \cdot \left(\frac{1}{W_o(s)} \right), \\ U(s) &= U_p(s) + \beta e^{-\tau s} U(s), \\ y(s) &= W_o(s) e^{-\tau s} (U(s) + f(s)), \end{aligned} \right\} \quad (5.23)$$

где $\beta \leq 1$, так как, при больших значениях β система была бы неустойчива из соотношения (5.23).

В случае, когда $\beta = 1$, получим:

$$y(p) = e^{-\tau p} x_3(p) + W_o(p) (e^{-\tau p} - e^{-2\tau p}) f(p).$$

Выражение полностью совпадает с выражением для регулятора Смита, поэтому выводы и работа системы, а значит и качество управления также совпадают.

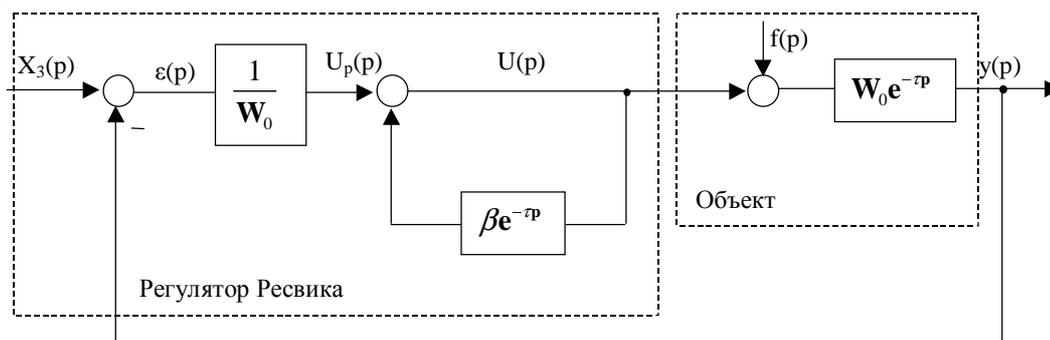


Рисунок 5.8 – Схема системы с «классическим» регулятором Ресвика

Построим регулятор Ресвика, используя метод синтеза, основанный на построении регуляторов для линейных и нелинейных систем на базе интегрирующих фильтров.

Пусть объект регулирования описывается дифференциальными уравнениями в операторной форме:

$$\begin{aligned} & \left[p^n + b_1 p^{n-1} + b_2 p^{n-2} \dots + b_j p^{n-j} + \dots + b_n \right] x = \\ & = \left[p^m + a_1 p^{m-1} + a_2 p^{m-2} \dots + a_j p^{m-j} + \dots + a_m \right] e^{-\tau p} U, \end{aligned} \quad (5.24)$$

где x – выходная координата объекта;
 U – вектор управления;
 $p = d/dt$ – оператор дифференцирования;
 b_i, a_i – постоянные коэффициенты;
 τ – время транспортного запаздывания.

И пусть требуемые показатели качества системы управления вполне определенно задаются желаемым дифференциальным уравнением:

$$\begin{aligned} & \left[p^v + \gamma_1 p^{v-1} + \gamma_2 p^{v-2} \dots + \gamma_k p^{v-k} + \dots + \gamma_v \right] x^* = \\ & = \left[\gamma_{v-\lambda+1} p^{\lambda-1} + \gamma_{v-\lambda+2} p^{\lambda-2} \dots + \gamma_{v-k} p^{\lambda-k} + \dots + \gamma_v \right] e^{-\tau p} x_3, \end{aligned} \quad (5.25)$$

где x^* – выходной сигнал системы управления, обладающей заданными свойствами;

x_3 – задающее воздействие системы;

γ_i – коэффициенты, определяющие желаемое движение в системе управления;

v, λ – соответственно порядок и астатизм синтезированной системы.

Зададимся качеством синтезируемой системы в виде функционала среднеквадратичной ошибки, определяющей близость передаточной функции замкнутой системы к желаемой (5.25):

$$I = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} \left| \widehat{W}(p) - \frac{W_k(p) W_o(p)}{1 + W_k(p) W_o(p)} \right|^2 dp \quad (5.26)$$

Задача состоит в определении из минимума функционала (5.26) структуры корректирующего устройства и его параметров, чтобы построенное по структуре реальное звено корректирующего устройства обеспечивало бы в реальной системе (регулятор + реальный объект) динамические характеристики, близкие к расчетным.

Из (5.26) с учетом (5.25) определим структуру корректирующего устройства и его параметры:

$$W_k = \frac{R_1(p, \tau, x)}{R_2(p, \tau, x)}, \quad (5.27)$$

где

$$\begin{aligned}
 R_1(p, \tau, x) &= \left[p^n + b_1 p^{n-1} + b_2 p^{n-2} \dots + b_j p^{n-j} + \dots + b_n \right] \times \\
 &\times \left[\gamma_{v-\lambda+1} p^{\lambda-1} + \gamma_{v-\lambda+2} p^{\lambda-2} \dots + \gamma_{v-k} p^{\lambda-k} + \dots + \gamma_v \right]; \\
 R_2(p, \tau, x) &= \left[\left[p^v + \gamma_1 p^{v-1} + \gamma_2 p^{v-2} \dots + \gamma_k p^{v-k} + \dots + \gamma_v \right] - \right. \\
 &- \left. \left[\gamma_{v-\lambda+1} p^{\lambda-1} + \gamma_{v-\lambda+2} p^{\lambda-2} \dots + \gamma_{v-k} p^{\lambda-k} + \dots + \gamma_v \right] \times e^{-\tau p} \right] \times \\
 &\times \left[p^m + a_1 p^{m-1} + a_2 p^{m-2} \dots + a_j p^{m-j} + \dots + a_m \right].
 \end{aligned} \tag{5.28}$$

Анализируя (5.28), можно отметить, что корректор (5.27) будет физически реализуем, если $m + v \geq n + \lambda - 1$.

Раскрывая (5.28) с учетом (5.25), получим

$$\begin{aligned}
 &\left[c_0 p^\mu + c_1 p^{\mu-1} + c_2 p^{\mu-2} \dots + c_j p^{\mu-j} + \dots + c_\mu \right] (x_3 - x) = \\
 &= \left[g_0 p^\theta + g_1 p^{\theta-1} + g_2 p^{\theta-2} \dots + g_j p^{\theta-j} + \dots + g_\theta \right] U,
 \end{aligned} \tag{5.29}$$

где c_i, g_i – коэффициенты, определяемые коэффициентами выражения (5.28),

$$\begin{aligned}
 \mu &= n + \lambda - 1, \\
 \theta &= m + u.
 \end{aligned}$$

Регулятор (5.29) возможно реализовать на базе интегрирующих фильтров

$$\begin{aligned}
 \dot{y}_i &= y_{i+1}, \\
 \dot{y}_\mu &= U^*,
 \end{aligned} \tag{5.30}$$

где $U^* = (x_3 - x) - \sum_{i=1}^{\theta} g_i y_i$,

а фазовые координаты фильтра (5.30) позволяют сформировать управление

$$U = \sum_{j=1}^{\mu} c_j y_j.$$

Рассмотрим в качестве иллюстрации пример синтеза системы управления с запаздыванием.

Пример. 5.1. Пусть задан объект управления математическое описание которого характеризуется уравнением вида

$$p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3 = b_3 e^{-\tau p} U,$$

где $b_1=2,167$; $b_2=0,339$; $b_3=0,014$; $\tau=9,5$ мин.

Требуемые качественные показатели замкнутой системы управления зададим дифференциальным уравнением

$$(p^4 + \gamma_1 p^3 + \gamma_2 p^2 + \gamma_3 p + \gamma_4) y = \gamma_4 e^{-\tau p} x_3,$$

где $\gamma_1=0,6$; $\gamma_2=0,135$; $\gamma_3=0,0135$; $\gamma_4=0,0005$; $\tau=9,5$ мин.,

и учитывая функционал (5.26), определим уравнение регулятора

$$\begin{aligned} (p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3) \gamma_4 (x_3 - y) = \\ = (p^4 + \gamma_1 p^3 + \gamma_2 p^2 + \gamma_3 p + \gamma_4 (1 - e^{-\tau p})) b_3 U. \end{aligned}$$

Реализация регулятора на базе интегрирующего фильтра будем осуществляться по дифференциальным уравнениям

$$\dot{y}_1 = y_2,$$

$$\dot{y}_2 = y_3,$$

$$\dot{y}_3 = y_4,$$

$$\dot{y}_4 = x_3 - y - \gamma_1 y_4 - \gamma_2 y_3 - \gamma_3 y_2 - \gamma_4 (1 - e^{-\tau p}) y_1,$$

фазовые координаты которого позволяют сформировать управление

$$U = \frac{\gamma_4}{b_3} (b_1 y_3 + b_2 y_2 + b_3 y_1).$$

Структурная схема синтезированной системы приведена на рисунке 5.9.

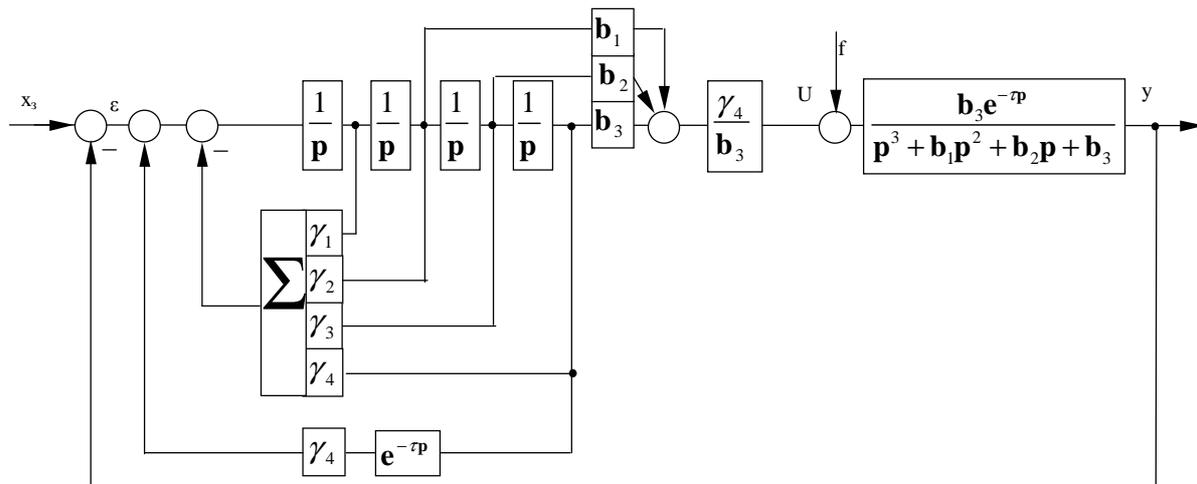


Рисунок 5.9 – Схема замкнутой АСР с интегрирующим фильтром.

Преобразуем систему, изображенную на рисунке 5.9, к виду, представленному на рисунке 5.10, и получим ни что иное, как систему с регулятором Ресвика. Здесь $\hat{W}=\beta$, где β (см. (5.23)) есть величина динамическая, а не статическая.

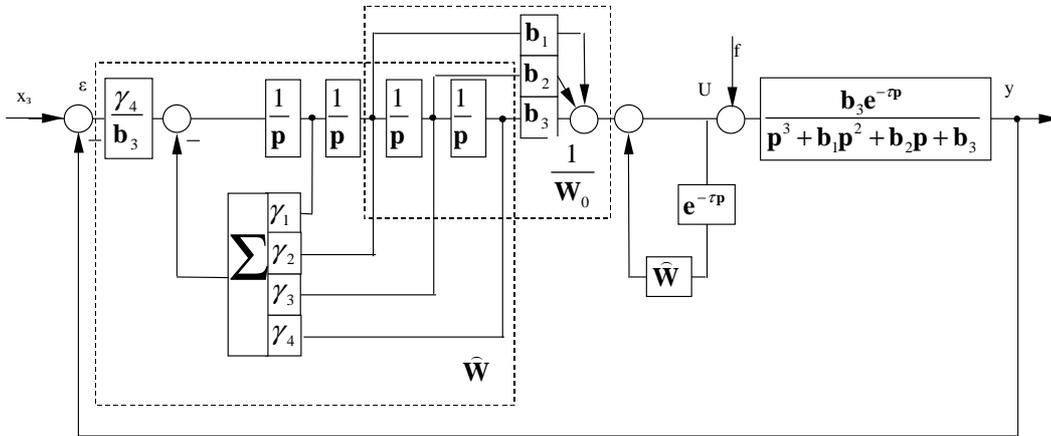


Рисунок 5.10 – Схема замкнутой АСР с модифицированным регулятором Ресвика, эквивалентная схеме на рисунке 5.9

Также несложно показать, что полученную схему регулятора Ресвика можно преобразовать в систему с упредителем Смита. Для этого запишем

$$\hat{W}(p) \cdot W_m^{-1}(p) = \frac{W_r(p)}{1 + W_r(p)W_m(p)}$$

и определим передаточную функцию регулятора в системе с упредителем Смита в виде

$$W_r(p) = \frac{\hat{W}(p)W_m^{-1}}{1 - \hat{W}(p)}$$

Здесь W_m – передаточная функция модели инерционной части объекта управления, а W_r – передаточная функция регулирующего устройства в схеме с упредителем Смита.

5.3.2. Управление многомерными процессами со многими запаздываниями

Для многомерных систем со многими запаздываниями задача синтеза регулятора с компенсацией запаздывания существенным образом усложняется. Рассмотрим многомерную систему в частотной области (2.6).

Зависимость между m - мерным вектором управлений $\bar{u}(s)$ и q -мерным вектором выходов $\bar{y}(s)$ задается передаточной матрицей (2.7) $G(s)$

$$\bar{y}(s) = G(s)\bar{u}(s), \quad (5.31)$$

при этом передаточная матрица имеет вид

$$G(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & \dots & g_{1m}(s) \\ \dots & \dots & \dots \\ g_{q1}(s) & \dots & g_{qm}(s) \end{bmatrix}. \quad (5.32)$$

Во многих задачах, особенно если передаточные функции восстанавливаются по результатам экспериментов, $G(s)$ обычно имеют простой вид (2.16). Однако возможны и более сложные передаточные функции

$$g_{ij}(s) = \frac{k_{ij} e^{-\tau_{ij}s} \prod_p (s + \eta_{ij}^p)}{\prod_p (s + \lambda_{ij}^p)} \quad (5.33)$$

или

$$g_{ij}(s) = \frac{e^{-\tau_{ij}s} (a_{ij,1}s^1 + a_{ij,1-1}s^{1-1} + \dots + a_{ij,0})}{(s^n + b_{ij,n-1}s^{n-1} + \dots + b_{ij,0})},$$

где множитель $e^{-\tau_{ij}s}$ характеризует запаздывание объекта управления по ij -каналу.

Рассмотрим систему регулирования, схема которой показана на рисунке 5.11. Пусть G_r – передаточная функция регулятора, H – передаточная функция измерительного устройства, а \bar{y}_{zd} – уставка. Выход замкнутой системы задается выражением

$$\bar{y} = (E + GG_r H)^{-1} [GG_r \bar{y}_{zd} + G_d \bar{f}].$$

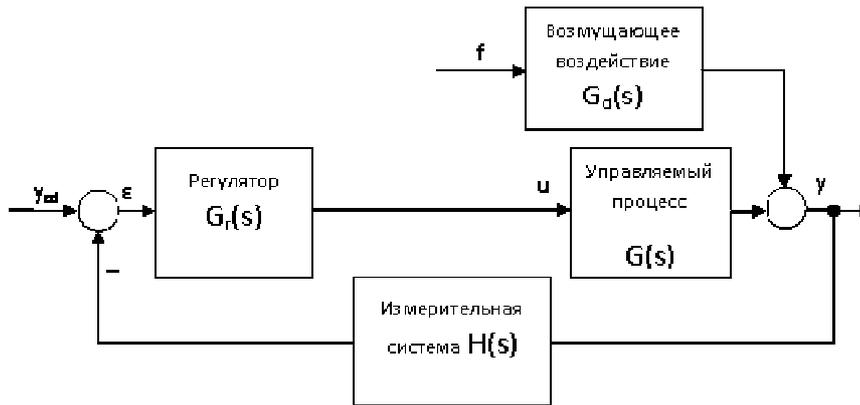


Рисунок 5.11 – Схема обыкновенной многомерной системы управления

При наличии запаздываний в системе выбор закона регулирования гораздо более ограничен по сравнению с рассмотренным в разделе 4 случаем систем без запаздывания; поэтому целесообразно принять следующую методику синтеза регулятора: сначала каким – либо образом построить блок компенсации запаздываний или прогнозатор, а затем воспользоваться одним из стандартных приемов, описанных в разделе 4.

Как было отмечено выше, имеется много способов представления систем с запаздываниями. Так, в случае линейной системы с постоянными запаздываниями наиболее общее представление во временной области имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_i B_i x(t - \beta_i) + \sum_j M_j u(t - \mu_j), \\ y(t) &= \sum_i P_i x(t - \pi_i), \end{aligned} \quad (5.34)$$

где x – n -мерный вектор состояний;

y – l -мерный вектор выхода;

u – m -мерный вектор управления;

β_i, μ_i, π_i – постоянные запаздывания.

Используя преобразование Лапласа, получим соответствующее представление системы (5.34) в частотной области,

$$\left[p^n + l_1 e^{-p\theta_1} p^{n-1} + \dots + l_j e^{-p\theta_j} p^{n-j} + \dots + l_n e^{-p\theta_n} \right] y = GU, \quad (5.35)$$

где y – вектор координат выхода объекта;

U – вектор координат управления объекта;

$p = d/dt$ – оператор дифференцирования;

θ_j – время эффекта последействия;

l_j – постоянные коэффициенты, определяемые коэффициентами матрицы B_i ;

G – полиномиальная матрица, элементы которой являются многочленами с постоянными коэффициентами относительно оператора дифференцирования p и определяемая выражением

$$G = \sum_i P_i e^{-\pi_i p} \cdot \Delta \cdot \sum_j M_j e^{-\mu_j p}; \quad (5.36)$$

Δ – присоединенная матрица по отношению к матрице $\left(pE - \sum_i B_i e^{-\beta_i p} \right)$.

По сути, многочлен в левой части выражения (5.35) является характеристическим уравнением объекта (5.34) и определяется как

$$\det \left[pE - \sum_i B_i e^{-\beta_i p} \right].$$

Необходимо отметить, что передаточная функция (5.34) имеет гораздо более сложный вид, чем обычно бывает в реальных задачах [см. уравнение (5.33)]. Это характерно для тех сравнительно редких на практике случаев, когда модель объекта управления с самого начала задается в виде системы дифференциальных уравнений и нет необходимости восстанавливать ее по результатам экспериментов.

Оказывается, что для многомерных систем с запаздыванием вида (5.35) можно построить компенсатор, аналогичный прогнозатору Смита и приводящий к тому, что запаздывающие члены в характеристическом уравнении замкнутой системы исчезают. Однако в отличие от одномерной задачи, где синтез компенсатора сводится к прогнозу выхода на время запаздывания, в многомерном случае компенсация связана с прогнозом некоторых «фиктивных» переменных состояния в заданные моменты. Структура многомерной системы с запаздываниями, охваченной обратной связью с компенсатором в контуре регулирования, изображена на рисунке 5.12.

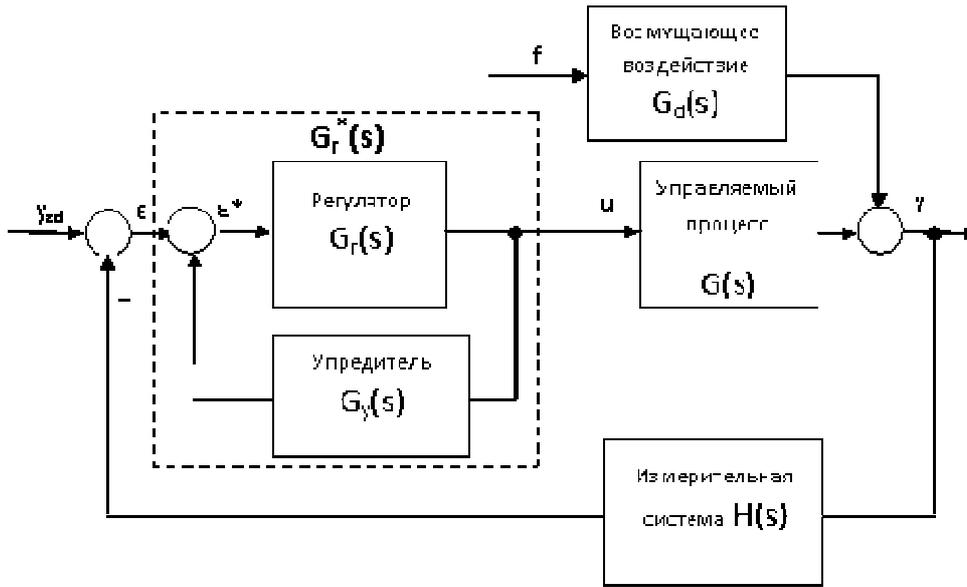


Рисунок 5.12 – Система регулирования с компенсатором запаздываний для многомерного объекта управления

Заметим, что эта структура аналогична рассмотренному выше одномерному случаю, т.е. собственно регулятору Смита. Передаточную функцию компенсатора G_y можно выбирать разными способами. Пусть при

$$G_k = H^* G^* - HG, \quad (5.37)$$

где H^*, G^* – соответствующие H и G передаточные функции без запаздываний, устраняется запаздывание по выходам и запаздывание в характеристическом уравнении замкнутой системы. Найдем передаточную функцию внутреннего контура G_r^* на схеме рисунка 5.12. Имеем $\bar{u} = G_r^* \bar{\varepsilon}$ или

$$G_r^* = (E + G_r G_y)^{-1} G_r. \quad (5.38)$$

Полная передаточная функция в этом случае задается выражением

$$\bar{y} = (E + GG_r^*H)^{-1} (GG_r^* \bar{y}_{zd} + \bar{G}_d \bar{f}). \quad (5.39)$$

Покажем, что многомерный компенсатор (5.37) позволяет устранить запаздывание в характеристическом уравнении замкнутой системы (5.39). Постановка (5.37) и (5.38) в (5.39) дает

$$\bar{y} = (E + GR^{-1}G_rH)^{-1} (GR^{-1}G_r \bar{y}_{zd} + G_d \bar{f}), \quad (5.40)$$

где $R = E + G_r (H^* G^* - HG)$. (5.41)

Если G^* - квадратная невырожденная матрица, то воспользовавшись леммой об обращении матриц, получим $(E + GR^{-1}G_rH)^{-1} = G(R + G_rHG)^{-1}RG^{-1}$.

Из выражения (5.41) следует отношение $R + G_rHG = E + G_rH^*G^*$. Подставив выражения для $(I + GR^{-1}G_cH)^{-1}$ и для $R + G_cHG$ в (5.41), найдем

$$\bar{y} = G(E + G_rH^*G^*)^{-1}G_r\bar{y}_{zd} + G(E + G_rH^*G^*)^{-1}RG^{-1}G_d\bar{f}$$

Устойчивость замкнутой системы определяется корнями характеристического уравнения

$$|I + G_rH^*G^*| = 0. \quad (5.42)$$

Как видно из (5.42), членов с запаздыванием в характеристическом уравнении уже нет, и, стало быть, запаздывания не влияют на устойчивость замкнутой системы. Это верно, однако, лишь в том случае, когда модель управляемого процесса абсолютно адекватна ему. На практике, конечно, этого достичь не удастся и всегда остается некоторая неточность – ошибка аппроксимации объекта выбранной моделью; поэтому компенсация запаздываний не является полной, и при настройке параметров регулятора приходится соблюдать некоторую осторожность. Несмотря на это, качество регулирования в системе с компенсацией запаздываний оказывается значительно более высоким, чем без нее.

Можно построить также и оптимальный многомерный регулятор, аналогичный одномерному регулятору (5.27).

Задача синтеза оптимальной системы управления многомерным объектом с несколькими различными запаздываниями заключается в нахождении уравнений регулятора, которые в совокупности с уравнениями объекта (5.34), образуют устойчивую систему.

Процедура синтеза оптимальных многомерных систем управления объектами с запаздыванием, основанная на методах динамического программирования и принципе максимума, известна достаточно давно. Решения данного класса задач наталкиваются на значительные трудности. Причем основная трудность состоит в исследовании системы сопряженной системы с опережающим аргументом. Рассмотрим соответствующее представление системы (5.34) в частотной области (5.35).

Предположим, что система замыкается через звено, которое описывается уравнением

$$\left[p^r + \alpha_r p^{r-1} + \dots + \alpha_1 \right] z = Hy, \quad (5.43)$$

где z – вектор координат выхода звена обратной связи, размерность которого совпадает с размерностью вектора выхода объекта y ;

H – полиномиальная матрица, элементы которой являются многочленами с постоянными коэффициентами относительно оператора дифференцирования p .

$$\begin{aligned} h_{ii} &= \left[d_q p^{q-1} + \dots + d_1 \left(p^s + \chi_s p^{s-1} + \dots + \chi_1 \right) \right] e^{-\delta_{ii} p}, \\ h_{ij} &= 0, \quad \text{при } i \neq j, \quad i = 1, 2, \dots, l, \end{aligned} \quad (5.44)$$

δ_{ii} – время запаздывания в канале обратной связи.

Т.е. обратная связь в синтезируемой системе осуществляется через инерционно–форсирующее звено, выбор параметров которого позволяет смоделировать различные типы первичных преобразователей – датчиков.

Многочлен в левой части выражения (5.43) является характеристическим полиномом звена обратной связи.

Зададимся целью управления в виде функционала

$$J = \int_0^{\infty} (y_{зад} - z)^T \cdot (y_{зад} - z) dt. \quad (5.45)$$

Функционал (5.45) представляет собой интегральный критерий вектора среднеквадратичной ошибки, определяющей близость измеряемого вектора замкнутой системы к заданному.

Требуемые показатели качества замкнутой системы управления вполне определенно задаются желаемым уравнением следующего вида

$$\left[p^v + \gamma_1 p^{v-1} + \dots + \gamma_k p^{v-k} + \dots + \gamma_v \right] y = \Gamma y_{зад}, \quad (5.46)$$

где $y_{зад}$ – задающее воздействие системы;

Γ – полиномиальная матрица, элементы которой являются многочленами с постоянными коэффициентами относительно оператора дифференцирования p

$$\begin{aligned} \Gamma_{ij} &= \left[\gamma_{v-\lambda+1} p^{\lambda-1} + \dots + \gamma_{v-1} p + \gamma_v \right] e^{-p\tau_{ij}}, \\ i &= 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, l; \end{aligned} \quad (5.47)$$

v и λ – порядок и астатизм синтезируемой системы, по ij -каналу соответственно;

γ_k – коэффициенты, задающие распределение корней характеристического уравнения замкнутой системы;

τ_{ij} – время чистого запаздывания по ij -каналу, значение которого выбирается, согласно (5.36) с учетом времени запаздывания в канале обратной связи (2.6).

Задача управления в этом случае будет сводиться к определению такого закона регулирования в форме

$$R_1(p, \tau, \theta)(y_{\text{зад}} - z) = R_2(p, \tau, \theta)U, \quad (5.48)$$

который присоединенный к объекту управления (5.35) с учетом звена обратной связи (5.43) гарантировал бы минимальное значение функционалу (5.45).

В выражении (5.48) $R_1(p, \tau, \theta)$ и $R_2(p, \tau, \theta)$ – многочлены некоторых степеней оператора дифференцирования с коэффициентами, зависящими от фазовых координат объекта и времен запаздываний θ_i и τ_{ij} .

Замкнутая система (5.35), (5.36), (5.47) описывается соотношением вида

$$\begin{aligned} & \left\{ \left[p^n + l_1 e^{-p\theta_1} p^{n-1} + \dots + l_j e^{-p\theta_j} p^{n-j} + \dots + l_n e^{-p\theta_n} \right] \times \right. \\ & \times \left[p^r + \alpha_r p^{r-1} + \dots + \alpha_1 \right] \cdot R_2(p, \tau, \theta) + G \cdot H \cdot R_1(p, \tau, \theta) \left. \right\} y = \\ & = G \cdot \left[p^r + \alpha_r p^{r-1} + \dots + \alpha_1 \right] \cdot R_1(p, \tau, \theta) y_{\text{зад}}. \end{aligned} \quad (5.49)$$

Путем ряда последовательных разложений полиномиальных матриц G , H и Γ по элементам различных строк и столбцов эти матрицы могут быть представлены в виде многочлена

$$\begin{aligned} G &= p^m + G_1 p^{m-1} + \dots + G_i p^{m-i} + \dots + G_m, \\ H &= H_1 p^{q-1} + \dots + H_q p^s + H_q X_1 p^{s-1} + \dots + H_q X_s, \\ \Gamma &= \Gamma_1 p^{\lambda-1} + \dots + \Gamma_{\nu-1} p + \Gamma_\nu, \end{aligned} \quad (5.50)$$

коэффициенты которых G_i , H_i , X_i , Γ_i представляют собой уже числовые матрицы той же размерности, что и исходные матрицы G , H , Γ соответственно. Кроме того, элементы этих числовых матриц на основании уравнений (5.36), (5.44) и (5.47) могут содержать звенья чистого запаздывания.

Сравнивая (5.46) и (5.49) с учетом (5.50) и выполнив математические преобразования, получим

$$\begin{aligned}
R_1(p, \tau, \theta) &= \left[E p^n + l_1 e^{-p\theta_1} E p^{n-1} + \dots + l_j e^{-p\theta_j} E p^{n-j} + \dots + l_n e^{-p\theta_n} E \right] \times \\
&\times \left[E p^r + \alpha_r E p^{r-1} + \dots + \alpha_1 E \right] \cdot \left[\Gamma_1 p^{\lambda-1} + \dots + \Gamma_{v-1} p + \Gamma_v \right]; \\
R_2(p, \tau, \theta) &= \left\{ \left[E p^v + \gamma_1 E p^{v-1} + \dots + \gamma_k E p^{v-k} + \dots + \gamma_v E \right] \times \right. \\
&\times \left[E p^r + \alpha_r E p^{r-1} + \dots + \alpha_1 E \right] - \left[\Gamma_1 p^{\lambda-1} + \dots + \Gamma_{v-1} p + \Gamma_v \right] \times \\
&\times \left[H_1 p^{q-1} + \dots + H_q p^s + H_q X_1 p^{s-1} + \dots + H_q X_s \right] \left. \right\} \times \\
&\times \left[p^m + G_1 p^{m-1} + \dots + G_i p^{m-i} + \dots + G_m \right],
\end{aligned} \tag{5.51}$$

где E – единичная матрица n -го порядка.

В уравнения (5.51) единичная матрица введена для упрощения процедуры вычисления матричных многочленов $R_1(p, \tau, \theta)$ и $R_2(p, \tau, \theta)$.

Анализируя (5.51) можно отметить, что регулятор (5.48) будет физически реализуем, если

$$m + v \geq n + \lambda - 1, \tag{5.52}$$

а также

$$\begin{aligned}
&\left[E p^n + l_1 e^{-p\theta_1} E p^{n-1} + \dots + l_j e^{-p\theta_j} E p^{n-j} + \dots + l_n e^{-p\theta_n} E \right] \times \\
&\times \left[E p^r + \alpha_r E p^{r-1} + \dots + \alpha_1 E \right] \geq \left[\Gamma_1 p^{\lambda-1} + \dots + \Gamma_{v-1} p + \Gamma_v \right] \times \\
&\times \left[H_1 p^{q-1} + \dots + H_q p^s + H_q X_1 p^{s-1} + \dots + H_q X_s \right].
\end{aligned} \tag{5.53}$$

По сути неравенства (5.52) и (5.53) накладывают ограничения на реализацию регулятора, который обеспечивал бы заданные показатели качества при требуемом астатизме системы управления объектом с запаздываниями, описываемый выражением (5.46).

Реализация регулятора. Раскрывая (5.51) с учетом того, что $s < r$, $q < r$ и подставляя в (5.48), получим

$$\begin{aligned}
&\left[W_0 p^{n+r+\lambda-1} + (W_1 + L_1) p^{n+r+\lambda-2} + \dots + \right. \\
&\left. + (W_{n+r+\lambda-1} + L_{n+r+\lambda-1}) \right] \cdot (y_{\text{зад}} - z) = \\
&\left[p^{m+v+r} + Q_1 p^{m+v+r-1} + \dots + (Q_{m+\lambda+q-2} - K_{m+\lambda-2}) \cdot p^{m+\lambda-2} + \right. \\
&\left. + \dots + (Q_{m+v+r} - K_{m+v+r}) \right] U,
\end{aligned} \tag{5.54}$$

где – W_q , Q_q , K_q , L_q – числовые матрицы, коэффициенты которых зависят от коэффициентов выражений (2.13). Причем элементы матриц

$K_q = \parallel K_{ij} \parallel$ и $L_q = \parallel L_{ij} \parallel$ содержат звенья чистого запаздывания τ_{ij} и θ_{ij} соответственно.

Регулятор (5.46) возможно реализовать на базе интегрирующих фильтров

$$\begin{aligned} \dot{v}_i &= v_{i+1}, i = 1, 2, \dots, m + v + r - 1 \\ \dot{v}_{m+v+r} &= U^*, \end{aligned} \quad (5.55)$$

где $U^* = (y_{\text{зад}} - z) - (Q_{m+v+r} - K_{m+v+r})v_1 - \dots - (Q_{m+v+r-2} - K_{m+v+r-2})v_{m+\lambda+q-1} - \dots - Q_1 v_{m+v+r}$;

v – вектор координат выхода многомерного регулятора.

В этом случае фазовые координаты фильтра (5.55) позволяют сформировать управление

$$\begin{aligned} U &= (W_{n+r+\lambda-1} + L_{n+r+\lambda-1})v_1 + (W_{n+r+\lambda-2} + L_{n+r+\lambda-2})v_2 + \\ &\dots + (W_1 + L_1)v_{n+r+\lambda-1} + M_0 v_{n+r+\lambda}. \end{aligned} \quad (5.56)$$

Рассмотрим синтез многомерного регулятора на конкретном примере.

Пример 5.2. Пусть уравнения объекта управления заданы в матричной форме

$$\begin{aligned} \dot{x} &= B_0 x + B_1 x(t - \beta_1) + M_1 u(t - \mu_1) + M_2 u(t - \mu_2), \\ y &= P x, \end{aligned} \quad (5.57)$$

где

$$B_0 = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 0 & -2 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.5 & 0 \end{bmatrix}, M_1 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, M_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\beta_1 = 1, \mu_1 = 5, \mu_2 = 3.$$

Применяя преобразование Лапласа к (5.57), перейдем к частотному представлению в виде (5.35). Предварительно вычислим

$$\det \left(pE - \sum_i B_i e^{-\beta_i p} \right) = (p+2)^2 - 0.5e^{-p},$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} p+2 & 0.5e^{-p} \\ 1 & p+2 \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} (p+2)0.4e^{-5p} & 0.25e^{-p} \\ 0.4e^{-5p} & (p+2)0.5e^{-3p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4e^{-5p} & 0 \\ 0 & 0.5e^{-3p} \end{bmatrix} p + \begin{bmatrix} 0.8e^{-5p} & 0.25e^{-p} \\ 0.4e^{-5p} & 1.0e^{-3p} \end{bmatrix};$$

в результате получим

$$\left((p+2)^2 - 0.5e^{-p}\right)y = \left(\begin{bmatrix} 0.4e^{-5p} & 0 \\ 0 & 0.5e^{-3p} \end{bmatrix} p + \begin{bmatrix} 0.8e^{-5p} & 0.25e^{-p} \\ 0.4e^{-5p} & 1.0e^{-3p} \end{bmatrix} \right) u. \quad (5.58)$$

Предположим, что обратная связь объекта осуществляется через измерительное устройство вида

$$z = Hy, \quad (5.59)$$

где z – измеряемый выход,

$$H = \begin{bmatrix} e^{-\delta_{11}p} & 0 \\ 0 & e^{-\delta_{22}p} \end{bmatrix}, \text{ а } \delta_{11}=3, \delta_{22}=2.$$

Через δ_1 и δ_2 обозначены запаздывания, сосредоточенные в датчиках первой и второй выходных (т.е. измеряемых) координат.

Задавшись функционалом вида (5.45) и требуемыми характеристиками замкнутой системы в виде (5.46) с учетом условия реализуемости (5.52), получим

$$\left[p^3 + \gamma_1 p^2 + \gamma_2 p + \gamma_3 \right] y = \begin{bmatrix} \gamma_3 e^{-\tau_{11}p} & 0 \\ 0 & \gamma_3 e^{-\tau_{22}p} \end{bmatrix} y_{зад}, \quad (5.60)$$

где через τ_{11} и τ_{22} обозначены запаздывания определяемые, как

$$\tau_{ii} = \mu_{ii} + \delta_{ii}, \text{ и равные соответственно } \tau_{11}=8 \text{ и } \tau_{22}=5;$$

$\gamma_1=9$, $\gamma_2=27$, $\gamma_3=27$ – коэффициенты, гарантирующие апериодический переходный процесс по заданию длительностью $3s$ по каждому каналу без учета времени запаздывания по этим каналам.

Подставляя (5.58), (5.59) и (5.60) в выражение (5.51) определения матричных полиномов регулятора (5.48), получим

$$R_1 = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} p^2 + \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 4 \end{bmatrix} p + \begin{bmatrix} 4-0.5e^{-p} & 0 \\ 0 & 4-0.5e^{-p} \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{pmatrix} 67.5 & 0 \\ 0 & 54 \end{pmatrix}, \quad (5.61)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} p^4 + \begin{bmatrix} 11 & 0 \\ 0 & 11 \end{bmatrix} p^3 + \begin{bmatrix} 45 & 0 \\ 0 & 45 \end{bmatrix} p^2 + \\ + \begin{bmatrix} 54+27(1-e^{-8p}) & 0 \\ 0 & 54+27(1-e^{-5p}) \end{bmatrix} p + \begin{bmatrix} 54(1-e^{-8p}) & 0 \\ 0 & 54(1-e^{-5p}) \end{bmatrix}. \quad (5.62)$$

Или для первого управления согласно (5.61) и (5.62) получим регулятор, который описывается уравнением

$$\begin{aligned} & \left(p^4 + 11p^3 + 45p^2 + (54 + 27(1 - e^{-8p}))p + 54(1 - e^{-8p}) \right) (y_{\text{зад1}} - z_1) = \\ & = 67.5(p^2 + 4p + 4 - 0.5e^{-p})u_1. \end{aligned}$$

Его можно реализовать на базе интегрирующего фильтра вида

$$\begin{aligned} \dot{v}_1^1 &= v_2^1, \\ \dot{v}_2^1 &= v_3^1, \\ \dot{v}_3^1 &= v_4^1, \\ \dot{v}_4^1 &= U_1^*, \\ U_1^* &= (y_{\text{зад1}} - z_1) - 11v_4^1 - 45v_3^1 - (54 + 27(1 - e^{-8p}))v_2^1 - \\ & - 54(1 - e^{-8p})v_1^1, \end{aligned} \tag{5.63}$$

фазовые координаты фильтра (5.63) позволяют сформировать компенсационное управление

$$u_1 = 67.5 \left((4 - 0.5e^{-p})v_1^1 + 4v_2^1 + v_3^1 \right). \tag{5.64}$$

Аналогично проведем процедуру определения общего управления второго регулятора

$$\begin{aligned} & \left(p^4 + 11p^3 + 45p^2 + (54 + 27(1 - e^{-5p}))p + 54(1 - e^{-5p}) \right) (y_{\text{зад2}} - z_2) = \\ & = 54(p^2 + 4p + 4 - 0.5e^{-p})u_2 \end{aligned}$$

и получим

$$\begin{aligned} U_2^* &= (y_{\text{зад2}} - z_2) - 11v_4^2 - 45v_3^2 - (54 + 27(1 - e^{-5p}))v_2^2 - \\ & - 54(1 - e^{-5p})v_1^2, \end{aligned} \tag{5.65}$$

$$U_2 = 54 \left((4 - 0.5e^{-p})v_1^2 + 4v_2^2 + v_3^2 \right). \tag{5.66}$$

На рисунках 5.13 – 5.15 показано поведение замкнутой системы при изменении задания от $u_{\text{зад1}}=0$, $u_{\text{зад2}}=0$ до $u_{\text{зад1}}=1$, $u_{\text{зад2}}=1$ при поочередном и одновременном изменении уставок.

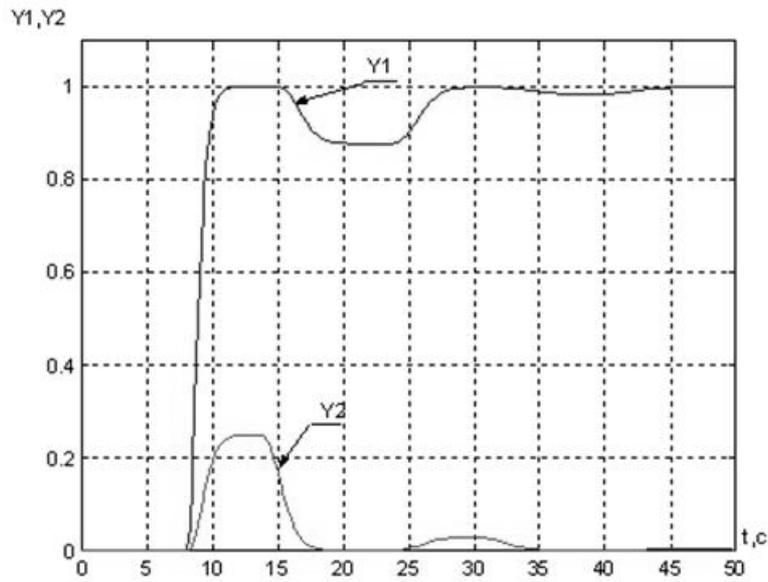


Рисунок 5.13 – Графики переходных процессов в системе управления при ступенчатом изменении задающего воздействия $y_{зад1}=1, y_{зад2}=0$

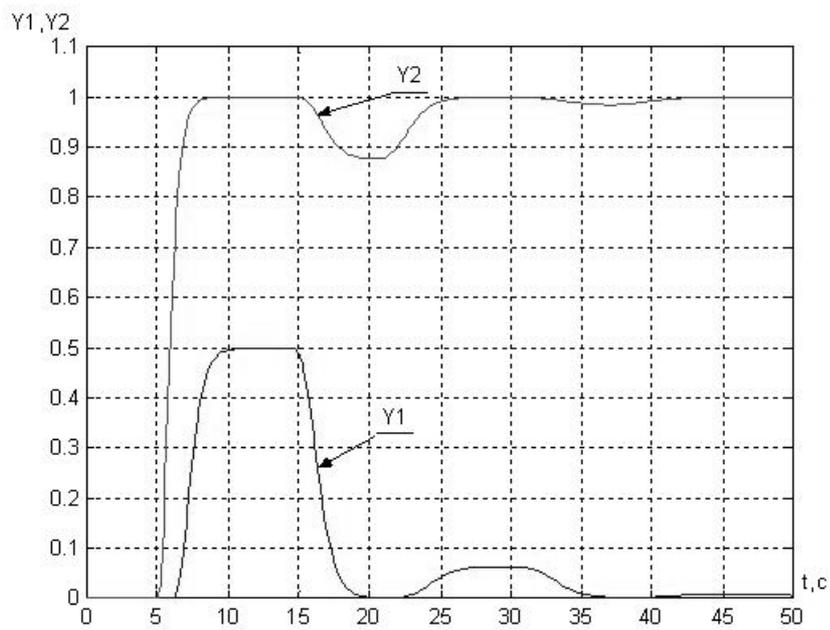


Рисунок 5.14 – Графики переходных процессов в системе управления при ступенчатом изменении задающего воздействия $y_{зад1}=0, y_{зад2}=1$

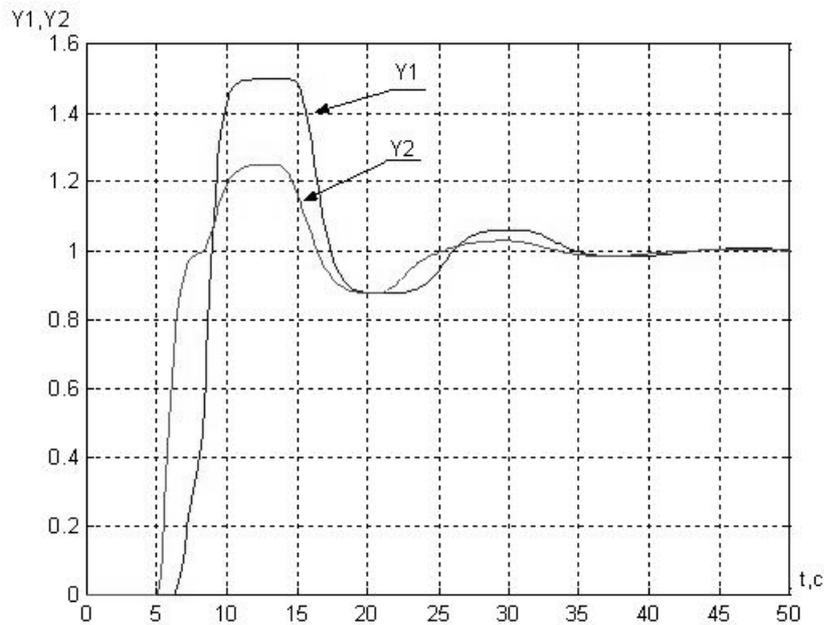


Рисунок 5.15 – Графики переходных процессов в системе управления при ступенчатом изменении задающего воздействия $y_{зад1}=1$, $y_{зад2}=1$

Анализ графиков, приведенных на рисунках 5.13 – 5.15 выявил, что система обрабатывает задающее воздействие за заданное время. Однако, начиная со времени равного $3\tau_{ii}$, возникают колебания, обусловленные многосвязностью объекта, в частности контуром рециркуляции¹. Имеет место не полная компенсация взаимосвязей. Кроме этого, заметно влияние изменения уставки по какому-либо одному из выходов объекта на динамику остальных выходов (см. рис. 5.15).

Для преодоления указанных недостатков действующей системы предлагается альтернативная стратегия управления, которая заключается в полной компенсации взаимодействий или развязывании каналов в динамике. Т.е. соответствующая система может быть реализована на тех же одномерных регуляторах, но сигналы этих регуляторов должны подвергаться развязыванию, обеспечивающему автономность регулирования по отношению к изменениям заданий.

Для обеспечения автономности системы необходимо, чтобы обеспечивалась диагональность произведения полиномиальных матриц $R_1 \cdot G$. Поскольку матрица R_1 диагональная, остается матрица G , которая также должна быть диагональной, что не всегда выполнимо. Поэтому введем

¹ Возвращение части готового продукта на вход объекта

дополнительное корректирующее устройство, которое обеспечивало бы диагональность произведения полиномиальных матриц $R_1 \cdot G_k \cdot G$. Поскольку нас интересует полная компенсация, то компенсатор будет иметь вид

$$G_k = \sum_i P_i e^{-\pi_i p} \cdot (\Delta)^{-1} \cdot \sum_j M_j e^{-\mu_j p}, \quad (5.67)$$

при этом замкнутая система будет уже определяться уравнением

$$\begin{aligned} & \left\{ \left[p^n + l_1 e^{-p\theta_1} p^{n-1} + \dots + l_j e^{-p\theta_j} p^{n-j} + \dots + l_n e^{-p\theta_n} \right] \times \right. \\ & \times \left[p^r + \alpha_r p^{r-1} + \dots + \alpha_1 \right] \cdot R_2(p, \tau, \theta) + H \cdot G \cdot G_k \cdot R_1(p, \tau, \theta) \left. \right\} y = \quad (5.68) \\ & = \left[p^r + \alpha_r p^{r-1} + \dots + \alpha_1 \right] \cdot G \cdot G_k \cdot R_1(p, \tau, \theta) y_{\text{зад}}. \end{aligned}$$

Уравнения регулятора в этом случае (5.51) будут определяться

$$\begin{aligned} R_1(p, \tau, \theta) &= \left[p^m + G_{k1} p^{m-1} + \dots + G_{ki} p^{m-i} + \dots + G_{km} \right] \times \\ & \times \left[E p^r + \alpha_r E p^{r-1} + \dots + \alpha_1 E \right] \cdot \left[\Gamma_1 p^{\lambda-1} + \dots + \Gamma_{v-1} p + \Gamma_v \right]; \\ R_2(p, \tau, \theta) &= \left\{ \left[E p^v + \gamma_1 E p^{v-1} + \dots + \gamma_k E p^{v-k} + \dots + \gamma_v E \right] \times \quad (5.69) \right. \\ & \times \left[E p^r + \alpha_r E p^{r-1} + \dots + \alpha_1 E \right] - \left[\Gamma_1 p^{\lambda-1} + \dots + \Gamma_{v-1} p + \Gamma_v \right] \times \\ & \left. \times \left[H_1 p^{q-1} + \dots + H_q p^s + H_q X_1 p^{s-1} + \dots + H_q X_s \right] \right\}. \end{aligned}$$

При этом условия физической реализуемости регулятора (5.48) на основании анализа (5.69) примут вид

$$v \geq m + \lambda - 1 \quad (5.70)$$

и

$$\begin{aligned} & \left[p^m + G_{k1} p^{m-1} + \dots + G_{ki} p^{m-i} + \dots + G_{km} \right] \times \\ & \times \left[E p^r + \alpha_r E p^{r-1} + \dots + \alpha_1 E \right] \geq \left[\Gamma_1 p^{\lambda-1} + \dots + \Gamma_{v-1} p + \Gamma_v \right] \times \quad (5.71) \\ & \times \left[H_1 p^{q-1} + \dots + H_q p^s + H_q X_1 p^{s-1} + \dots + H_q X_s \right]. \end{aligned}$$

Регулятор (5.48) можно реализовать также на базе интегрирующих фильтров, только коэффициенты оптимального управления уже определяются на основании (5.69)

$$\begin{aligned} \dot{v}_i &= v_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, v + r - 1; \\ \dot{v}_{v+r} &= U^*, \end{aligned} \quad (5.72)$$

где

$$U^* = (y_{\text{зад}} - z) - (Q_{v+r} - K_{v+r})v_1 - \dots - (Q_{v+r-2} - K_{v+r-2})v_{\lambda+q-1} - \dots - Q_1 v_{v+r}$$

А управление U в этом случае будет реализовывать введенное нами компенсационное устройство, реализовать которое можно будет при использовании фазовых координат фильтра (5.72). Компенсационное управление при этом будет определяться выражением

$$U = (W_{m+r+\lambda-1} + G_{k_{m+r+\lambda-1}})v_1 + (W_{m+r+\lambda-2} + G_{k_{m+r+\lambda-2}})v_2 + \dots + (W_1 + G_{k_1})v_{m+r+\lambda-1} + M_0 v_{m+r+\lambda}. \quad (5.73)$$

Для проверки эффективности предложенной стратегии управления рассмотрим тот же пример.

Для начала определим матричный полином компенсационного устройства, используя формулу (5.67). В результате имеем

$$G_k = \frac{1}{(p^2 + 4p + 4 - 0.5e^{-p})} \begin{bmatrix} (p+2)e^{-5p} & e^{-3p} \\ -0.5e^{-6p} & (p+2)e^{-3p} \end{bmatrix} = \frac{1}{(p^2 + 4p + 4 - 0.5e^{-p})} \left(\begin{bmatrix} e^{-5p} & 0 \\ 0 & e^{-3p} \end{bmatrix} p + \begin{bmatrix} 2e^{-5p} & e^{-3p} \\ -0.5e^{-6p} & 2e^{-3p} \end{bmatrix} \right). \quad (5.74)$$

Переопределим параметры замкнутой системы с желаемыми характеристиками

$$[p^2 + \gamma_1 p + \gamma_2]y = \begin{bmatrix} \gamma_2 e^{-\tau_{11}p} & 0 \\ 0 & \gamma_2 e^{-\tau_{22}p} \end{bmatrix} y_{\text{зад}}, \quad (5.75)$$

при этом $\gamma_1=4$, $\gamma_2=4$ – коэффициенты, гарантирующие апериодический переходный процесс по заданию длительностью $3s$ по каждому каналу без учета времени запаздывания по этим каналам.

Подставляя (5.58), (5.59), (5.74) и (5.75) в выражение (5.69) определения матричных полиномов регулятора (5.48), получим

$$R_1 = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} p + \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -0.5e^{-p} & 2 \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{pmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 8 \end{pmatrix}, \quad (5.76)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} p^2 + \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 4 \end{bmatrix} p + \begin{bmatrix} 4(1 - e^{-8p}) & 0 \\ 0 & 4(1 - e^{-7p}) \end{bmatrix}. \quad (5.77)$$

Так, для первого управления согласно (5.76) и (5.77) получим регулятор, который описывается уравнением

$$(p^2 + 4p + 4(1 - e^{-8p}))(y_{\text{зад1}} - z_1) = 10(p + 2)u_1.$$

Его можно реализовать на базе интегрирующего фильтра вида

$$\begin{aligned} \dot{v}_1^1 &= v_2^1; \\ \dot{v}_2^1 &= U_1^*; \\ U_1^* &= (y_{\text{зад1}} - z_1) - 4v_2^1 - 4(1 - e^{-8p})v_1^1, \end{aligned} \quad (5.78)$$

фазовые координаты фильтра (5.63) позволяют сформировать компенсационное управление

$$u_1 = 10(2v_1^1 + v_2^1) - 10v_1^2. \quad (5.79)$$

Аналогично проведем процедуру определения общего управления второго регулятора

$$(p^2 + 4p + 4(1 - e^{-7p}))(y_{\text{зад2}} - z_2) = 8(p + 2)e^{-2p}u_2$$

и получим

$$U_2^* = (y_{\text{зад2}} - z_2) - 4v_2^2 - 4(1 - e^{-7p})v_1^2, \quad (5.80)$$

$$u_2 = 8(2v_1^2 + v_2^2)e^{-2p} - 16e^{-3p}v_1^1. \quad (5.81)$$

Качество регулирования системы управления в случае автономности иллюстрирует рис. 5.16, где показано поведение замкнутой системы при изменении задания от $y_{\text{зад1}}=0$, $y_{\text{зад2}}=0$ до $y_{\text{зад1}}=1$, $y_{\text{зад2}}=1$ при одновременном изменении уставок.

Как видно из представленных графиков, качество замкнутой системы отвечает заданному, а это в свою очередь подтверждает, что предложенная стратегия обеспечения автономного управления повышает качество регулирования по сравнению с первоначальной.

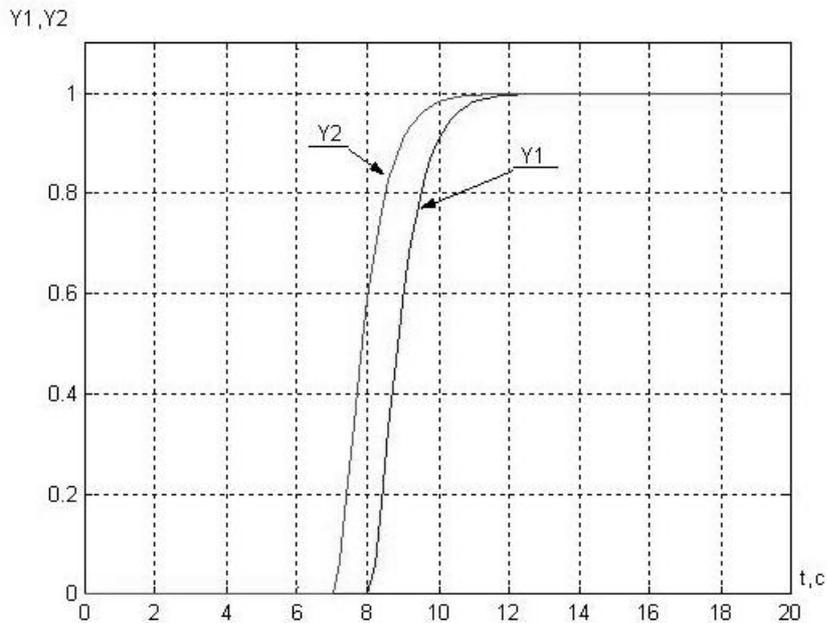


Рисунок 5.16 – Графики переходных процессов в системе управления с полной компенсацией взаимосвязей при ступенчатом изменении задающего воздействия $y_{зад1}=1, y_{зад2}=1$

Замечания: 1) при рассмотрении оптимальной задачи многомерным объектом с запаздываниями общего вида предлагается искать решение в виде (5.46), содержащим звенья суммарного запаздывания по каналам (см. (5.47)), это диктовалось исходя из физических соображений, так как при управлении объектом имеется запаздывания, то наилучшее, чего можно добиться, – это заставить выходной сигнал воспроизвести входной с тем же запаздыванием; 2) для сложных многомерных объектов бывает затруднительно установить желаемый вид матричного полиномиального уравнения (5.46), желательно всегда выбирать его так, чтобы полиномиальная матрица Γ была диагональной, обеспечивая тем самым автономность каналов управления; 3) для неустойчивых (неминимальнофазовых) объектов схема решения оптимальной задачи имеет тот же характер, однако для получения требуемого управления при действии внешних возмущающих воздействий следует ввести контур обратной связи с целью обеспечения устойчивости объекта, а при нахождении оптимального регулятора следует учесть наличие этой связи; 4) если высокая точность замкнутой системы не требуется, можно формировать статические системы, для этого необходимо в (5.47) из γ_v

вычесть ε , где ε – допустимая установившаяся ошибка управления выходной переменной.

Таким образом, рассмотренный метод синтеза позволяет компенсировать влияния запаздываний на устойчивость системы, обеспечивает требуемые показатели качества регулирования по каждому выходу объекта управления.

Кроме того, рассмотренный метод синтеза многомерных систем управления с запаздываниями общего типа обладает: 1) упрощенной процедурой расчета структуры и параметров многомерного регулятора по сравнению с другими известными методами; 2) возможностью синтеза регулятора даже в случае не совпадения вектора состояния объекта с вектором выходных координат; 3) однотипностью в смысле реализуемости на базе интегрирующих фильтров; 4) универсальностью, так как его можно применять при построении многомерных систем управления линейными объектами, как с запаздываниями так и без запаздываний; 5) возможностью учитывать несколько различных запаздываний по каналам.

5.4. Вопросы для самопроверки

- 1 Как определить порядок аппроксимации звена запаздывания быстросходящимися рядами?
- 2 Определите передаточную функцию замкнутой системы с упредителем Смита относительно задающего воздействия, покажите, как происходит компенсация запаздывания.
- 3 Дайте определение запаздывания. В каких случаях необходимо применять компенсацию запаздывания?
- 4 Определите передаточную функцию замкнутой системы с упредителем Смита относительно возмущающего воздействия, покажите, как в этом случае происходит компенсация запаздывания.
- 5 Объясните, в чем трудность реализации «классического» регулятора Ресвика?
- 6 При каких условиях системы с упредителем Смита и регулятором Ресвика идентичны? В чем отличие синтезированного регулятора Ресвика по предложенному методу от «классического»?

ЛИТЕРАТУРА

1. Локотков А. Устройства связи с объектом. Модули фирмы Advanech// СТА, – 1997. –№2. С.32-44.
2. Устройства удаленного и распределенного сбора данных и управления. Серия ADAM 4000. Каталог. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ipc2u.ru/catalog>.
3. Александров А.Г. Синтез регуляторов многомерных систем/ А.Г. Александров – М.: Машиностроение, 1986. – 272с.
4. Соболев О.С. Однотипные связанные системы регулирования/ О.С. Соболев. – М.: Энергия, 1973. – 136с.
5. Рей У. Методы управления технологическими процессами/ У. Рей. – М.: Мир, 1983. – 368с.
6. Маковский В.А. Динамика металлургических объектов с распределенными параметрами/ В.А. Маковский. – М.: Металлургия, 1971. – 384с.
7. Плетнев Г.П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций/ Г.П. Плетнев. – М.: Энергоиздат, 1981. – 368с.
8. Синеглазов В.М. Анализ и синтез линейных систем со многими запаздываниями: Монография/ В.М. Синеглазов, Р.Ю. Ткачев. – Алчевск: ДонГТУ, 2012. – 339с.

Учебное пособие разработано в соответствии с типовой программой дисциплины «Автоматизированное управления технологическими процессами».

Специалист по АСУ ТП должен владеть, теорией автоматического управления, разбираться в основах технологии, достаточно свободно ориентироваться в работе цифровых вычислительных машин, их математическом и алгоритмическом обеспечении, уметь правильно применять технические средства информационной и управляющей техники. Подготовка такого специалиста базируется на целом ряде дисциплин, таких как «Типовые технологические объекты и процессы», «Компьютерная техника», «Математическое моделирование», «Теория автоматического управления», «Технические средства автоматизации», «Проектирование систем автоматизации» и др.

Дисциплина «АСУ ТП» является одной из основных дисциплин завершающих обучение студентов по специальности 6.0502 – автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии, и поэтому учебное пособие по этой дисциплине, помимо специфических сведений, содержит обзорные материалы из некоторых предшествующих и параллельных курсов.