



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Пензенский государственный технологический университет»
(ПензГТУ)

М.И. Вольников

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ**

Учебное пособие

Пенза
2018

Рецензент –
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Физика и математика ФГБОУ ВО «Пензенский ГАУ»
А.Д.Согуренко

Автоматизация технологических процессов и производств: Учебное пособие. – Пенза: ПензГТУ, 2018. – 95 с.

Учебное пособие содержит необходимый теоретический минимум по основным разделам дисциплины.

Издание подготовлено на кафедре «Автоматизация и управление» ПензГТУ. Рекомендуется для студентов специальности 150304, направления «Автоматизация технологических процессов и производств».

Допущены методическим советом ПензГТУ для использования в учебном процессе.

Составитель: к.т.н, доцент кафедры «АиУ» ПензГТУ
Вольников М.И.

СОДЕРЖАНИЕ

Тема 1. Проблемы автоматизации технологических процессов в энергетике	4
Тема 2. Общие сведения об АСУ	9
Тема 3. Производственное предприятие и производственный процесс. Организация управления.	14
Тема 4. Автоматизированные системы управления технологическими процессами	18
Тема 5. Этапы разработки и внедрения АСУТП	25
Тема 6. Математические модели технологических объектов, используемые в задачах управления. Модели статики	27
Тема 7. Математические модели технологических объектов, используемые в задачах управления. Модели динамики	36
Тема 8. Анализ технологического процесса как объекта управления	43
Тема 9. Системные методы улучшения качества регулирования ТОУ	47
Тема 10. Взаимосвязанные системы регулирования	58
Тема 11. Регулирование основных технологических параметров	64
Тема 12. Автоматизация гидромеханических процессов	76
Тема 13. Автоматизация тепловых процессов	80
Список используемой литературы	95

ВВЕДЕНИЕ

Целью дисциплины "Автоматизация технологических процессов и производств", завершающей профессиональное обучение будущего специалиста, является подготовка студента к самостоятельному решению теоретических и прикладных задач автоматизации технологических процессов в энергетике. Излагаются принципы и методы построения систем регулирования и автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) на основе современных технических средств автоматизации, включая микропроцессорную технику и управляющие ЭВМ.

Тема 1. Проблемы автоматизации технологических процессов в энергетике

Основные понятия.

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.

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.

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.

Процесс управления складывается из следующих операций: 1) получение и обработка информации о фактическом состоянии управляемого технологического процесса (информационный аспект); 2) анализ полученной

информации (алгоритмический аспект); 3) осуществление принятого решения, т.е. непосредственное воздействие на процесс (энергетический аспект).

Задачи автоматизации

Автоматизация остается одной из главных проблем промышленного производства и социальной сферы в различные периоды экономического развития современного общества. Со временем автоматизация становится все более широким понятием, включая в себя некоторые новые частные проблемы своего научного и технического развития: компьютеризацию, роботизацию и другие специальные или отраслевые представления. Однако смысл и ее основное назначение остаются неизменными - облегчение или вытеснение рутинного труда человека.

Трудоемкие процессы, связанные с производством и распределением тепловой и электрической энергии на современных ТЭС, в основном механизированы. Труд человека состоит в том, чтобы управлять машинами, механизмами и установками (перемещать регулирующие органы, включать или отключать оборудование и т.п.) и наблюдать за их работой непосредственно или по измерительным приборам.

Однако механизация (даже полная) круглосуточно работающего энергетического оборудования не избавляет человека от утомительного и однообразного труда по управлению основными и вспомогательными установками ТЭС, а что самое главное, не гарантирует их надежной и экономичной работы даже при высокой квалификации эксплуатационного персонала. Это обусловило большое развитие автоматизации в современной энергетике.

Автоматизацией механизированного производства называют управление машинами, механизмами и установками, а также контроль за их работой с помощью специальных устройств (измерительных приборов, автоматических регуляторов и вычислительных машин) при ограниченном участии человека или без него.

Теплоэнергетика, отличающаяся широкой механизацией технологических процессов, высокими параметрами рабочей среды, требованиями к точности их регулирования, а также наличием собственного источника энергии, является той областью науки и техники, где постоянно находят приложение методы теории и новые технические средства автоматического управления.

Основные этапы развития автоматизации

Первым экономическим государственным планом новой России стал план электрификации страны — ГОЭЛРО (1920 г.). К концу первой пятилетки (1931 г.) он был выполнен: введены в действие 27 крупнейших по тому времени электростанций общей мощностью $1,75 \cdot 10^6$ кВт, на их основе в промышленных

районах страны созданы центры по управлению выработкой и распределением электроэнергии.

Быстрый рост теплоэнергетики обусловил дальнейшее развитие ее автоматизации. В **20-30-е** годы в ЦКТИ, ВТИ, ВЭИ, институте "Теплоэлектропроект", ОРГРЭС и на передовых электростанциях выполнялись работы, связанные с проектированием, внедрением и исследованием автоматических устройств и систем автоматического регулирования основного и вспомогательного теплового оборудования.

В Журналах "Электрические станции", "Точная индустрия", "Советское котло-турбостроение", "Известия Всесоюзного Теплотехнического института (ВТИ)" и в ряде др. публиковались работы научного и практического характера по автоматическому регулированию, включающие новые вопросы автоматизации температуры перегрева пара и экономичности процесса горения в топке котлов и связанного регулирования паровых турбин.

В **30-40-е** годы автоматизация теплового оборудования на ТЭС, в особенности котлов, проводилась в основном на базе автоматических регуляторов электромеханической системы. Эти устройства отличались единством конструкции измерительного, командно-усилительного и исполнительного органов. Жесткая структура такого регулятора, а также наличие большого количества подвижных электрических контактов в цепях управления исполнительными механизмами препятствовали созданию многосвязных и надежных автоматических систем регулирования (АСР) и решению сложных задач управления на ТЭС.

В **50-е** годы в энергетике благодаря развитию приборостроения и отраслей промышленности, выпускающей электронную технику и малогабаритную электроаппаратуру, стали широко применяться автоматические регуляторы тепловых процессов нового типа, состоящие из отдельного первичного прибора с электрическим сигналом на выходе, электронного регулирующего прибора и обособленного исполнительного механизма с независимым дистанционным управлением. Это позволило разместить составные части регулятора отдельно в соответствии с их функциональным назначением: первичный прибор и исполнительный механизм на объекте, а регулирующий прибор и органы управления на оперативном щите.

Применительно к регуляторам тепловых процессов разрабатывались новые методы расчета настроек, нашедшие затем широкое приложение при внедрении автоматических систем общепромышленного назначения.

Завершившийся в 50-е годы переход на электрические системы контроля и управления теплоэнергетического оборудования был вызван необходимостью дальнейшего вытеснения ручного труда на ТЭС, сокращения численности вахтенного персонала, централизации управления крупными электростанциями и территориальной развязки в размещении энергетического оборудования и диспетчерских постов управления.

К тому времени автоматизация ТЭС осуществлялась на основе комплекса технических средств, позволявших выполнять дистанционное управление регулирующими и запорными органами, автоматическое регулирование,

контроль и сигнализацию технологических параметров, а также автоматическую защиту теплового оборудования.

В 60-е годы происходит новый качественный сдвиг в отечественной энергетике. Ее развитие преимущественно идет по пути сооружения энергоблоков, работающих на высоких и сверхкритических параметрах пара с единичной мощностью турбогенераторов 200 и 300 МВт, а в последние годы теплофикационных — мощностью 250 МВт и конденсационных — мощностью 500 и 800 МВт. Для работы таких блоков в условиях нормальной эксплуатации необходимо постоянно или периодически контролировать до 600—3000 технологических параметров.

Попытки решить новые задачи по управлению с помощью существовавшего к тому времени комплекса традиционных и всеобъемлющих, но разрозненных технических средств оказались бесперспективными. В то же время происходит бурное развитие производства электронно-вычислительных машин (ЭВМ). Особенно перспективными оказались ЭВМ, приспособленные для сбора и переработки информации о работе промышленных объектов. С помощью таких ЭВМ возможно решение задач по управлению и выдаче результатов в виде советов оператору или сигналов-команд исполнительным устройствам, расположенным на объекте.

Таким образом, часть функций по управлению и контролю сложными технологическими процессами, довольно значительная по объему, стала передаваться ЭВМ, в том числе: множественный контроль и сигнализация, расчет численных значений технико-экономических показателей (ТЭП) отдельных агрегатов и ТЭС в целом, оптимизация некоторых режимов работы оборудования и др.

Наряду с ЭВМ продолжают широко использоваться системы индивидуального контроля важнейших параметров, АСР отдельных участков технологического процесса ТЭС, автономные системы дистанционного управления и автоматической тепловой защиты энергетического оборудования. В результате на тепловых электростанциях сложились автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП ТЭС).

Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) – человеко-машинные системы управления, обеспечивающие сбор и обработку информации, необходимой для оптимизации управления технологическим объектом в соответствии с критерием качества функционирования, и реализацию управляющих воздействий на технологический объект.

Интенсификация технологических процессов, проведение их в режимах близких к критическим, применение агрегатов большой единичной мощности невозможны без подготовки технологических процессов и производств к автоматизации. Как правило, это выполняется решением проблем модернизации и механизации оборудования, диспетчеризации.

Оперативно-диспетчерское управление энергооборудованием и контроль наиболее ответственных параметров в АСУ ТП остаются за оперативным

персоналом, творчески применяющим новые методы управления и эффективно использующим технические средства автоматизации.

Принцип построения систем управления

Для сложных систем управления при проектировании и реализации целей управления используют системный подход, основанный на следующих положениях:

1). Разработка сложных систем управления проводится путем декомпозиции задачи управления на подзадачи, решаемые соответствующими подсистемами (подсистемы управления в штатном режиме, подсистемы ПАЗ, подсистемы пуска и останова и т.д.).

2). Каждая из этих подзадач (и соответствующих подсистем) в свою очередь может оказаться сложной. Тогда декомпозиция проводится на еще более низком уровне до тех пор, пока задача управления и соответствующая подсистема не станут простой.

3). Для обеспечения целостности системы после разработки простых подсистем проводится композиция (интеграция) подсистем в единую систему снизу вверх, с последовательной проверкой свойств интегрированных подсистем и системы в целом на соответствие заданным свойствам. При необходимости на каждом шаге интеграции осуществляется моделирование, коррекция, настройка подсистем, и т.д.

Проблемам автоматизации электроэнергетики, созданию АСУ энергетических систем и АСУ ТП ТЭС уделяется должное внимание в решениях и мероприятиях министерств и ведомств, отвечающих за их внедрение.

Широкое использование научных и технических достижений в целях автоматизации технологических процессов ТЭС позволит повысить техническую и экономическую эффективность теплоэнергетических установок и успешно решать современные задачи управления.

Тема 2. Общие сведения об АСУ

Виды АСУ

Управление современным предприятием или производственно-промышленным комплексом с непрерывными технологическими процессами выработки продукции предусматривает **три вида АСУ**, соподчиненных между собой:

1. АСУ ТП для решения задач управления в темпе с процессом.
2. АСУ производством для оперативно-диспетчерского управления несколькими взаимодействующими технологическими процессами, осуществляющая также расчет укрупненных значений ТЭП, определяющая сроки ремонтов оборудования и выполняющая другие функции производственно-технического характера.
3. АСУ предприятием (АСУП), решающая задачи управления в масштабе предприятия в целом (экономическое управление, управление распределением людских и материальных ресурсов и др.).

Автоматизированное управление производством и предприятием можно совмещать в одном центре управления производственно-промышленным комплексом, имеющим в своем составе ЭВМ, на которую возлагаются все перечисленные функции, включая координацию действий АСУ ТП, являющихся подсистемами АСУП (**интегрированные АСУ**).

Отличие АСУ ТП от АСУ производством или АСУ предприятием состоит в функциях управления, связанных с непрерывностью технологических процессов во времени и прекращением процесса выработки продукции при непоступлении сырья в промышленные установки. В связи с этим основная исходная информация в АСУ ТП поступает в виде непрерывных сигналов от первичных измерительных преобразователей (датчиков) физических величин, расположенных на объекте, в то время как в АСУП наряду с укрупненными и усредненными показателями технологического процесса основной исходной информацией служит документ. В результате управление технологическим процессом в АСУ ТП может осуществляться без участия человека с помощью локальных (местных) АСР или через специально выделенный контур управления с ЭВМ, в то время как в АСУ производством или предприятием в контур управления непременно включается лицо, принимающее решение (ЛПР).

Несмотря на некоторые различия в функциях управления, в роли и месте человека в системе, все АСУ (любого уровня и ранга) обладают одним общим свойством — они являются системами управления с *обратной* связью. Это означает, что часть информации с выхода объекта вновь поступает на его вход в виде регулирующих воздействий через автономные автоматические системы или ЭВМ. Другая же часть информации, отображаясь и перерабатываясь в сознании человека, также поступает на вход системы, но в виде осмысленных действий ЛПР.

Разновидности АСУ ТП

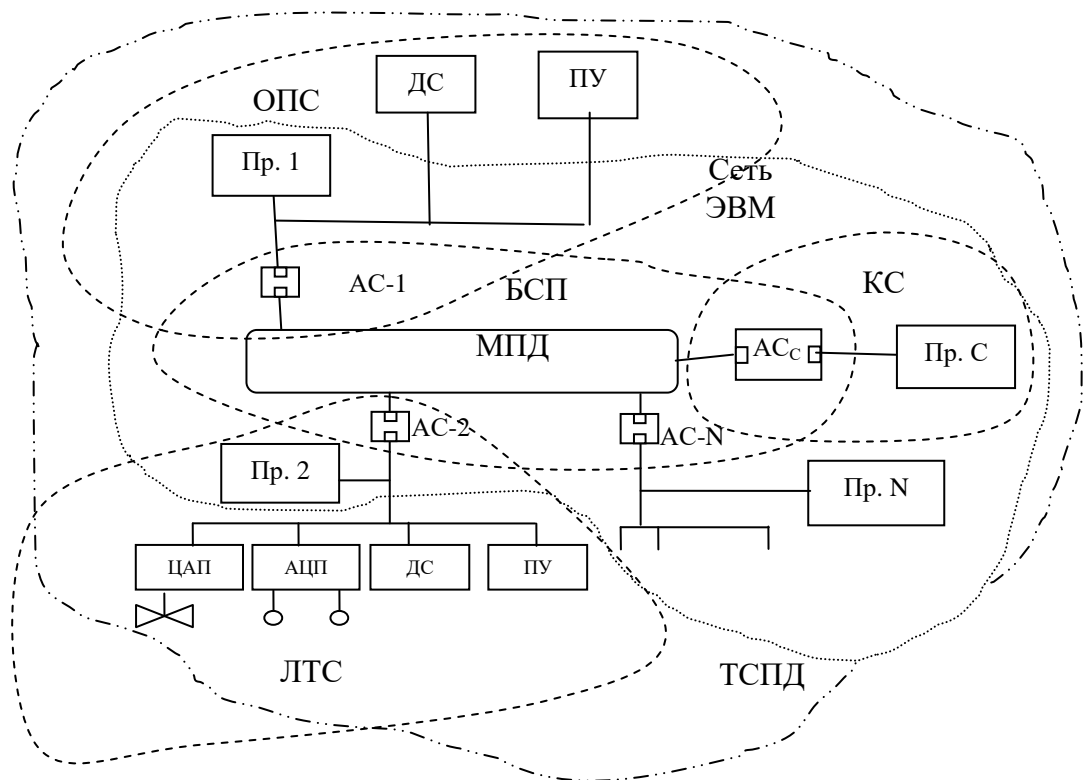
В зависимости от распределения функций контроля и управления между техническими средствами в настоящее время различают три разновидности АСУ ТП: централизованная, супервизорная и распределенная.

Централизованная АСУ ТП характеризуется тем, что все функции обработки и управления выполняет одна УВМ.

Структура **супервизорной** АСУ ТП состоит из ряда локальных АСР, построенных на базе технических средств индивидуального пользования, и централизованной УВМ, имеющей информационные линии связи с локальными системами управления между несколькими территориально рассредоточенными УСО и вычислительными устройствами, соединенными сетями для передачи информации и программ.

Современные АСУ ТП имеют, как правило, **децентрализованную (распределенную) структуру**. В распределенных системах управления используется принцип параллельной обработки информации.

В распределенных системах управления, кроме технических средств, характерных для централизованных АСУ ТП, используется ряд принципиально новых устройств систем автоматизации. К ним относятся: магистраль передачи данных, операторская станция, локальная технологическая станция, координирующая технологическая станция. Рассмотрим структуру КТС распределенной системы управления:



МПД – магистраль передачи данных;
АС – адаптер связи (сетевая плата);
Пр. – процессорные устройства;
ДС – дисплейная станция;
ПУ – периферийное устройство;
БУ – блок управления (функциональная клавиатура).

РСУ представляют собой некоторое упорядоченное соединение узлов, обменивающихся друг с другом данными об измерениях и управлении с одной стороны, и осуществляющих коммуникацию человека и машины с другой. *Узел – коммуникационный элемент, связанный с передающей средой.* Каждый узел обладает логическим интеллектом – микропроцессором. Узел имеет интерфейс с передающей средой и поддерживает общий протокол коммуникации. Максимальное число узлов зависит от передающей среды и количества сегментов. Количество абонентов одного сегмента сети зависит от передающей среды и используемого протокола передачи данных.

Для построения РСУ выпускаются комплексы аппаратурных средств, оснащенные широким набором программ (программно – аппаратурные комплексы для построения распределенных АСУ ТП).

Основной единицей аппаратуры современного комплекса является *станция* – оформленный в единой конструкции набор устройств, присоединяемый к сети АСУ ТП, как правило, с одним *сетевым адресом*. Станции предназначены для выполнения операций, реализующие прикладные функции определенного класса.

Локальная технологическая станция (ЛТС) это техническое средство нижнего уровня управления технологическим процессом и служит для автономного управления некоторым его участком. Вместе с тем подключение станции к общей сети передачи данных РСУ позволяет передавать данные на центральный пункт управления, групповые операторские и координирующие станции. ЛТС это программируемый контроллер, снабженный средствами для работы в составе сети. Первоначально ЛТС ориентировались лишь на определенную область применения, так что в составе комплекса могли присутствовать станции для регулирования непрерывных технологических процессов, для логического управления дискретными ТП, а также станции управления периодическими процессами. Алгоритмическое обеспечение ЛТС позволяет реализовать ПИД-регулирование, каскадные системы, комбинированные системы, ПЛУ (программно-логическое управление).

Благодаря распределенной обработке информации в сети с помощью ЛТС, в оценке работоспособности систем управления применяется понятие *живучесть*. *Как отмечалось выше «живучесть» более широкое чем «надежность» понятие, определяющее способность сохранения работоспособности системы не только в нормальных условиях эксплуатации, но и при аварийных ситуациях. При этом допускается некоторое ухудшение качества управления.*

Операторная станция (ОПС) выполняет функции, относящиеся к более высоким уровням иерархии управления производством: обеспечивая

непосредственное управление производственным процессом. Назначение ОПС – связать оператора с объектом и со средствами АСУ ТП, поэтому ОПС оснащаются развитыми средствами вывода информации, которые одновременно позволяют воспринимать управляющее воздействие, исходящее от оператора. Главное средство представления информации оператору это экран дисплея. Информация на экране дисплея представлена в форме видеограмм, отображающих состояние ТП. Принято видеограммы подразделять на стандартные и нестандартные. Нестандартные строятся непосредственно пользователем и индивидуально для конкретного объекта (основой могут быть мнемосхемы). Стандартные видеограммы могут представлять данные в виде таблиц. Обычно видеограммы входят в иерархическую систему (от обзорных до конкретных, детальных).

Координирующие станции (КС): Если сеть ЭВМ нуждается в центральной управляющей ЭВМ, то в ее состав включают КС. Это может быть отдельная конструктивная единица. Эти станции не имеют непосредственной связи с датчиками и исполнительными механизмами, установленными на технологическом объекте, а выходят на объект только через сеть и локальные технологические станции.

Магистраль передачи данных вместе с адаптерами связи образуют БСПД (базовую сеть передачи данных). Процессоры образуют сеть ЭВМ. Периферия системы – ТСПД (терминальная сеть передачи данных). В отличие от централизованной АСУ ТП, принципиально новым является наличие сети ЭВМ.

В комплексах для распределенных АСУ ТП обычно применяют магистраль с последовательной передачей данных. Среда распространения сигнала (физическая линия) витая пара (основной носитель), коаксиальный кабель, оптический кабель.

Виды обеспечения АСУ

В связи с развитием КТСА за последние годы возможности АСУ ТП как инструмента управления и исследования необычайно возросли. Однако оснащение АСУ ТП комплексом технических средств служит необходимым, но недостаточным условием его функционирования. При внедрении АСУ ТП в эксплуатацию предусмотрено:

информационное обеспечение, образуемое совокупностью системы классификации и кодирования технологической и технико-экономической информации, сигналов, характеризующих состояние ТЭС и отдельных энергоблоков, массивов данных и документов, необходимых для выполнения всех функций АСУ ТП ТЭС;

организационное обеспечение, реализуемое наличием совокупности описаний функциональной, технической и организационной (см. рис. 1.4) структур, инструкций и регламентов для оперативного персонала, обеспечивающих заданное функционирование автоматизированного технологического комплекса [13];

математическое обеспечение, образуемое наличием совокупности математических методов, моделей и алгоритмов для решения задач управления и обработки информации с применением вычислительной техники;

программное обеспечение, образуемое наличием совокупности программ по реализации всех функций АСУ ТП и предполагаемому развитию системы в направлении расширения состава функций;

пакет прикладных программ, являющихся частью программного обеспечения и представляющих собой совокупность программ, реализующих группу однородных функций и программу их настройки для конкретных объектов ТЭС (котлов, турбин или блоков в целом).

Именно наличие этих компонентов делает автоматизированную систему в целом дееспособной, в особенности на таких сложных объектах как тепловая блочная электростанция.

Основные вопросы хозяйственной и финансовой деятельности электростанции в настоящее время решают на уровне энергетической системы (совокупность производителей и потребителей энергии) . Поэтому на ТЭС ставят задачу создания системы управления типа АСУ производством или АСУ предприятием (АСУП) с ограниченными функциями. В этой связи отдельные задачи производственно-технического характера и отчетности перед энергетической системой при соответствующих математическом и программном обеспечении часто решают в информационно-вычислительном центре ТЭС.

Тема 3. Производственное предприятие и производственный процесс. Организация управления.

Основные характеристики производственного предприятия и производственного процесса.

На производственном предприятии осуществляется сложный процесс превращения материалов, сырья, полуфабрикатов в готовую продукцию. Осуществление этого процесса требует выполнения ряда разнообразных функций, совокупность которых принято называть *производственно - хозяйственной деятельностью предприятия*.

Центральным звеном предприятия является *основное производство*, где осуществляется производственный процесс, представляющий многоэтапное и многоэлементное превращение материалов, сырья и полуфабрикатов в готовую (конечную) продукцию. Простейшим элементом производственного процесса можно считать технологическую операцию.

Технологическая операция – это любое механическое или физическое воздействие на материалы или преобразование одних материалов в другие.

Технологический процесс – это связанная совокупность технологических операций, осуществляемых на определенном технологическом оборудовании. Результатом технологического процесса является полуфабрикат или готовое изделие.

Производственный процесс – связанная материальными потоками совокупность технологических процессов, осуществляемых для производства конечного продукта.

Различают три типа технологических процессов (производств): непрерывные, дискретные и дискретно-непрерывные.

К *непрерывным* относятся химические, нефтеперерабатывающие процессы, процессы производства энергии, проката стального листа и др.

Дискретные процессы характеризуются тем, что обрабатываемые продукты подаются на вход и выдаются на выходе отдельными порциями.

Дискретно-непрерывный процесс сочетает свойства двух описанных выше типов процессов – дискретного и непрерывного.

Структурно производственный процесс описывают через отношения между составляющими его технологическими элементами. Отношения между элементами описывают *технологической схемой, представляющей собой логически упорядоченный набор технологических элементов.*

Производственное предприятие как система управления

Производственное предприятие как система управления состоит из управляющей и управляемой подсистем, связанных между собой каналами передачи информации и образующими вместе единое целое. Управляемую подсистему (объект управления) можно условно рассматривать как преобразователь ресурсов, на вход которого поступают сырье, материалы,

полуфабрикаты, рабочая сила и т.п., а выход представляет собой поток готовых изделий.

Попытки описать производственное предприятие единой моделью и построить единый алгоритм управления в основном оказываются не состоятельными. Модель и алгоритм либо не удастся составить, либо они оказываются настолько сложными, что их практическое использование невозможно. Это связано, прежде всего, с тем, что размерности векторов состояния и управления даже для небольшого предприятия измеряются тысячами либо десятками тысяч переменных.

Одним из методов преодоления сложности решения задач большой размерности является их декомпозиция. *Декомпозицией называют разбиение исходной задачи большой размерности на совокупность взаимосвязанных задач меньшей размерности, решение которых с заданной степенью точности соответствует решению исходной задачи. Совокупность подсистем управления и способ их взаимосвязи образуют структуру системы управления.*

Структуры сложных систем управления, как правило, строятся с использованием иерархического и функционального принципов выделения подсистем.

В системе управления предприятием можно выделить четыре уровня иерархии.

Первый (нижний) уровень иерархии состоит из множества систем управления отдельными технологическими операциями. Целью управления на этом уровне обычно является выбор и поддержание заданных режимов выполнения технологических операций.

Второй (следующий) уровень иерархии включает системы управления производственными участками, технологическими линиями, технологическими установками. Основная цель состоит в выборе и поддержании режима совместного функционирования взаимосвязанных технологических операций, образующие технологический процесс (координация).

Совокупность систем управления первого и второго уровней будем называть *системами управления технологическими процессами*.

Третий уровень иерархии составляют системы управления цехами, технологическими производствами. Цель управления заключается в организации *выпуска продукции конкретной номенклатуры* в заданные сроки с требуемым качеством и наименьшими затратами. Для реализации этой цели в процессе управления необходимо выполнять функции организационного и экономического характера.

Объектом управления на *четвертом уровне иерархии* является предприятие в целом. Цель управления заключается в организации *совместного функционирования подразделений для выпуска готовой продукции с заданными технико-экономическими показателями*. Совокупность систем управления третьего и четвертого уровней называют *системой управления предприятием*.

Кроме иерархической (вертикальной) декомпозиции системы производится ее разбиение на *функциональные подсистемы (горизонтальная декомпозиция)*. *Функциональной подсистемой* управления называют часть

системы, выделенную по общности объекта и функциональных признаков управления. Объектами управления в функциональных подсистемах являются производственные подсистемы.

В реальных системах количество уровней иерархии может быть различно. Но необходимо стремиться к их минимальному числу, чтобы не усложнять систему.

Задачи управления предприятием

Требование эффективности управления реализуется путем решения следующих задач.

Задачи нижнего уровня – контроль и обеспечение заданных значений технологических параметров, на основе которых проводится управление процессами. Задачи нижнего уровня реализуются на основе автоматических систем контроля (АСК) и автоматических систем регулирования (АСР), технически обеспечиваемых датчиками (первичными преобразователями), каналами связи, усилителями, задатчиками, регуляторами, исполнительными устройствами, функциональных блоками, средствами интерфейса АСР-человек.

Задачи второго уровня – вычисление (оценка) и поддержание заданных показателей качества продуктов производства, расчет и оптимизация отдельных технико-экономических показателей. Задачи данного типа относятся к числу «продвинутых». Основная проблема при построении подсистем второго уровня связана с трудностью получения оперативной информации о показателях качества (ПК) и технико-экономических показателях (ТЭП). Поточные анализаторы качества, как правило, для целей оперативного управления не годятся в силу того, что обладают неприемлемо большим запаздыванием (цикл измерения, обычно, десятки минут), большой погрешностью (несколько процентов), низкой надежностью и дороги в эксплуатации.

Как показывает анализ литературы, решение задач второго уровня возможно только на основе широкого использования различного рода моделей, из которых выделим модели технологических процессов для расчета ПК и ТЭП и модели принятия решений, т.е. собственно модели управления процессами.

Для третьего уровня характерны такие задачи как: расчет балансов по продуктам и энергии, расчет удельных энерго- и материалозатрат на единицу продукции, оценка себестоимости единицы продукции (полуфабрикатов), оптимизация межремонтных пробегов установки и т.д.

Таким образом, в штатном режиме решение задач управления осуществляется иерархической системой, в которой задачам АСУТП соответствуют два нижних уровня, а третий уровень – это задачи АСУП.

Структура управления ТЭС

Она представлена в виде многоуровневой системы, состоящей из ряда подсистем, расположенных одна над другой. В каждой из них осуществляют преобразование входных сигналов в выходные.

На *нижнем уровне* в энергоблоках протекает технологический процесс, характеризующийся преобразованием входных сигналов (расходов воды, топлива, воздуха и др.) в регулируемые величины котлов, турбин и электрогенераторов (давление и температуру перегретого пара, активную мощность, частоту вращения и др.).

Входными сигналами следующей ступени — системы управления ТЭС, служат:

- техничко-экономические показатели (ТЭП) отдельных энергоблоков;
- суточный график электрической нагрузки ТЭС;
- координирующие сигналы вышестоящего центра управления;
- сигналы о состоянии основного работающего и резервного оборудования и др.

Выходные сигналы на этом же уровне — генерируемая и передаваемая в ЭС активная мощность, значение частоты электрической сети на шинах ТЭС, значения ТЭП станции в целом, технологические параметры общестанционного оборудования и др.

Входной информацией на более высоком уровне — системе управления ЭС (предприятия), служат:

- суточный график электрической нагрузки;
- значения обменов активной мощностью с другими ЭС;
- ТЭП объектов управления нижнего уровня (ТЭС);
- сведения о наличии резервного оборудования и запасах топлива и др.
- Выходную информацию на этом же уровне составляют:
- суммарная активная мощность, генерируемая электростанциями в ЭС;
- значения напряжения в узлах электрической сети;
- сводные ТЭП, вычисленные на ИВЦ ЭС, и др.

Для выполнения своей главной функции — управления генерацией и обменами активной мощности в ОЭС — подсистемы верхнего уровня наделяют правом вмешательства в работу объектов и подсистем, расположенных ниже.

При организации управления по иерархическому принципу в проектируемой или существующей сложной системе вначале производят выделение уровней управления — *вертикальную декомпозицию* (о чем было сказано ранее).

Для объединения подсистем управления на одном и том же уровне служат следующие признаки:

- общность математического описания или абстракции (вид математической модели);
- общность функций цели, подцели или промежуточной цели (общность критериев управления);
- общность организационных функций.

Разбиение подсистемы на звенья в пределах одного и того же уровня означает *горизонтальную декомпозицию* (например, пароперегреватель котла, ЦВД турбины, промежуточный пароперегреватель и т.п.).

Тема 4. Автоматизированные системы управления технологическими процессами

Задачи АСУТП

Как было рассмотрено выше АСУ ТП – человеко-машинная система управления, обеспечивающая автоматизированный сбор и обработку информации, необходимой для оптимизации управления технологическим объектом в соответствии с принятым критерием. Критерием управления обычно является технико-экономический показатель (себестоимость выходного продукта при заданном его качестве) или технический показатель (параметр процесса).

Система управления ТОУ является АСУ ТП в том случае, если она осуществляет управление ТОУ в целом в темпе протекания технологического процесса и если в выработке и реализации решений по управлению участвуют средства вычислительной техники, другие технические средства и оператор.

При разработке АСУТП можно выделить следующие типичные задачи:

1) Задачи разработки и оптимизации работы локальных подсистем регулирования (АСР) – подсистем нижнего уровня:

- выбор структуры АСР (одноконтурные, каскадные, комбинированные, многосвязные, логико-динамические, с эталонной моделью, адаптивные, нечеткие, нейронные и т.д.),

- оптимизация структуры системы, структуры и параметров управляющих устройств.

2) Продвинутое задачи в штатном режиме:

- управление процессом по качеству продуктов переработки;
- минимизация материальных- и (или) энергозатрат;
- оперативное управление по ТЭП;

3) Продвинутое задачи по обеспечению безопасности

- диагностика отказов датчиков, ИУ;
- защита от последствий отказов (резервирование, замораживание выходов регуляторов, расчет параметров на основе моделей);

- принятие мер по снижению отрицательного эффекта от отказов;
- прогнозирование развития аварийных ситуаций и мягкое парирование неполадок элементов АТК.

4) Задачи по пуску установки.

В конечном счете, перечисленные подсистемы АСУТП в целом обеспечивают оперативное управление производством в реальном времени («on line») по техническим, в частности, технологическим параметрам и показателям с учетом технических ограничений.

Неотъемлемой частью АСУТП является система обеспечения безопасности (СОБ). Эта система также строится как иерархическая.

На нижнем уровне СОБ располагается подсистема противоаварийной защиты (ПАЗ) по факту аварийного события. Система ПАЗ в соответствии нормативно – технической документацией строится как автономная, состоящая и

работоспособность которой не связана с состоянием функций АСУТП, выполняемыми в штатном режиме.

На более высоких уровнях СОБ располагаются системы диагностики неисправности элементов автоматизированного технологического комплекса (АТК) и его защиты от последствий неисправностей, системы мониторинга АТК и окружающей среды, включая подсистему прогнозирования развития ситуации и выработки решений по управлению развитием аварийных ситуаций, минимизирующих ущерб от аварий и т.д..

Рассматривая АСУ ТП, принято в ее состав включать: техническое, программное, информационное, организационное обеспечение, а также оперативный персонал.

Функции и составные части АСУ ТП

Функция АСУ ТП – это круг (совокупность) действие системы, направленное на достижение одной из частных целей управления. Обычно выделяют 3 виды функций: информационные, управляющие, вспомогательные.

К ***информационным функциям*** относятся те, цель которых – сбор, преобразование и хранение информации о состоянии ТООУ, представление этой информации оперативному персоналу или передача ее для последующей обработки.

Основные информационные функции:

- первичная обработка информации о текущем состоянии ТООУ;
- обнаружение отклонений технологических параметров и показателей состояния оборудования от установленных значений;
- расчет значений, не измеряемых величин и показателей;
- оперативное отображение и регистрация информации;
- обмен информацией с оперативным персоналом;
- обмен информацией со смежными и вышестоящими АСУ (последние со временем, видимо, выделятся в отдельную группу коммуникационных функций).

Управляющие функции обеспечивают поддержание экстремального значения критерия управления в условиях изменяющейся производственной ситуации. Отличительная особенность управляющих и информационных функций АСУ ТП – их направленность на конкретного потребителя (объект управления, оперативный персонал, смежные системы управления).

Применительно к энергоблокам выделяют следующие управляющие функции:

1. *Статическая оптимизация режимов работы энергооборудования.* С целью достижения заданных критериев управления предусмотрен контроль и управление режимами работы оборудования.

Например:

По котлу — поддержание КПД вблизи оптимального значения сравнением его текущего и расчетного значений. Регулирующим воздействием служит изменение расхода воздуха, подаваемого в топку, например, за счет

изменения положения направляющих аппаратов на всасе дутьевых вентиляторов или использования других способов.

По турбине – поддержание КПД турбоустановки вблизи оптимального значения за счет изменения вакуума в конденсаторе. Регулирующим воздействием служит изменение расхода охлаждающей воды в конденсатор.

По блоку в целом – поддержание давления перегретого пара перед турбиной, которое может изменяться в заданных пределах в зависимости от нагрузки в регулирующем режиме работы блока. Изменение давления пара достигают, например, (при работе на скользящих параметрах) воздействием на расход топлива, подаваемого в топку котла.

2. *Критериальное управление локальными АСР*, обеспечивающих автоматическое ведение технологического процесса по участкам энергоблока (температуре перегрева пара, экономичности процесса горения в топке и др.), реализуют изменением задания по каналам управляющих воздействий в зависимости от изменчивости режимов работы энергоблока по электрической нагрузке, качеству и виду топлива.

3. *Динамическая оптимизация технологических процессов* с целью достижения заданных показателей качества переходных процессов предусматривают подстройку динамических параметров регуляторов нижнего уровня. Ее осуществляют при изменениях режимов работы энергоблока (например, при переходе с одного уровня нагрузки на другой) или изменчивости вида динамических характеристик.

4. *Переключения и дискретные операции.* Достижение заданных критериев управления при переходе с одного уровня электрической или тепловой нагрузки на другой, или изменение состава работающего оборудования предусматривает переключения в тепловой или электрической схемах энергоблока. Переключения осуществляют *дистанционно или с помощью технических средств дискретной автоматики*. В состав операций переключения входят:

открытие или закрытие запорных органов в обусловленной последовательности или же включение (отключение) блокировок;

пуск (останов) вспомогательных агрегатов (резервных, пусковых, дополнительных и т.п.).

5. *Исследование объекта управления* предусматривает использование АСУ ТП как инструменты изучения ТОУ, связанного с испытаниями и наладкой теплового оборудования или же с составлением блочных режимных карт. Для этой цели установлен персональный компьютер с видеомонитором и устройством связи с объектом, печатающее устройство и пакет прикладных программ. Инструментальный компьютер связан с банком блочных данных и другими информационными подсистемами и сетями, в частности с архивом ПТО.

6. *Имитация экстремальных условий* при проведении противо-аварийных тренировок (воспроизведение псевдосрабатываний тепловой защиты и технологической сигнализации, псевдоотключений механизмов собственных нужд котла и турбины и т.п.). Роль имитатора экстремальных условий выполняет специальный видеодисплей, оснащенный пакетом прикладных программ. Все

тренировки персонала на действующем оборудовании строго лимитированы должностными и производственными инструкциями. В прикладных программах предусмотрены соответствующие приоритеты и запреты, исключающие вмешательство автоматических устройств и персонала в технологический процесс.

Вспомогательные функции обеспечивают решение внутрисистемных задач. Вспомогательные функции не имеют потребителя вне системы и обеспечивают функционирование АСУ ТП.

Виды обеспечения АСУ ТП

В АСУ ТП, выделяется ряд основных видов обеспечения, определяемых ниже.

Техническое обеспечение (system hardware) комплекс технических средств (КТС), применяемых для функционирования автоматизированной системы управления. Комплекс содержит следующие основные элементы: средства получения информации о текущем состоянии ТОУ (источники информации); управляющий вычислительный комплекс (УВК); технические средства для реализаций функций локальных систем автоматизации; устройства связи с оперативным персоналом; исполнительные устройства, непосредственно реализующие управляющие воздействия на ТОУ.

Математическое обеспечение (mathematical support), т.е. совокупность математических методов, моделей и алгоритмов обработки информации, используемых при разработке и функционировании таких систем. Математическое обеспечение – это «идеологическое содержание» АСУ или так называемый мягкий товар.

Программное обеспечение (system software) представляет собой комплекс программ, реализующих алгоритмы обработки информации. Его разделяют на общее (ОПО) и специальное (СПО). ОПО – совокупность программ, рассчитанных на широкий круг пользователей и предназначенных для организации вычислительного процесса и (или) решений часто встречающихся задач обработки информации. СПО – совокупность программ, разрабатываемых при создании конкретной системы управления для реализации ее функций.

Характерными чертами функциональных программ АСУ ТП является то, что для каждой программы существует регламент ее исполнения и их многочисленность (массовость). Относительно новой задачей в области программного обеспечения является разработка программных средств реализаций протоколов и интерфейсов ЛВС.

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:

- Centum, Yew Series (Yokogawa, Япония);
- СКАТ, КВИНТ, КРУТ (Россия);

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

- 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).

Под *информационным обеспечением* (data support) подразумевают совокупность реализованных решений по объемам, размещению и формам организации информации, циркулирующей в системе при ее функционировании. Информационное обеспечение определяется характеристиками информации, хранимой и обрабатываемой в системе, в аспекте процедур оперирования с данными безотносительно к их содержанию. В АСУ ТП основную роль играет отображающая информация, которая характеризует материальные и абстрактные сущности посредством описания их свойств и отношений.

Информационное обеспечение в широком смысле это вся система отображения производственного процесса. Использовать такое обеспечение при проектировании неудобно, поэтому используют информационное обеспечение в узком смысле. Обычно это информационная модель, представляющая формализованное описание процессов обработки данных.

Лингвистическое обеспечение (linguistic support) определяется как совокупность языковых средств для формализации естественного языка, построения и сочетания информационных единиц при общении персонала автоматизированной системы управления со средствами вычислительной техники при функционировании АСУ.

Организационное обеспечение (organizational support) представляет совокупность описаний функциональной, технической и организационной

структур, инструкций и регламентов для оперативного персонала АСУ ТП, обеспечивающую заданное функционирование оперативного персонала в составе АТК.

В состав *оперативного персонала* АСУ ТП входят: технологи - операторы, осуществляющие контроль за работой и управление ТОУ, а также эксплуатационный персонал АСУ ТП. Ремонтный персонал в состав АСУ ТП не входит.

Тема 5. Этапы разработки и внедрения АСУТП

Создание АСУТП — это сложный процесс, который проходит через пять стадий: разработка технического задания, выполнение технического проекта, создание рабочего проекта, внедрение в производство и анализ функционирования АСУТП в производственных условиях. Проектирование АСУТП производится коллективом специалистов: технологии, электромехаников, программистов, экономистов, в котором специалисты по электроприводу играют заметную роль.

Разработка *технического задания* связана с целым рядом предварительных исследований, связанных с обследованием автоматизируемого технологического комплекса и проведением (при необходимости) предпроектных научно-исследовательских работ (НИР). Предметом НИР прежде всего является анализ техпроцесса как объекта управления с целью определения критериев функционирования системы управления с учетом имеющихся ограничений. В рамках предпроектных НИР разрабатываются предварительные варианты математических моделей техпроцесса и целевой функции системы управления с использованием теоретических и экспериментальных методов синтеза алгоритмов функционирования и управления.

На основе результатов предварительных исследований проводится эскизная проработка проекта будущей АСУТП. При этом разрабатываются основы функционально-алгоритмической структуры системы, производятся синтез основных алгоритмов управления и их экспериментальная проверка. Затем обосновывается выбор основных технических средств системы и предлагается их номенклатура, определяются задачи модернизации технологического оборудования в связи с совершенствованием техпроцесса благодаря его автоматизации, производится сравнение разрабатываемой АСУТП и ее ближайших аналогов с целью более полного обоснования принятых технических решений.

В завершение предварительных исследований и разработок формируются основные положения технического задания, которые включают в себя полный перечень функций, реализуемых проектируемой системой; технико-экономическое обоснование ее создания; виды и объемы проектных и научно-исследовательских работ по проектированию, внедрению и анализу функционирования создаваемой АСУТП; план-график работ по монтажу, наладке и пуску автоматизированного комплекса.

На стадии выполнения *технического проекта* сначала производится системотехнический синтез АСУТП: разрабатывается функциональная структура системы с определением круга решаемых при проектировании задач, формируется перечень воспринимаемых входными модулями АСУТП сигналов и определяются их метрологические характеристики, формируются технические требования к устройствам контроля и регулирования технологических параметров, разрабатывается информационная и организационная структура системы.

Затем производится окончательный выбор технических средств, посредством которых строится АСУТП: определяется аппаратная часть центральной и локальных УВМ; выбираются измерительная аппаратура и приборы, предназначенные для производства измерений технологических параметров; разрабатываются устройства локальной автоматики и определяется состав исполнительных устройств технологического комплекса. В связи с этим выдаются задания на модернизацию отдельных технологических узлов автоматизируемого комплекса и на строительно-монтажные работы.

В порядке технического проектирования производится подготовка заявок на стандартное и нестандартное оборудование, составляется смета на технические средства, необходимые для комплектования проектируемой АСУТП. Производится также расчет ожидаемой технико-экономической эффективности и сравнительный анализ проектируемой АСУТП в сопоставлении с известными аналогами. Составляется ее патентный формуляр.

На заключительной стадии технического проектирования проектируется специальное программное и информационное обеспечение АСУТП. В частности, разрабатываются полные наборы алгоритмов нормального функционирования системы в режиме реального времени и производится их экспериментальная проверка. Осуществляется разработка схем сбора и преобразования технологической информации. С другой стороны, разрабатывается инструментальное программное обеспечение, автоматизирующее создание прикладных управляющих программ вплоть до уровня САП.

Рабочее проектирование производится по материалам технического проекта. Его основной частью является разработка рабочей документации технической обеспечением АСУТП. При этом помимо рабочих чертежей составляется техническая документация: технические описания системы в целом и ее составляющих частей, спецификации, инструкции по эксплуатации и другая документация, являющаяся неотъемлемой частью информационного обеспечения АСУТП.

В состав рабочего проекта входит также рабочая документация на программное обеспечение АСУТП, включая необходимое системное программное обеспечение и образцы управляющих программ. Программное обеспечение сопровождается соответствующим информационным обеспечением. Это инструкции по программированию, описания алгоритмов специального математического обеспечения, перечни и описания специализированных программ. В рамках рабочего проекта предоставляется полный комплект нормативно-справочной документации.

Внедрение новой АСУТП в производство осуществляется в следующем порядке:

- 1) аппаратная часть АСУТП устанавливается вблизи управляемого технологического комплекса и соединяется с ним линиями связи;
- 2) проводится комплекс организационно-технических мероприятий, в рамках которых производится необходимая модернизация технологического оборудования в целях адаптации его к автоматическому управлению, а также обучение ремонтно-эксплуатационного персонала;

3) производится наладка АСУТП, начиная с наладки ее технических средств. Затем отрабатываются алгоритмы управления отдельными узлами и производственными модулями автоматизируемого комплекса, после чего совершается переход к отладке решения отдельных функциональных задач на базе всего технологического комплекса;

4) осуществляется опытная эксплуатация АСУТП. В этот период определяются эксплуатационные характеристики автоматизированного комплекса, производится дополнительная отладка технических средств и программного обеспечения, соответственно корректируется техническая документация.

В процессе наладки и опытной эксплуатации внедрение АСУТП в производство осуществляется поэтапно. Вначале АСУТП работает в *режиме сбора данных*, а управление технологическим процессом производится оперативным персоналом. В это время производится дополнительное изучение автоматизируемого техпроцесса и уточнение его математической модели.

Затем АСУТП переводится в *режим советника*. При работе в режиме советника задействованы алгоритмы управления техпроцессом, но вырабатываемые управляющие сигналы не реализуются, а выводятся в качестве рекомендаций оператору, управляющему техпроцессом. В этом режиме производится дополнительное изучение эффективности алгоритмов управления, реализуемых АСУТП, и их уточнение.

При достижении достаточной надежности функционирования алгоритмов управления АСУТП переводится в *режим непосредственного управления техпроцессом* и опытная эксплуатация реализуется в полной мере.

Опытная эксплуатация завершается *приемосдаточными испытаниями*, которые производятся по заранее разработанной и утвержденной в установленном порядке программе. По результатам опытной эксплуатации и приемосдаточных испытаний производится доработка АСУТП перед передачей ее в постоянную эксплуатацию. Последующий анализ функционирования АСУТП в производственных условиях позволяет определить реальную технико-экономическую эффективность автоматизированного технологического комплекса и наметить пути совершенствования АСУТП и автоматизированного техпроцесса.

Тема 6. Математические модели технологических объектов, используемые в задачах управления. Модели статики

Общие положения. Особенности технологического процесса

Сущность технологического процесса на ТЭС состоит в поэтапном преобразовании различных видов энергии. Исходными продуктами этого процесса служат топливо, вода и воздух, конечным - электроэнергия. И тот и другой оценивают количеством (расходом, нагрузкой) и качеством (теплотой сгорания и тонкостью помола твердого топлива, концентрацией растворимых в воде примесей, напряжением и частотой электрического тока на выходе

Из-за высоких требований к качеству электроэнергии необходимо непрерывно поддерживать строгое соответствие между электрической нагрузкой и паропроизводительностью котла. Косвенным показателем баланса между ними служит давление перегретого пара, которое обычно стабилизируют вблизи установленного значения с помощью автоматических устройств. Технологический процесс на ТЭС в целом управляем. Управление количеством исходных продуктов (расходом топлива, питательной воды и воздуха) осуществляют дистанционно или автоматически посредством регулирующих органов.

Управление количеством конечного продукта (электрической энергией) осуществляют в основном изменением расхода пара через проточную часть турбины с помощью автоматического или дистанционного воздействия на регулирующие клапаны.

Качество конечного продукта (частота и напряжение переменного электрического тока) непрерывно контролируют. На него можно влиять с помощью специальных устройств (рассмотрим далее).

Технологический (тепловой) процесс на ТЭС достаточно точно отражает принципиальная схема ее тепловой части (тепловая схема). Вид тепловой схемы зависит от конструктивных особенностей теплового оборудования и требований, предъявляемых к его работе с точки зрения возможных эксплуатационных режимов (пуск и холостой ход, работа при расчетных и пониженных нагрузках и др.).

Современные ТЭС делят на два типа:

- с поперечными связями между основными агрегатами по пару (общий паропровод для котлов и турбин) и воде (общие питательные магистрали для котлов, охлаждающей воды и конденсата для турбин);

- с блочной компоновкой основного оборудования и с независимым технологическим процессом в пределах каждого энергоблока.

Различие в тепловых схемах ТЭС отражают в математических моделях, используемых как для расчета ТЭП, так и для управления.

Математические модели технологических объектов, используемые в задачах управления. Общие положения.

Математические модели ТЭС составляют для описания технологических процессов и формирования критериев управления на различных уровнях (локальных, блочных, общестанционных). В наиболее общем виде их записывают в форме отображений

$$S_{\text{ТЭС}}: X_{\text{ТЭС}} \rightarrow Y_{\text{ТЭС}}. \quad (6.1)$$

Применительно к каждому энергоблоку конечное множество входных воздействий $x = \{x_i\} \in X$ - изменения расходов воды, топлива и воздуха и т.д. К множеству выходных воздействий (сигналов) $y = \{y_i\} \in Y$ относят изменения электрической мощности, паропроизводительности котлов и параметры, характеризующие состояние энергоносителей на выходе блока (давление, температура, энтальпия и др.).

Для отдельных моделей подходящим уровнем математической абстракции служат уравнения материального и энергетического балансов, по которым рассчитывают ТЭП энергоблоков и станции в целом, а также дифференциальные уравнения (передаточные функции, комплексные частотные характеристики и др.), описывающие переходные процессы в котлах и турбинах. На основе этих уравнений определяется вид управляющих воздействий для достижения оптимальных значений ТЭП в установившемся и переходном режимах.

Пред составлением математических моделей ТЭС необходимо определить каналы передачи регулирующих, управляющих и возмущающих воздействий для каждого объекта управления. При этом технологический объект управления (ТОУ), рассматриваемый в виде самостоятельного звена сложной системы, определяют как совокупность технологического оборудования и реализованного на нем по соответствующим технологическим инструкциям или регламентам технологического процесса производства.

В качестве объекта управления, характеризующего технологический процесс на ТЭС в целом, обычно выбирают типичный энергоблок. Технологический процесс, протекающий в таком энергоблоке, можно представить в виде двух последовательных процессов: в паровом котле и турбогенераторе. Для укрупненных моделей ТЭС дальнейшая детализация процессов нецелесообразна.

При математическом описании технологических процессов ТЭС используют модели *статики*, описывающие установившиеся состояния, и модели *динамики*, описывающие переходные режимы. Как те, так и другие могут быть построены аналитическим и экспериментальным методами.

Модели статики.

Математические модели статики объектов ТЭС могут быть представлены несколькими видами. Первый вид моделей определяет связь между каким-либо

входом x_i и соответствующим ему выходом y_i в установившемся режиме работы энергоблока. Модели в этом случае составляют в форме алгебраических уравнений, таблиц или графических зависимостей:

$$y_i = f(x_i). \quad (6.2)$$

Зависимость (6.2) для линеаризованных систем имеет вид

$$y_i = k_i x_i. \quad (6.3)$$

Для нелинейных систем, к каким относятся все промышленные об- при изменении входных сигналов в широком диапазоне значений, составляют дополнительное семейство моделей статики, которые определяют связь между значениями k_i и нагрузкой объекта, изменяющейся от минимального до номинального значений:

$$k_i = f(\lambda_i). \quad (6.4)$$

где $\lambda_i = N_\phi / N_0$; N_ϕ , N_0 — фактическая и номинальная нагрузки.

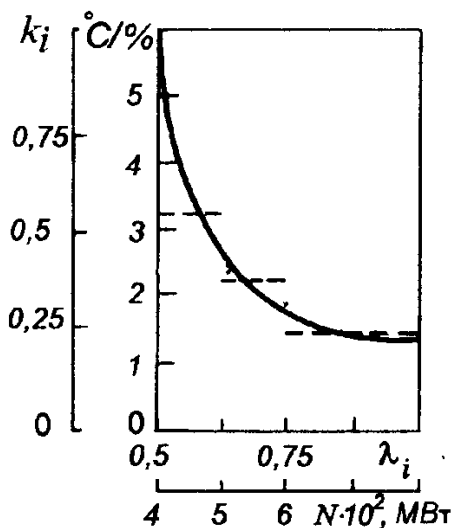


Рис 6.1. Статическая характеристика по температуре $k_i = f(\lambda_i)$ прямоточного котла

В качестве примера на рис. приведена экспериментальная зависимость (6.4) для прямоточного котла ТГМП-204 производительностью 2500 т/ч по каналу воздействия топливо — температура за потолочным экраном.

Аналитические формы записи нелинейных моделей чаще всего неизвестны. Поэтому их задают в виде графиков или таблиц, построенных по результатам опытного или расчетного определения значений k_i в принятом диапазоне изменения нагрузок.

Чаще всего применяют кусочно-линейные

или кусочно-квадратичные приближения, аппроксимируемые ступенчатыми функциями. Аппроксимирующая функция в данном случае — дискретная последовательность средних значений k_i , взятых на отрезках λ_{i-1} , λ_i .

В общем случае при наличии одного выхода и n независимых входов (факторов) математической модели статики также составляют на основе описания статических связей между y и x . Последние часто представляют в виде ограниченного ряда Тейлора. При этом неизвестную зависимость

$$y = S(x),$$

где $x = \{x_i\} \in X$, $i = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ аппроксимируют следующим образом:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \sum_{k=j+1}^n \beta_{ijk} x_i x_j x_k + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \beta_{1,2,\dots,n} x_1, x_2, \dots, x_n \quad (6.8)$$

$$\beta_i = \frac{\partial y}{\partial x_i}; \beta_{ij} = \frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial x_j}; \beta_{ii} = \frac{\partial^2 y}{\partial x_i^2}.$$

где

Обычно значения коэффициентов β определяют экспериментально. При наличии помех в условиях промышленной эксплуатации $Y(t)$ случайный процесс даже при неизменных (стабилизированных) значениях входных переменных $x_i(t)$. Поэтому аппроксимирующее выражение (6.8) следует рассматривать как условное математическое ожидание m_y . Случайный характер изменения y приводит к тому, что по результатам эксперимента вычисляют не сами коэффициенты $\beta_0, \beta_{ij}, \beta_{ii}$ и др., а их оценки b_0, b_i, b_{ij} и др.

Полученное при этом уравнение статической связи называют уравнением регрессии y на x_1, x_2, \dots, x_n :

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \dots \quad (6.9)$$

Основным недостатком составления математических моделей статистики в виде уравнения (6.9) служит громоздкость расчета.

Однако эти недостатки в значительной мере устраняют при составлении моделей статистики методом полнофакторного эксперимента (ПФЭ), основу которого составляют упорядоченное расположение экспериментальных точек и в факторном пространстве x_1, x_2, \dots, x_n и регрессионный анализ.

Последующий процесс построения математической модели ТОУ включает следующие операции:

- построение матрицы планирования (программа эксперимента, в соответствии с которой реализуются опыты и варьируется x_i);
- собственно эксперимент;
- проверка воспроизводимости опытов;
- расчет коэффициентов регрессии b_{ij} ;
- проверка статистической значимости b_{ij} ;
- проверка адекватности математического описания уравнением (6.9) реально существующих зависимостей $y=S(x)$.

Примером математической модели статистики в виде уравнения регрессии второго порядка для сигнала по перепаду давлений на циркуляционном контуре $p_{\text{пк}}$ барабанного котла типа ТП-87 паропроизводительностью 420 т/ч служит выражение

$$U = -4,4X_1 - 62,7X_1^2 + 154X_2 - X_2^2 + 16,8X_1X_2, \quad (6.10)$$

где U – сигнал по $p_{\text{пк}}$ (тепловосприятию) на выходе измерительного блока регулирующего прибора, Мв; X_1 — кодированный сигнал, характеризующий изменение расхода воздуха в напорном патрубке дутьевого вентилятора p_v , мм.в.с.:

$$X_1 = (p_v - 250)/50;$$

X_2 — кодированный сигнал, характеризующий изменение расхода топлива (оценивается по положению траверсы плоского контроллера B_T , деление):

$$X_2 = (B_T - 6)/2.$$

График зависимости $U = f(X_1)$ для значений $X_2 = 4, 6$ и 8 , полученный по результатам двухфакторного эксперимента, показан на рис. 2

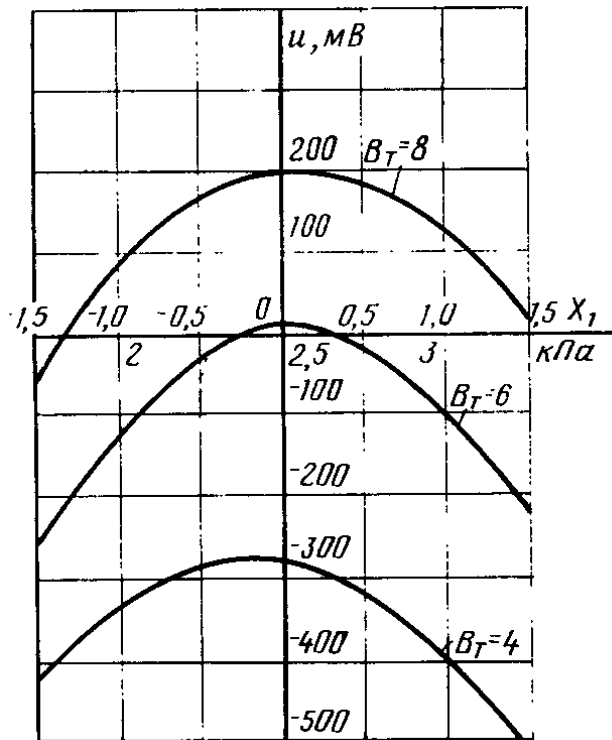


Рисунок 6.2 – График зависимости $U = f(X_1)$

Для составления математических моделей статики ТЭС, используемых при определении ТЭП, необходимо провести расчет принципиальной тепловой схемы станций. В качестве исходных данных для этого используют:

- электрическую мощность турбогенератора N_z (выходная величина y_i);
- количество теплоты, выделяемое при расходе единицы топлива q_T (входная величина);
- характеристики технологического процесса, протекающего в энергоблоке: параметры воды и пара (давление, температура, энтальпия и др.) в котле, турбоустановке по ступеням турбины и регенеративного подогрева (значения $p_{пп}, t_{пп}, h_0, h', p', t'_и, i_{пв}, p_{пв}, i_k$); доля пропуска пара на каждую ступень j , внутреннее теплопадение H_{ij} , внутренняя работа на 1 кг свежего пара $\alpha_j H_{ij}$.

Расчет ТЭП осуществляют с помощью семейства алгебраических уравнений, составляемых в несколько этапов. На первом из них на основе уравнений материального и теплового балансов потоков пара, конденсата и питательной воды определяют расходы пара:

на входе в турбину

$$G_0 = N_z / \sum \alpha_j H_{ij} \eta_m \eta_c \quad (6.11)$$

где $N_{э}$ — заданная электрическая мощность турбогенератора; η_m, η_g — механический КПД турбины и генератора;
на выходе турбины (на входе в конденсатор)

$$G_{KT} = \alpha_{KT} G_0, \quad (6.12)$$

где α_{KT} — относительный пропуск пара в конденсатор; на вторичный перегрев

$$G_{BП} = \alpha_{BП} G_0,$$

где $\alpha_{BП}$ — относительный массовый расход пара на вторичный перегрев; на выходе котла

$$G_{ПП} = \alpha_K G_0,$$

где $\alpha_K = 1 + \alpha_y$, ($\alpha_y \approx 0,02$).

Далее составляют систему уравнений для энергетических показателей в следующем порядке:

уравнение тепловой нагрузки котла

$$Q_k = G_{nn}(h_0 - h_{не}) + G_{en}(h_{en}^T - h_{en}^0); \quad (6.14)$$

уравнение расхода теплоты на турбоустановку

$$Q_T = G_T(h_0 - h_{не}) + G_{en}(h_{en}^T - h_{en}^0), \quad (6.15)$$

где $h_{en}^T - h_{en}^0$ — разница энтальпий после и до вторичного перегрева;
уравнение расхода теплоты на электроэнергию

$$Q_T^э = Q_T - (Q_T^{ПOT} + Q_T^Д), \quad (6.16)$$

а при наличии отопительной нагрузки и теплофикационного отбора уравнение (6.15) принимает вид

$$Q_T^э = Q_T - (Q_T^{ПOT} + Q_T^Д) - (Q_{ОТП} + Q_{ОТП}^{ПOT}) \quad (6.17)$$

где $Q_T^{ПOT}, Q_T^Д$ — расходы теплоты на восполнение потерь и получение дистиллята, $Q_{ОТП}$ — теплота, отпущенная тепловому потребителю (на подогрев сетевой воды); $Q_{ОТП}^{ПOT}$ — теплота, затраченная на восполнение потерь сетевой воды;

уравнение потерь теплоты в конденсаторе турбины

$$Q_T^K = G_{KT}(h_K - h'_K). \quad (6.18)$$

На заключительном этапе определяют ТЭП энергоблока:
удельные расходы теплоты q_m^3 кДж/(кВт · ч) на электроэнергию и пара d_0 кг/кВт, на турбину:

$$(6.19)$$

$$q_T^3 = Q_T^3 / (N_{\text{э}} + N_{\text{ТПН}}),$$

$$(6.20)$$

$$d_0 = G_0 / (N_{\text{э}} + N_{\text{ТПН}}).$$

где $N_{\text{ТПН}} = G_{\text{ПВ}} v_{\text{ср}} \Delta p_{\text{н}} \cdot 10^3 / \eta_{\text{н}}$ — мощность привода турбопитательного насоса, кВт; $\Delta p_{\text{н}}$ — повышение давления насосом, МПа; $v_{\text{ср}}$ — удельный объем воды, м³/кг; $\eta_{\text{н}}$ — КПД насоса (0,833);

коэффициенты полезного действия турбины по отпуску электроэнергии и транспорта теплоты:

$$(6.21)$$

$$\eta_T^3 = 1 / q_T^3,$$

$$(6.22)$$

$$\eta_{\text{ТР}} = Q_T / Q_K.$$

располагаемая теплота на входе в энергоблок (теплота топлива и воздуха).
кВт:

$$(6.23)$$

$$Q_P = Q_K / \eta_K,$$

где η_K — КПД брутто котла;

коэффициент полезного действия брутто энергоблока (коэффициент передачи детектирующего звена, рассматриваемого как модель статики ТЭС):

$$\eta_{\text{эб}} = (N_{\text{э}} + N_{\text{ТПН}}) / Q_P \quad (6.24)$$

или

$$(6.25)$$

$$\eta_{\text{эб}} = \eta_K \eta_{\text{ТР}} \eta_T^3,$$

где η_T^3 — абсолютный электрический КПД турбины

$$(6.26)$$

$$\eta_T^3 = (N_{\text{э}} + N_{\text{ТПН}}) / Q_T;$$

удельный расход теплоты на энергоблоке:

$$q_T^3 = 1 / \eta_{\text{эб}}; \quad (6.27)$$

КПД энергоблока нетто:

$$\eta_{\text{эб}}^{\text{н}} = \eta_{\text{эб}} (1 - (N_K^{\text{CH}} + N_T^{\text{CH}}) / N_{\text{э}}), \quad (6.28)$$

где $\eta_{\text{эб}}^{\text{н}} = \eta_{\text{эб}} (1 - (N_K^{\text{CH}} + N_T^{\text{CH}}) / N_{\text{э}})$, — потребляемые мощности на собственные нужды котла и турбины (на привод дымососов, вентиляторов, насосов и т.п.);

удельный расход условного топлива (нетто) на энергоблок, г/МДж:

$$b_y^H = 34,12 / \eta_{\text{эб}}^T. \quad (6.29)$$

На основе (6.14—6.18), (6.24) строят диаграмму теплоиспользования Q_p энергоблока (модель распределения теплоты в статике), отображающую распределения и потери теплоты в процессе преобразования энергии на энергоблоке ТЭС (рис. 6.3).

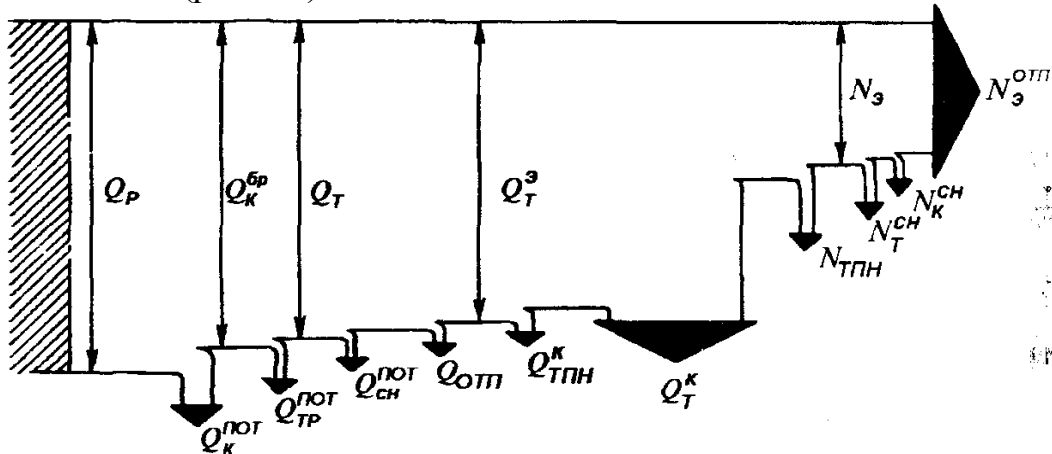
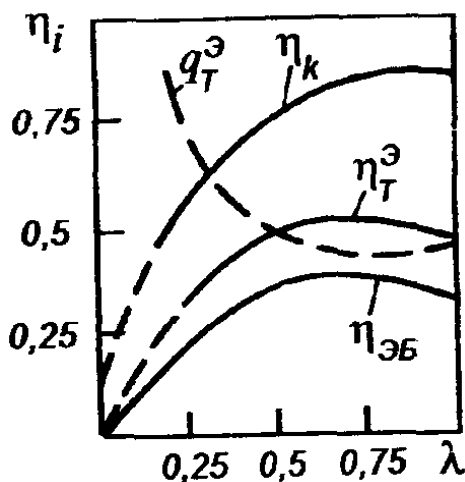


Рис. 6.3. Диаграмма распределения теплоты для энергоблока

$Q_k^{\text{пот}}, Q_T^{\text{пот}}, Q_T^{\text{к}}, Q_{\text{ТПН}}^{\text{к}}$ — потери теплоты соответственно в котле, на транспорт, собственные нужды турбины, в конденсаторах турбины ТПН; Q_p — располагаемая теплота; $Q_k^{\text{бр}}, Q_T, Q_{\text{отп}}$ — теплоты соответственно брутто на выходе котла, на входе в турбину, отпущенная потребителю; $Q_T^{\text{э}}$ — расход теплоты на электроэнергию; $N_{\text{ТПН}}, N_{\text{э}}$ — мощности на привод ТПН и электрическая на выходе турбогенератора; $N_T^{\text{сн}}, N_K^{\text{сн}}$ — расходы электроэнергии на собственные нужды турбины и котла; $N_{\text{э}}^{\text{отп}}$ — электроэнергия, отпущенная потребителю



На основе уравнений (6.19), (6.21), (6.26) и др., задаваясь различными значениями электрической нагрузки $N_{\text{э}}$, составляют математические модели статики ТЭП на ТЭС в виде семейства функций, устанавливающих связь между нагрузкой

Рис. 6.4 – Статические характеристики экономичности работы энергоблока

$$\lambda_i = N_{\text{э}i} / (N_{\text{э}}^{\text{НОМ}} + N_{\text{ТПН}})$$

и искомым значением k_i , т.е.

$$k_i = f(\lambda_i) \quad (6.30)$$

где $k_i = \eta_{TЭС(ЭБ)}^H, q_T^Э, \eta_T^Э$ и т.п.

Обычно уравнения (6.30) служат нелинейными функциями аргумента в связи с тем, что составляющие тепловых и электрических потерь нелинейно зависят от значений электрической нагрузки. Как правило, весовая составляющая потерь энергии растет с уменьшением тепловой и электрической нагрузок энергоблока. Графическое изображение функций (6.30) показано на рис 6.4.

Зависимости (6.30), построенные на основании уравнений (6.28), (6.29) используют в качестве функции цели при управлении энергоблоком.

Тема 7. Математические модели технологических объектов, используемые в задачах управления. Модели динамики

Модели динамики. Математические модели динамики определяют связи между входными $x = \{x_i\}$ и выходными воздействиями $y = \{y_i\}$ **ТОУ** или же его отдельного участка в переходных режимах энергоблока. Ниже рассматриваются математические модели динамики объектов ТЭС, которые часто используются в прикладных задачах управления, например при приближенном определении оптимальных настроек автоматических регуляторов или же при оценке качества переходных процессов, протекающих в котле, турбине и энергоблоке в целом.

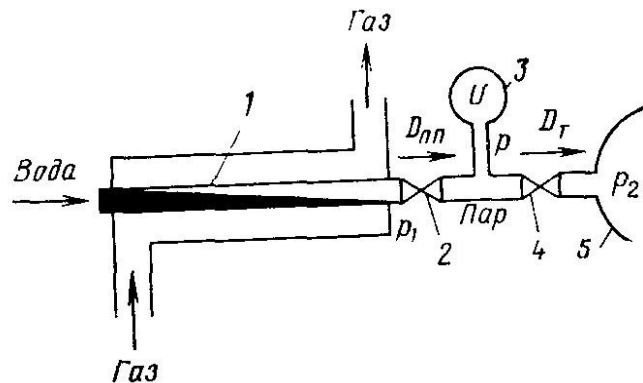


Рис. 7.1. Физическая модель котла и парового тракта ТЭС

1 – парообразующая поверхность нагрева котла; 2 – сопротивление пароперегревателя; 3 – емкость парового тракта; 4 – сопротивление турбины с клапанами; 5 – конденсатор турбины.

Тепловые объекты ТЭС представляют собой сложные термодинамические системы с несколькими входными и выходными величинами. Так, например, упрощенная физическая модель пароводяного тракта ТЭС изображена на рис. 7.1. При этом модель котла представляет собой теплообменник «труба в трубе», в кольцевом канале которого движутся продукты сгорания, а во внутреннем – рабочее тело – теплоноситель (вода или пар).

Для более детального описания процессов, протекающих в теплообменнике, используют модели с *распределенными* параметрами. В них свойства греющих газов и рабочего тела, а также геометрические размеры каналов изменяются вдоль пути движения потоков. Составление таких моделей является довольно сложной задачей. В целях ее упрощения прибегают к составлению моделей с *сосредоточенными* параметрами. Масса и энергия таких систем сосредоточены в одной или нескольких точках, а физические величины, характеризующие систему в каждой точке, не зависят от пространственных координат и являются лишь функцией времени.

При таком подходе модель сложной системы может быть представлена в виде последовательного и параллельного соединения участков с сосредоточенными параметрами, представляющими собой источники вещества (энергии) или гидравлические сопротивления.

Общепринятыми моделями ТОУ ТЭС служат: линейные дифференциальные уравнения, временные (переходная, импульсная и комплексная частотная характеристики) и передаточные функции.

Линейные дифференциальные уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = \\ = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t). \end{aligned} \quad (7.1)$$

Переходная характеристика, являющаяся решением (7.1) при входном сигнале, имеющем вид единичной функции $l(t)$, записывается как

$$\left. \begin{aligned} h(t) &= \sum_{i=1}^n C_i e^{s_i t} + y^{уст}(t); \\ l(t) &= \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ 1 & \text{при } t \geq 0, \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (7.2a)$$

где $s = \alpha \pm i\omega$.

Импульсная характеристика, представляющая собой выходной сигнал линейной системы при входном сигнале, имеющем вид дельта-функции:

$$\mathcal{W}(t) = f[x(t)] = dh(t)/dt,$$

где

$$x(t) = \delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0; \\ 0 & \text{при } t \neq 0. \end{cases} \quad (7.2.6)$$

Для реальных систем входной сигнал импульсной характеристики представляет собой единичную функцию с конечной длительностью импульса

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ 1 & \text{при } 0 \leq t < t_1; \\ 0 & \text{при } t \geq t_1. \end{cases}$$

Импульсная характеристика реальных систем

$$\mathcal{W}(t) \equiv 0 \quad \text{при } t < 0.$$

Передаточная функция представляет собой преобразование Лапласа импульсной характеристики:

$$W(s) = \int_0^{\infty} \mathcal{W}(t) e^{-st} dt, \quad (7.3)$$

где $s = \alpha \pm i\omega$.

Комплексная частотная характеристика (КЧХ) представляет собой преобразование Фурье импульсной характеристики:

$$W(i\omega) = \int_0^{\infty} \mathcal{W}(t) e^{-i\omega t} dt = \operatorname{Re} W(i\omega) + j \operatorname{Im} W(i\omega), \quad (7.4)$$

где $\operatorname{Re} W(i\omega)$ и $\operatorname{Im} W(i\omega)$ - вещественная и мнимая составляющие вектора КЧХ.

Любая из вышеприведенных моделей может быть преобразована друг в друга. Например, дифференциальное уравнение с помощью оператора Лапласа преобразуется в передаточную функцию, которая путем формальной замены оператора s на $i\omega$ преобразуется в КЧХ.

Вид той или иной формы описания ТОУ диктуется конкретными условиями.

Например, в промышленных условиях или в задачах моделирования АСР в реальном масштабе времени удобнее всего пользоваться временными характеристиками. На стадии предпроектных и теоретических исследований, опирающихся на априорную информацию об объекте, удобнее оперировать передаточными функциями. Наконец, в некоторых специальных задачах синтеза и определения оптимальных настроек автоматических регуляторов удобнее обращаться к комплексным частотным характеристикам, позволяющим исследовать резонансные свойства АСР.

Аналитические методы составления математических моделей динамики в форме уравнений (7.1) – (7.3) в силу принимаемых упрощений не могут обеспечить достаточно точное воспроизведение фактической динамики объекта. Модели динамики чаще строят по опытным данным. При этом возникает обратная задача: по известной экспериментальной временной характеристике требуется составить передаточную функцию или КЧХ объекта.

В часто встречающейся задаче моделирования – воспроизведение динамических свойств сложного объекта соединением простых звеньев – динамические характеристики ТОУ могут быть описаны небольшим числом параметров.

Рассмотрим способы такого описания на примере экспериментальной переходной кривой разгона котла по давлению пара $p_6(t)$ при возмущениях по топливу для баорабанного котла

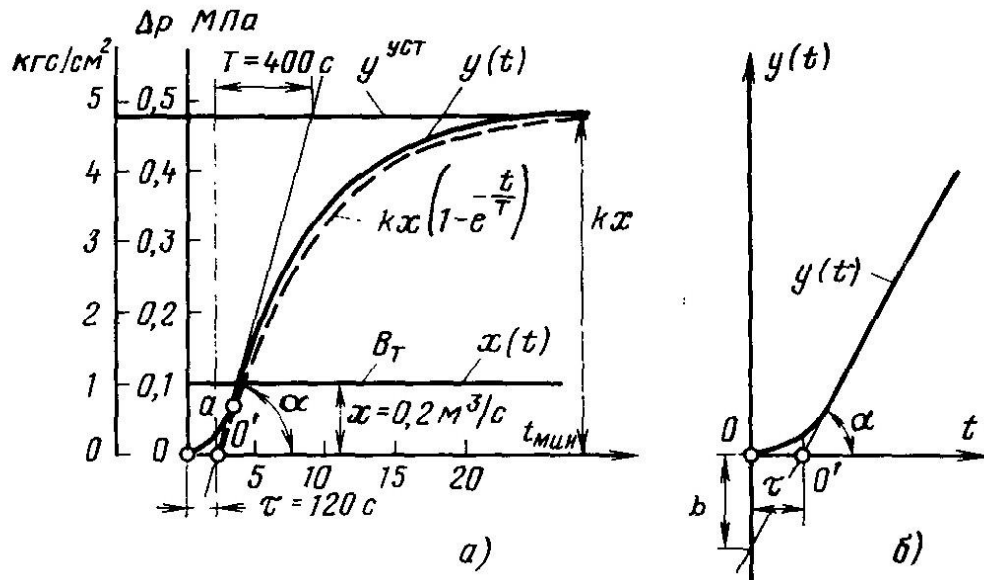


Рис. 7.2 – Экспериментальные кривые разгона котла ТП-87.

а – по давлению перегретого пара при возмущении расходом топлива (газа); б – по уровню воды, в барабане при возмущении расходом питательной воды.

Реальная кривая переходного процесса $y(t)$ заменяется участком запаздывания τ и экспонентой $y(t) = kx(1 - e^{-t/T})$ (пунктирная линия). Для этого к кривой переходного процесса в точке ее перегиба a проводится касательная до пересечения с установившимся значением регулируемой величины и отрицательной полуосью ординат. Далее через точку O' пересечения касательной с осью абсцисс проводится прямая, параллельная оси ординат $O'C$, и экспонента

Указанные построения позволяют определить длины отрезков τ и T . При этом линия $O'a$ одновременно является касательной к экспоненте, сдвинутой вправо на отрезок τ от начала координат. В результате исследуемый объект может быть представлен в виде последовательного соединения двух звеньев: запаздывающего звена со временем запаздывания τ и инерционного звена первого порядка с коэффициентом усиления k и постоянной времени T . Результирующая передаточная функция имеет вид:

$$W(s) = \frac{ke^{-s\tau}}{1 + Ts} \quad (7.5a)$$

Динамические свойства объекта характеризуют три величины: 1) коэффициент усиления:

$$k = y_{уст} / x;$$

2) время запаздывания τ , определяемое отрезком, отсекаемым касательной $O'a$ на оси времени;

3) постоянная времени T , равная по значению подкасательной к экспоненте $1 - e^{-t/T}$ и определяемая временем, за которое сигнал $y(t)$, нарастая с постоянной скоростью, равной скорости изменения параметра в момент нанесения ступенчатого возмущения, достигнет нового установившегося состояния (за вычетом времени запаздывания).

Следует заметить, что форма кривой переходного процесса, изображенного на рис. 7.2, и соответствующая ему передаточная функция (7.5а) характеризуют присущее многим теплоэнергетическим объектам свойство *самовыравнивания* или саморегулирования, т. о. способность объекта самостоятельно восстанавливать нарушенное равновесие между «притоком» и «стоком» энергии или вещества. При этом, чем больше k , тем меньше самовыравнивание, и наоборот.

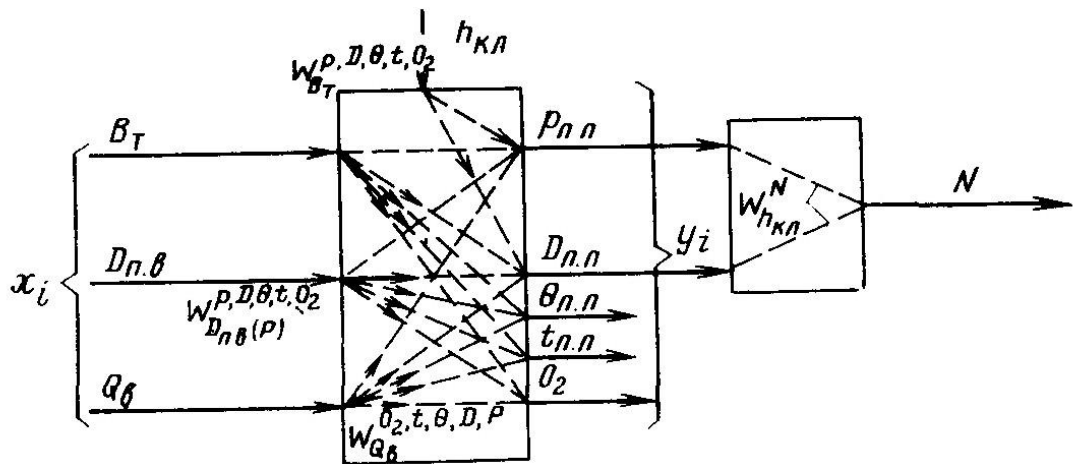


Рис. 7.3 – Участки технологического процесса энергоблока по основным каналам воздействий.

Динамические свойства объектов, не обладающих самовыравниванием, характеризуются двумя величинами: запаздыванием τ и коэффициентом пропорциональности интегрирующего звена $k_i = b/\tau$. Графические построения для определения параметров математической модели объекта, не обладающего свойством самовыравнивания, выполняются в соответствии с рис. 7.2 б. Для определения τ прямолинейный участок экспериментальной кривой $y(t)$ продолжается до пересечения с осью времени.

Передаточная функция объекта представляет собой функцию последовательного соединения запаздывающего и интегрирующего звеньев:

$$W(s) = \frac{k_H}{s} e^{-s\tau}. \quad (7.5.6)$$

Модели динамики промышленных объектов, используемые в задачах управления, чаще всего состоят с использованием вышеприведенных способов аппроксимации и методов структурного анализа, позволяющих представить сложные системы в виде соединения более простых звеньев. В качестве примера рассмотрим структуру энергоблока, показанную на рис. 7.3.

Можно выделить два процесса: в котле и турбине. Для процесса в котле главными являются каналы передачи воздействий, связывающие расход топлива, питательной воды и воздуха на входе с давлением и температурой перегрева пара на выходе и в промежуточной точке пароводяного тракта. Для процесса в турбине главным служит воздействие по каналу *регулирующие клапаны* $n_{\kappa n}$ — *мощность* N , для энергоблока в целом — по каналу *тепловая нагрузка* (топливо, вода и воздух) — *мощность*. Известно также, что объект по всем рассмотренным каналам обладает свойством самовыравнивания и инерцией, которая характеризуется временем запаздывания τ или постоянной времени T или же τ и T одновременно.

В качестве конкретных примеров моделей динамики ниже приводятся передаточные функции отдельных процессов энергоблока мощностью 800 МВт при установившихся значениях расхода топлива и воды, полученные в результате аппроксимации экспериментальных усредненных кривых переходного процесса кривыми звена чистого запаздывания и апериодического звена первого порядка:

для котла (канал *топливо* B_m — *температура пара* за потолочным экраном в промежуточной точке тракта)

$$W(s) = \frac{k_1 e^{-20s}}{1 + 120s}; \quad (7.6 а)$$

для турбогенератора (канал *давление* — *мощность*)

$$W(s) = \frac{k_1 \cdot 150s e^{-2,5s}}{1 + 150s}; \quad (7.6 б)$$

где $k_1 = 2,5 \text{ МВт} \cdot \text{см/кгс}$;

для энергоблока в целом (канал *тепловая нагрузка* D_q — одновременно и согласованное изменение расходов топлива, воды и воздуха — *мощность*)

$$W(s) = \frac{k_2 e^{-17s}}{1 + 110s}, \quad (7.6 в)$$

где $k_2 = -4,5 \text{ МВт} \cdot \text{ч/т}$.

Передаточные функции (7.6а) – (7.6в) получены при фиксированной нагрузке, равной 800 МВт. Для математического описания динамики технологического процесса ТЭС в широком диапазоне изменения нагрузок передаточные функции (7.6) должны быть определены для каждой из установившихся нагрузок. В конечном итоге уравнения (7.6) дополняют

семейством графиков и таблиц, учитывающих изменчивость параметров моделей динамики в зависимости от нагрузки объекта.

Например, модель динамики (7.6а) может быть дополнена таблицей значений k , x и T в широком диапазоне изменения электрических нагрузок энергоблока:

N , МВт	k , °C/%	τ , с	T , с
400	6,4	45	290
600	1,75	25	126
800	1,46	20	120

В случае необходимости простые модели вида (7.5) и (7.6) могут быть развернуты в более сложные за счет большей детализации математического описания процессов в котле и турбине по дополнительным экспериментальным или расчетным данным.

Тема 8. Анализ технологического процесса как объекта управления

Формулировка любой задачи управления должна определять конечную цель, характеристики объекта и возможные способы управления, обеспечивающие достижение поставленной цели. *Общая задача управления ТОО формулируется обычно как задача максимизации (минимизации) некоторого критерия (себестоимости, энергетических затрат, прибыли) при выполнении ограничений на технологические параметры, накладываемые регламентом.* Способы управления определяются потоки энергии и вещества с помощью специальных регулирующих органов. Для того чтобы решить ту или иную задачу управления, она должна быть формализована, т.е. с достаточной точностью описана математическими зависимостями.

При формализации ОУ ставится в соответствие его математическая модель - совокупность математических зависимостей, отражающих те особенности объекта, которые существенны для данного процесса управления им. Модель объекта управления, таким образом, видоизменяется в зависимости от задачи или цели управления и, следовательно, *одному объекту соответствует целая совокупность моделей, отражающая разнообразные стороны его функционирования.*

Например, при управлении агрегатом для решения *задач автоматической стабилизации* его режима используется *модель динамики*, а для *задач оптимизации* обычно достаточно иметь его *статические модели*. Можно считать, что каждая из моделей выделяется из некоторой сложной единой математической модели объекта и все частные модели в той или иной степени связаны друг с другом. Однако во всех случаях, когда такой взаимосвязью можно пренебречь или влияние частных моделей друг на друга можно учесть отдельно каким-либо способом, переход к таким более простым моделям существенно упрощает и облегчает решение конкретной задачи управления.

Разбиение, таким образом, общей задачи на более простые частные является одной из форм *декомпозиции* задачи.

Решая задачу управления технологическим процессом, его 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 обычно направлены на оптимизацию технологического параметра или критерия, легко вычисляемого по измеренным режимным параметрам (производительность, концентрацию продукта, степень превращения, расход энергии). Оптимизацию критерия проводят в рамках ограничений, задаваемых технологическим регламентом. На основании задачи управления отдельными стадиями процесса формулируют задачи автоматического регулирования технологических параметров для отдельных аппаратов.

Напомним, что с позиций теории управления задача автоматического регулирования представляет

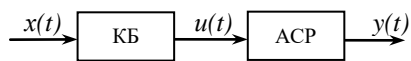


Рис. 8.1

вырожденную задачу управления. В АСУ ТП подавляющее большинство базовых подсистем решают задачу регулирования. Задача подсистемы регулирования: $\varepsilon(t) \rightarrow 0$.

Важным этапом в разработке систем автоматизации является анализ основных аппаратов как объектов регулирования. ТОУ характеризуется тем, что в нем происходит взаимодействие материальных, и энергетических потоков, поэтому при реальном функционировании такого ОУ, можно выделить определенные группы переменных, характеризующих СУ независимо от физической природы этой переменной:

Структурная схема объекта регулирования представлена на следующем рисунке.

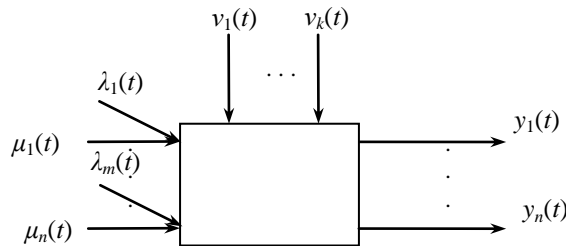


Рис. 8.2

Любой технологический процесс как объект регулирования определяется следующими основными группами переменных.

1. *Переменные, характеризующие состояние процесса.* Их необходимо поддерживать на определенном заданном уровне или изменять по определенному закону в соответствии с технологическим регламентом. Вектор управляемых величин измеряется непосредственно, либо с помощью модели по другим непосредственно измеряемым переменным. Таким образом, состояния любого ТОУ можно характеризовать вектором управляемых величин $\mathbf{Y}(t)$ размерностью \mathbf{n} . При построении замкнутых систем регулирования в качестве управляемых координат выбирают технологические параметры, изменение которых свидетельствует о нарушении материального или теплового баланса. (Уровень жидкости – показатель баланса по жидкой фазе; давление – показатель баланса по газовой фазе; температура – показатель теплового баланса; концентрация – показатель материального баланса по компоненте.)

2. *Переменные, изменением которых СУ может воздействовать на ОУ с целью управления* – вектор управляющих (регулирующих) воздействий $\square \square t \square$ с размерностью $\mathbf{m} \leq \mathbf{n}$. Управляющие воздействия – организованные воздействия, реализуются с помощью регулирующих органов. Возможные регулирующие воздействия это изменение материальных или тепловых потоков.

3. *Переменные, изменения которых не связаны с воздействием системы регулирования.* Эти изменения отражают влияние на регулируемый объект внешних условий, изменения характеристик самого объекта и т.п. Их называют возмущающими воздействиями. Возмущающие воздействия можно разделить на две группы – одну можно измерить, а другую – нельзя. Измеримые возмущения позволяют ввести в систему управления дополнительную информацию для повышения качества ее работы.

По характеру и особенностям влияния на поведение объекта, возмущающие воздействия делят на два вида: внутренние и внешние. *Внутренние возмущения* – возмущения, которые совпадают с каналом управляющего воздействия (колебания давления в паровой магистрали и т.п.). *Внешние возмущения* – изменение внешних условий функционирования системы, например, колебания нагрузки технологического агрегата.

Математическая модель системы или объекта управления может быть записана в виде уравнения

$$F(y, \mu, \nu) = 0,$$

где F – некоторый векторный оператор.

Действие возмущений на объект управления может быть *аддитивным*, если модель представить в виде двух составляющих

$$F(y, \mu, \nu) = F_1(y, \mu) + F_2(y, \nu) = 0.$$

Воздействие относится к *мультипликативному*, если модель

$$F(y, \mu, \nu) = F_\nu(y, \mu) = 0.$$

Формально любое *мультипликативное возмущение можно свести к эквивалентному аддитивному*.

Для обычной базовой системы регулирования с одной регулируемой величиной (одноконтурная АСР), объект управления можно представить следующей структурой Рис. 8.3.

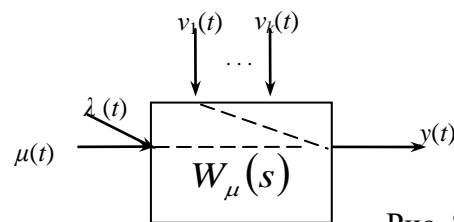


Рис. 8.3

Так как возмущения относятся к классу аддитивных воздействий, то схему объекта управления можно представить в виде, где все возмущения заменяются некоторым эквивалентным (при соблюдении принципа суперпозиции).

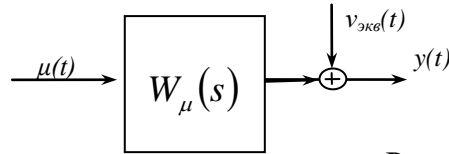


Рис. 8.4

$$W_{\mu}(s) = \frac{y(s)}{\mu(s)}$$

$$W_{v_1}(s) = \frac{y(s)}{v_1(s)}, \dots, W_{v_k}(s) = \frac{y(s)}{v_k(s)}$$

$$v_{\text{экр}}(s) = \sum_{i=1}^k W_{v_i}(s) \cdot v_i(s)$$

Анализ ТП, как объекта АСР, предполагает оценку статических и динамических свойств по каждому из каналов от любого возможного управляющего воздействия к любому возможному управляемому (регулируемому) параметру, а также оценку аналогичных характеристик по каналам связи управляемых переменных с составляющими вектора возмущений.

В ходе такого анализа выбирается структура САР, т. е. решается задача выявления конкретных регулирующих воздействий относительно конкретных регулируемых величин, поэтому выделяются контуры регулирования для каждой регулируемой величины, т. е. определяется некоторая совокупность одноконтурных АСР. Эта задача является достаточно сложной при разработке систем автоматизации технологических установок, не имеющих прототипа.

Тема 9. Системные методы улучшения качества регулирования ТОУ

Соответствие обычной системы регулирования требованиям производства можно определить, рассматривая *показатель технологической работоспособности*.

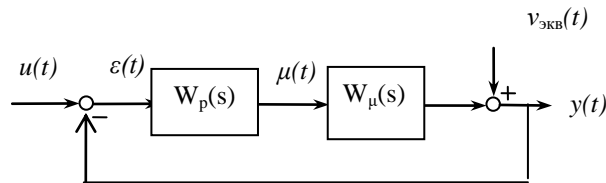


Рис. 9.1

Показатель технологической работоспособности относительно

$$\frac{\sigma_{\text{эKB}}}{\sigma_{\varepsilon}} \leq \left(\frac{\sigma_{\text{эKB}}}{\sigma_{\varepsilon}} \right)_{\text{доп.}}$$

Практический путь повышения качества работы системы – совершенствование информационной структуры:

1. В регулятор, например, вводится дополнительная информация об изменениях некоторых специально подобранных переменных, более оперативно, чем управляемая величина

2. В регулятор вводятся добавочно сигналы, непосредственно отражающие изменение возмущающих воздействий (системы с компенсацией возмущений).

В практике автоматизации технологических процессов наибольшее распространение получили следующие виды систем с дополнительными информационными каналами: каскадные, комбинированные и взаимосвязанные (многомерные).

Каскадные системы регулирования

Каскадные системы – системы, построенные по иерархическому признаку, и представляют особый вид 2-х (много) уровневых систем. Характерная особенность: только на нижнем уровне управляющее воздействие реализуется с помощью изменения потока энергии, вещества и т. д.

Структурная схема каскадной системы со стабилизирующим регулятором.

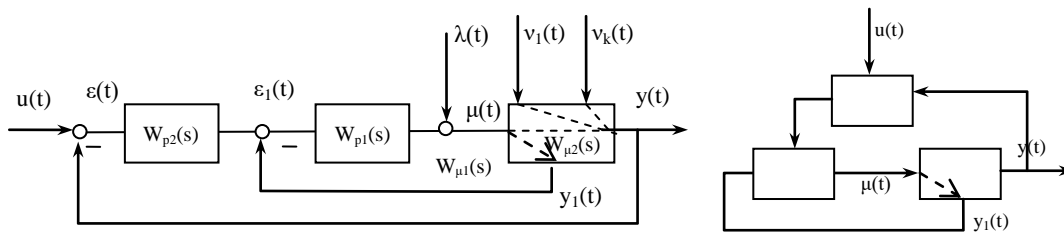


Рисунок 9.2

Здесь P1 – стабилизирующий регулятор (вспомогательный, подчиненный), а P2 – корректирующий регулятор (основной, командный).

Эффективность применения схемы. На управляемый объект действуют сильные возмущения со стороны регулирующего органа (внутренние возмущения). Есть некоторые промежуточные переменные, которые характеризуются значительно меньшей величиной транспортного и инерционного запаздывания по отношению к возмущению, чем основная управляемая величина.

Функция виртуального эквивалентного объекта имеет вид

$$W_{\text{экв}}(s) = \frac{W_{p1}(s)W_{\mu}(s)}{1 + W_{p1}(s)W_{\mu}(s)}.$$

Системы регулирования с дифференциатором

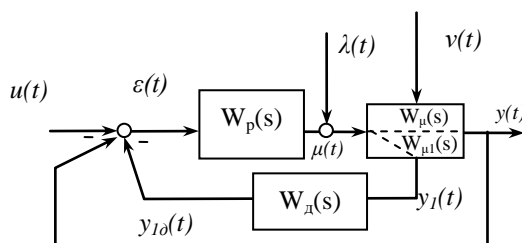


Рисунок 9.3

Подача на вход регулятора дополнительного импульса из промежуточной точки аппарата дает опережающий сигнал, и регулятор включается в работу прежде, чем выходная координата отклонится от заданного задания.

В рассматриваемой схеме с дополнительным информационным каналом необходимость установки дифференциатора определяется требованием обеспечения астатизма по основной управляемой величине в установившемся режиме

$$\varepsilon(t) = u(t) - y(t) - y_{1д}(t).$$

В установившемся состоянии сигнал по вспомогательной величине должен исчезнуть $y_{1д}(t) = 0$ и $\varepsilon(t) = 0$, если $u(t) = y(t)$. С этой целью вспомогательную координату пропускают через дифференциатор.

Обычно в качестве дифференциатора применяют реальное дифференцирующее звено

$$W_d(s) = k_d \frac{T_d s}{T_d s + 1}.$$

Расчетную схему с дифференциатором можно преобразовать к следующему виду,

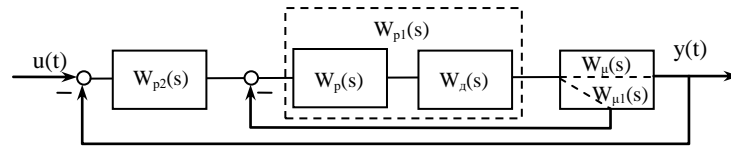


Рисунок 9.4

где

$$W_{p2}(s) = \frac{1}{W_d(s)} = \frac{1}{k_d} \frac{T_d s + 1}{T_d s} \Rightarrow \frac{1}{k_d} = k_{p2}, T_d = T_{u2},$$

а

$$W_{p1}(s) = W_p(s) \cdot W_d(s).$$

Пример. Расчет настройки дифференциатора производится следующим образом. Структурную исходную схему преобразуем к виду на рисунок 9.5.

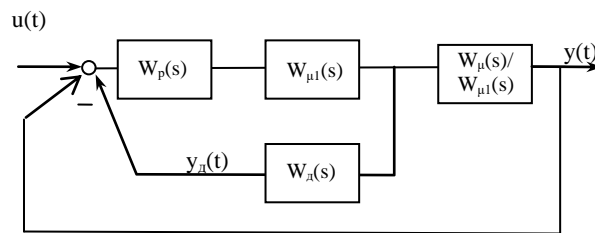


Рисунок 9.5

Здесь

$$W_{ин}(s) = \frac{W_{\mu}(s)}{W_{\mu1}(s)}$$

- инерционная составляющая.

Пусть $W_{ин}(s) = \frac{k_{ин}}{T_{ин}s + 1}$, тогда для основного регулятора передаточная функция объекта управления принимает следующий вид:

$$W_{\mu1}(s) \cdot [W_d(s) + W_{ин}(s)] = W_{\mu1}(s) \left[\underbrace{\frac{k_d T_d s}{T_d s + 1}}_{=1} + \frac{k_{ин}}{T_{ин}s + 1} \right].$$

$$k_o = k_{ин}$$

Если обеспечить равенства $T_o = T_{ин}$, то для основного регулятора свойства объекта определяются следующей передаточной функцией $k_{ин} \{W_{\mu 1}(s)\}$ и параметры его настройки определяются без учета инерционной части.

Следует отметить, что расчеты многоконтурных систем представляют итерационную процедуру, так как настройки основного и вспомогательных регуляторов взаимозависимы.

Системы регулирования с компенсацией возмущений

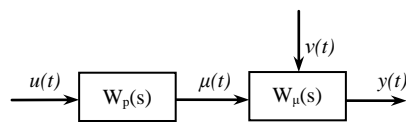


Рисунок 9.6

Если решать задачу ковариантности ($y(t) = u(t)$ при любом входном воздействии), то для данной схемы передаточная функция регулятора

$$W_p(s)W_{\mu}(s) = 1 \quad \text{и} \quad W_p(s) = \frac{1}{W_{\mu}(s)}.$$

Если существует возможность измерить возмущения, то эту информацию вводят в регулятор. Информационная структура системы управления представлена на рис. 9.7 и рис. 9.8: информационный сигнал подается либо на управляющий вход ТОУ, либо на вход управляющего устройства. При этом информация надлежащим образом преобразуется в блоке компенсации возмущений.

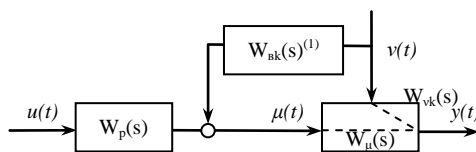


Рисунок 9.7

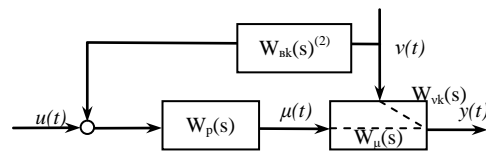


Рисунок 9.8

Для первой схемы условие инвариантности записывается следующим образом

$$y(s) = [W_{vk}(s) - W_{ek}^{(1)}(s)W_{\mu}(s)]v_k(s) + W_p(s)W_{\mu}(s)u(s).$$

Чтобы система была инвариантна относительно внешнего возмущения, достаточно выбрать устройство ввода с передаточной функцией вида

$$W_{ek}^{(1)}(s) = \frac{W_{vk}(s)}{W_{\mu}(s)}, \quad \text{а для выполнения условий ковариантности относительно}$$

$$\text{задания необходимо} \quad W_p(s) = \frac{1}{W_{\mu}(s)}.$$

Для второй схемы:

$$y(s) = \left[\underbrace{W_{vk}(s) - W_{ek}^{(2)}(s)W_{\mu}(s)W_p(s)}_{=0} \right] v_k(s) + \underbrace{W_p(s)W_{\mu}(s)}_{=1} u(s)$$

$$W_{ek}^{(2)}(s) = \frac{W_{vk}(s)}{W_p(s)W_{\mu}(s)}, \text{ если } W_p(s) = \frac{1}{W_{\mu}(s)}, \text{ тогда } W_{ek}^{(2)}(s) = W_{vk}(s).$$

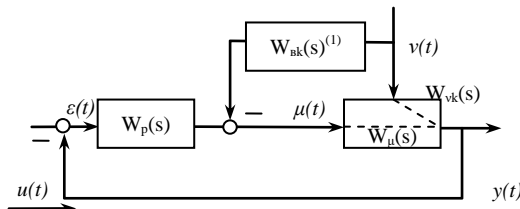
При таком выборе структуры компенсирующего и основного регуляторов в системе выполняются условия абсолютной инвариантности и ковариантности.

Для выполнения полученных условий необходимо решить две проблемы. Проблему измерения внешнего возмущения, которую не всегда удастся выполнить в реальных условиях, и реализацию блока компенсации (как физическая, так и техническая).

$$\text{Допустим } W_{\mu}(s) = \frac{k_{\mu}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-\tau}, \text{ тогда } W_p(s) = \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{k_{\mu}} e^{\tau}.$$

Данное устройство ни аппаратно, ни программно не реализуется.

Все возмущения, действующие на объект, как правило, невозможно измерить, поэтому в практических схемах автоматизации широко используется комбинированный принцип управления (feed forward control). Измеримые возмущения компенсируются регулятором возмущений (компенсатором), а неизмеримые обрабатываются основным регулятором.



Рисунк 9.9а

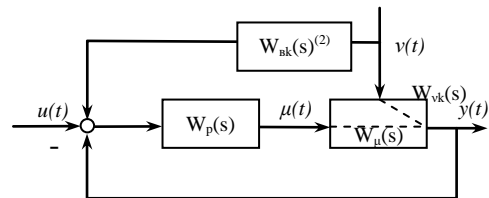


Рисунок 9.9б

Для первой схемы (рис. 9.9а) изображение по Лапласу выходной величины

$$y(s) = \frac{W_p(s)W_{\mu}(s)}{1 + W_p(s)W_{\mu}(s)} u(s) + \frac{\overbrace{W_{vk}(s) - W_{ek}^{(1)}(s)W_{\mu}(s)}^{=0}}{1 + W_p(s)W_{\mu}(s)} v_k(s)$$

Для инвариантности относительно измеримого возмущения, необходимо

$$W_{ek}^{(1)}(s) = \frac{W_{vk}(s)}{W_{\mu}(s)}$$

выполнение условия. Такая схема преобразования сигнала в компенсаторе не всегда может быть технически и физически реализована.

Для второй схемы (рис. 9.9б) изображение выходной величины

$$y(s) = \frac{W_p(s)W_{\mu}(s)}{1 + W_p(s)W_{\mu}(s)} u(s) + \frac{\overbrace{W_{vk}(s) - W_{ek}^{(1)}(s)W_p(s)W_{\mu}(s)}^{=0}}{1 + W_p(s)W_{\mu}(s)} v_k(s),$$

$$W_{ek}^{(2)}(s) = \frac{W_{vk}(s)}{W_{\mu}(s)W_p(s)}.$$

а

В комбинированной системе качество можно улучшить еще и соответствующим выбором структуры и параметров компенсирующего устройства.

Расчет системы с компенсацией возмущений, так же как и расчет обычной одноконтурной системы состоит из 2-х этапов:

1) в плоскости параметров настройки системы находится область, где система будет иметь необходимый запас устойчивости (не ниже допустимой величины),

2) в этой области параметров находится точка, соответствующая оптимальной настройке системы, при которой точность работы системы будет наибольшей.

Оптимальной настройке системы будет соответствовать такая ее настройка, при которой частотные характеристики фильтров по каналам возмущений менее всего отклоняются от нуля в существенном для данной системы диапазоне частот. Исходная схема может быть приведена к расчетной следующим образом.

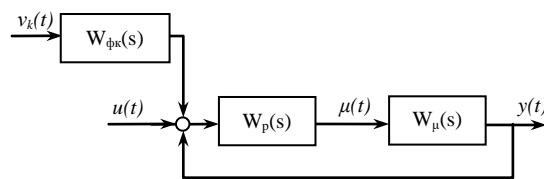


Рисунок 9.10

Здесь $W_{Фк}(s)$ – передаточная функция эквивалентного фильтра первой системы на рис. 9.9а

$$W_{Фк}(s) = \frac{W_{vk}(s)}{W_p(s) \cdot W_{\mu}(s)} - \frac{W_{ek}(s)}{W_p(s)}.$$

При выполнении условий абсолютной инвариантности комплексный коэффициент передачи фильтра по k – му возмущению $W_{Фк}(j\omega) \equiv 0$, $0 \leq \omega \leq \infty$.

Т. к. такое условие практически реализовано быть не может, то максимальную фильтрующую способность системы, путем ввода компенсационного регулятора, решают приближенным образом на 2-х частотах $\omega_0 = 0$ (характеризует статизм системы) и $\omega = \omega_{рез}$. Если основной регулятор содержит интегральную составляющую, то на $\omega = 0$ условие максимальной фильтрующей способности выполняется в большинстве случаев, если компенсирующий блок имеет структуру дифференциатора. Компенсация на $\omega_{рез}$ необходима для уменьшения отклонения в системе на $\omega_{рез}$, где коэффициент

передачи замкнутой системы имеет максимальное значение (гипотеза о эквивалентности колебательному звену).

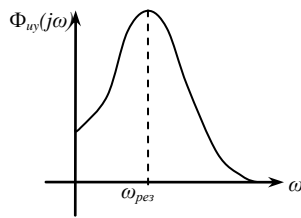


Рисунок 9.11

Системы с компенсацией возмущений широко применяются в энергетике. Например, при решении задачи стабилизации уровня в барабанах котла. Если основной регулятор – статический и система работает с остаточной неравномерностью, то в качестве устройства ввода выбираются интегро-дифференцирующее звено

$$W_{\text{ск}}(s) = k_{\text{с}} \frac{T_{\text{в}} s + 1}{T s + 1}$$

– астатический, то в качестве устройства ввода выбирается реальное

$$W_{\text{ск}}(s) = k_{\text{с}} \frac{T_{\text{в}} s}{T s + 1}$$

дифференцирующее звено. Вопросы расчета комбинированных систем изложены достаточно подробно у Ротача В.Я. [10]

Системы регулирования с компенсацией возмущений

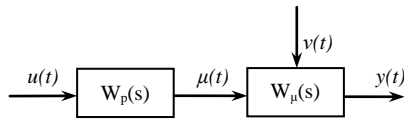


Рис. 3.52

Если решать задачу ковариантности ($y(t) = u(t)$ при любом входном воздействии), то для данной схемы передаточная функция регулятора

$$W_p(s)W_\mu(s) = 1 \quad \text{и} \quad W_p(s) = \frac{1}{W_\mu(s)}.$$

Если существует возможность измерить возмущения, то эту информацию вводят в регулятор. Информационная структура системы управления представлена на рис. 3.53 и рис. 3.54: информационный сигнал подается либо на управляющий вход ТОУ, либо на вход управляющего устройства. При этом информация надлежащим образом преобразуется в блоке компенсации возмущений.

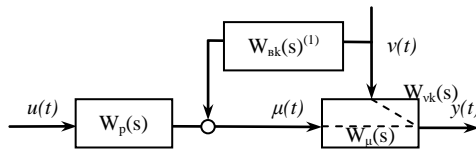


Рис. 3.53

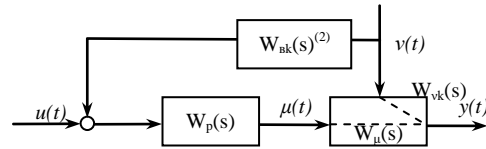


Рис. 3.54

Для первой схемы условие инвариантности записывается следующим образом

$$y(s) = [W_{vk}(s) - W_{ek}^{(1)}(s)W_\mu(s)]v_k(s) + W_p(s)W_\mu(s)u(s).$$

Чтобы система была инвариантна относительно внешнего возмущения, достаточно выбрать устройство ввода с передаточной функцией вида

$$W_{ek}^{(1)}(s) = \frac{W_{vk}(s)}{W_\mu(s)}, \quad \text{а для выполнения условий ковариантности относительно}$$

$$W_p(s) = \frac{1}{W_\mu(s)}.$$

задания необходимо

Для второй схемы:

$$y(s) = \left[\underbrace{W_{vk}(s) - W_{ek}^{(2)}(s)W_\mu(s)W_p(s)}_{=0} \right] v_k(s) + \underbrace{W_p(s)W_\mu(s)}_{=1} u(s),$$

$$W_{ek}^{(2)}(s) = \frac{W_{vk}(s)}{W_p(s)W_\mu(s)}, \quad \text{если} \quad W_p(s) = \frac{1}{W_\mu(s)}, \quad \text{тогда} \quad W_{ek}^{(2)}(s) = W_{vk}(s).$$

При таком выборе структуры компенсирующего и основного регуляторов в системе выполняются условия абсолютной инвариантности и ковариантности.

Для выполнения полученных условий необходимо решить две проблемы. Проблему измерения внешнего возмущения, которую не всегда удастся выполнить в реальных условиях, и реализацию блока компенсации (как физическая, так и техническая).

$$W_{\mu}(s) = \frac{k_{\mu}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-\tau_s}, \quad W_p(s) = \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{k_{\mu}} e^{\tau_s}.$$

Допустим

, тогда

Данное устройство ни аппаратно, ни программно не реализуется.

Все возмущения, действующие на объект, как правило, невозможно измерить, поэтому в практических схемах автоматизации широко используется комбинированный принцип управления (feed forward control). Измеримые возмущения компенсируются регулятором возмущений (компенсатором), а неизмеримые обрабатываются основным регулятором.

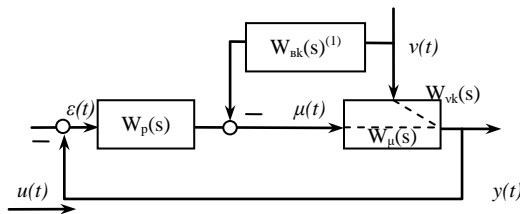


Рис. 3.55а

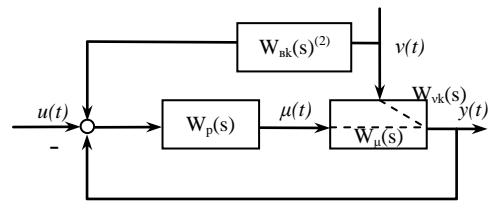


Рис. 3.55б

Для первой схемы (рис. 3.55а) изображение по Лапласу выходной величины

$$y(s) = \frac{W_p(s)W_{\mu}(s)}{1 + W_p(s)W_{\mu}(s)} u(s) + \frac{\overbrace{W_{vk}(s) - W_{ek}^{(1)}(s)W_{\mu}(s)}^{=0}}{1 + W_p(s)W_{\mu}(s)} v_k(s).$$

Для инвариантности относительно измеримого возмущения, необходимо

$$W_{ek}^{(1)}(s) = \frac{W_{vk}(s)}{W_{\mu}(s)}.$$

выполнение условия

. Такая схема преобразования сигнала в компенсаторе не всегда может быть технически и физически реализована.

Для второй схемы (рис. 3.55б) изображение выходной величины

$$y(s) = \frac{W_p(s)W_{\mu}(s)}{1 + W_p(s)W_{\mu}(s)} u(s) + \frac{\overbrace{W_{vk}(s) - W_{ek}^{(1)}(s)W_p(s)W_{\mu}(s)}^{=0}}{1 + W_p(s)W_{\mu}(s)} v_k(s),$$

$$W_{ek}^{(2)}(s) = \frac{W_{vk}(s)}{W_{\mu}(s)W_p(s)}.$$

а

В комбинированной системе качество можно улучшить еще и соответствующим выбором структуры и параметров компенсирующего устройства.

Расчет системы с компенсацией возмущений, так же как и расчет обычной одноконтурной системы состоит из 2-х этапов:

1) в плоскости параметров настройки системы находится область, где система будет иметь необходимый запас устойчивости (не ниже допустимой величины),

2) в этой области параметров находится точка, соответствующая оптимальной настройке системы, при которой точность работы системы будет наибольшей.

Оптимальной настройке системы будет соответствовать такая ее настройка, при которой частотные характеристики фильтров по каналам возмущений менее всего отклоняются от нуля в существенном для данной системы диапазоне частот. Исходная схема может быть приведена к расчетной следующим образом.

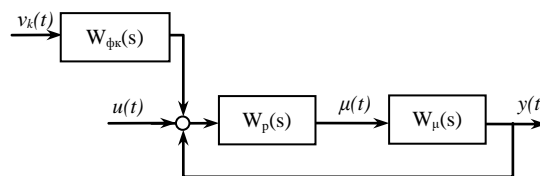


Рис. 3.56

Здесь $W_{\Phi k}(s)$ – передаточная функция эквивалентного фильтра первой системы на рис. 3.55а

$$W_{\Phi k}(s) = \frac{W_{vk}(s)}{W_p(s) \cdot W_\mu(s)} - \frac{W_{ek}(s)}{W_p(s)}.$$

При выполнении условий абсолютной инвариантности комплексный коэффициент передачи фильтра по k – му возмущению $W_{\Phi k}(j\omega) \equiv 0$, $0 \leq \omega \leq \infty$.

Т. к. такое условие практически реализовано быть не может, то максимальную фильтрующую способность системы, путем ввода компенсационного регулятора, решают приближенным образом на 2-х частотах $\omega_0 = 0$ (характеризует статизм системы) и $\omega = \omega_{рез}$. Если основной регулятор содержит интегральную составляющую, то на $\omega = 0$ условие максимальной фильтрующей способности выполняется в большинстве случаев, если компенсирующий блок имеет структуру дифференциатора. Компенсация на $\omega_{рез}$ необходима для уменьшения отклонения в системе на $\omega_{рез}$, где коэффициент передачи замкнутой системы имеет максимальное значение (гипотеза о эквивалентности колебательному звену).

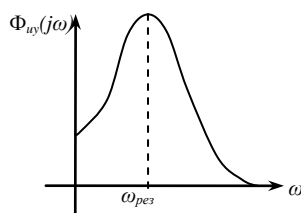


Рис. 3.57

Системы с компенсацией возмущений широко применяются в энергетике. Например,

при решении задачи стабилизации уровня в барабанах котла. Если основной регулятор – статический и система работает с остаточной неравномерностью, то в качестве устройства ввода выбираются интегро-дифференцирующее звено

$$W_{\epsilon k}(s) = k_{\epsilon} \frac{T_{\text{в}} s + 1}{Ts + 1}.$$

Если основной регулятор – астатический, то в качестве устройства ввода выбирается реальное дифференцирующее звено

$$W_{\epsilon k}(s) = k_{\epsilon} \frac{T_{\text{в}} s}{T_{\text{в}} s + 1}.$$

Вопросы расчета комбинированных систем изложены достаточно подробно у Ротача В.Я.

Тема 10. Взаимосвязанные системы регулирования

Объекты управления с несколькими входными и выходными величинами, взаимно связанными между собой, называют многосвязными.

Динамика многосвязных объектов определяется системой дифференциальных уравнений, а в преобразованном по Лапласу виде - матрицей передаточных функций.

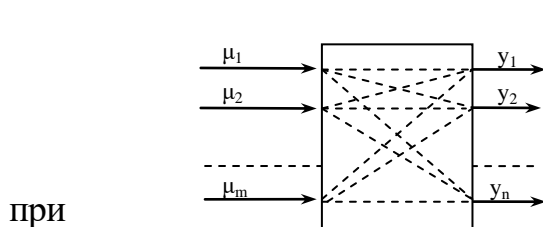


Рис. 10.1

Связи между отдельными переменными определяются в виде некоторой передаточной функции,

$$W_{ij}(s) = \frac{y_i(s)}{\mu_j(s)}.$$

этом

Свойства такого объекта определяются матричной передаточной функцией, которая

может быть записана следующим образом

$$W(s) = \begin{pmatrix} W_{11}(s) & W_{12}(s) & \dots & W_{1m}(s) \\ W_{21}(s) & W_{22}(s) & \dots & W_{2m}(s) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{n1}(s) & W_{n2}(s) & \dots & W_{nm}(s) \end{pmatrix}$$

Если $n = m$, то матрица становится квадратной.

Для односвязных объектов матричная передаточная функция принимает вид

$$W(s) = \begin{pmatrix} W_{11}(s) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_{22}(s) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & W_{nn}(s) \end{pmatrix}$$

или

$$W(s) = \begin{pmatrix} W_{11}(s) & 0 & 0 & 0 \\ W_{21}(s) & W_{22}(s) & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ W_{m1}(s) & \dots & \dots & W_{mm}(s) \end{pmatrix}.$$

Два подхода к автоматизации многосвязных объектов:

1. Несвязанное регулирование отдельных координат с помощью одноконтурных АСР.

2. Связанное регулирование с применением многоконтурных систем, в которых внутренние перекрестные связи объекта компенсируются внешними динамическими связями между отдельными контурами регулирования (используется принцип автономности). Каждый из этих методов обладает своими преимуществами и недостатками.

Системы несвязного регулирования

Структурная схема представлена на рисунке.

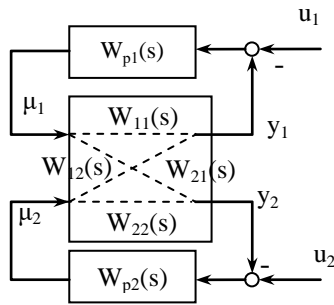


Рис. 10.2

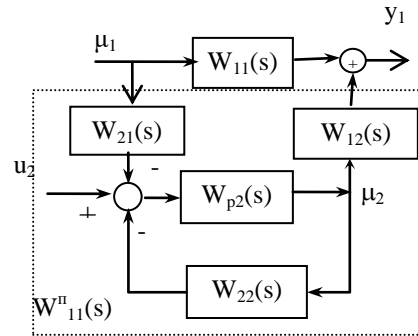


Рис. 10.3

Передаточная функция эквивалентного объекта $W_{\mu 1}^{\text{экв}}(s)$ в одноконтурной АСР для регулятора P1 $W_{p1}(s)$.

$$W_{\mu 1}^{\text{экв}}(s) = W_{11}(s) - W_{11}^{\text{II}}(s) = W_{11}(s) - \frac{W_{21}(s) \cdot W_{12}(s) \cdot W_{p2}(s)}{1 + W_{22}(s) \cdot W_{p2}(s)}$$

Система будет работоспособна в том случае, если рабочие частоты двух контуров регулирования ω_{p1} и ω_{p2} существенно различны (например, $\omega_{p1} \gg \omega_{p2}$).

$$|W_{11}(j\omega_{p1})| \gg |W_{11}^{\text{II}}(j\omega_{p1})|$$

В этом случае поправкой можно пренебречь.

Наибольшую опасность представляет случай, когда инерционность прямых и перекрестных каналов приблизительно одинакова.

Пусть, например, $W_{11}(s) = W_{12}(s) = W_{21}(s) = W_{22}(s) = W(s)$, тогда для эквивалентного объекта получаем передаточную функцию

$$W_{\mu}^{\text{экв}}(s) = \frac{W(s)}{1 + W(s) \cdot W_{p2}(s)}$$

Допустим, что используется П-регулятор. В обычной одноконтурной системе с П-регулятором, характеристическое уравнение $1 + k_p W(s) = 0$ и

$$k_p^{\text{крит}} = \left| -\frac{1}{W(s)} \right|$$

Для системы с взаимоперекрестными связями и П-регулятором

$$1 + k_p W_{\mu}^{\text{экв}}(s) = 0$$

$$1 + k_p \frac{W(s)}{1 + W(s) \cdot k_p} = 0,$$

$$1 + 2k_p W(s) = 0$$

$$k_p^{krit} = \left| -\frac{1}{2W(s)} \right|.$$

Критическое значение коэффициента передачи пропорционального регулятора для системы с взаимосвязанными переменными вдвое меньше, чем в одноконтурной АСР.

Для оценки взаимного влияния работы контуров применяют комплексный коэффициент связности (ККС). Комплексный коэффициент связности в системе с 2-мя входами и выходами представляет следующее отношение

$$k_{cs}(j\omega) = \frac{W_{21}(j\omega) \cdot W_{12}(j\omega)}{W_{11}(j\omega) \cdot W_{22}(j\omega)}.$$

Если все каналы обладают свойством самовыравнивания, то на нулевой частоте значение ККС определяется отношением произведений коэффициентов усиления по перекрестным и основным каналам

$$k_{cs}(j0) = \frac{k_{21} \cdot k_{12}}{k_{11} \cdot k_{22}}.$$

Если на этих частотах ККС равен 0, то объект управления можно рассматривать как односвязный. Если $0 < k_{cs} < 1$, то расчет одноконтурных АСР необходимо вести по передаточным функциям эквивалентных объектов. Если $k_{cs} > 1$, то неправильно выбраны каналы управляющих воздействий. Интенсивность влияния перекрестных связей оказалась выше интенсивности управляющих воздействий.

Системы связанного регулирования (автономные АСР)

В системах связанного регулирования применяются дополнительные информационные каналы, благодаря которым внутренние перекрестные связи компенсируются внешними устройствами. *Основой построения систем связанного регулирования является принцип автономности.*

Путем введения дополнительных внешних связей между РО и соответствующей настройкой этих связей добиваются, чтобы регулирующее воздействие каждого регулятора оказывало влияние только на свою регулирующую величину и практически не влияло на остальные величины».

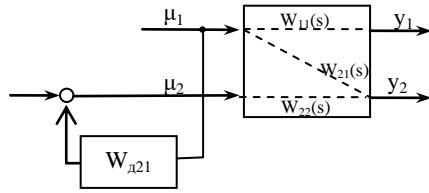


Рис. 10.4

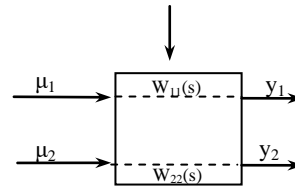


Рис. 10.5

$$y_1(s) = W_{11}(s) \cdot \mu_1(s)$$

$$y_2(s) = W_{21}(s) \cdot \mu_1(s) + W_{22}(s) \cdot \mu_2(s)$$

Введем внешнее корректирующее устройство \Rightarrow

$$y_2(s) = W_{21}(s) \cdot \mu_1(s) - W_{x21}(s)W_{22}(s) \cdot \mu_1(s) + W_{22}(s) \cdot \mu'_2(s)$$

Если выполняется равенство $W_{21}(s) - W_{x21}(s)W_{22}(s) = 0$

и $W_{x21}(s) = \frac{W_{21}(s)}{W_{22}(s)}$, то $y_2(s) = W_{22}(s) \cdot \mu'_2(s)$, а регулируемый объект можно формально рассматривать как состоящий из двух совершенно независимых регулирующих участков с регулируемыми воздействиями μ_1 и μ'_2 . (рис. 10.5)

Полученное условие эквивалентно условию абсолютной инвариантности. Расчет системы проводим по аналогии с расчетом инвариантной системы:

1) определяются настроечные параметры 1-го и 2-го регулятора, обеспечивающие заданный запас устойчивости и, например, условие min или max; в результате находятся $\omega_{рез}$ контуров регулирования;

2) определяются параметры дополнительной корректирующей связи

$$W_{x21}(j\omega) = \frac{W_{21}(j\omega)}{W_{22}(j\omega)}.$$

Т. к. во всем диапазоне частот выполнение равенства не удастся, то решается задача только $\omega_0 = 0$ и $\omega = \omega_{рез}$ (2-го контура).

$$W_{x21}(j0) = \frac{W_{21}(j0)}{W_{22}(j0)}$$

$$W_{x21}(j\omega_{рез2}) = \frac{W_{21}(j\omega_{рез2})}{W_{22}(j\omega_{рез2})}$$

Для данного объекта ККС = 0, т. к. отсутствуют вторая перекрестная связь.

Конструктивно дополнительная корректирующая связь может быть реализована и другими способами: выход корректирующего устройства подается на вход регулятору

$$W_{д21}(s) = \frac{W_{21}(s)}{W_{22}(s) \cdot W_{p2}(s)}$$
 или на корректирующее устройство поступает сигнал по рассогласованию

$$W_{д21}(s) = \frac{W_{21}(s) \cdot W_{p1}(s)}{W_{22}(s) \cdot W_{p2}(s)}.$$

Объект управления с перекрестными связями

Структурная схема системы управления в этом случае имеет следующий вид:

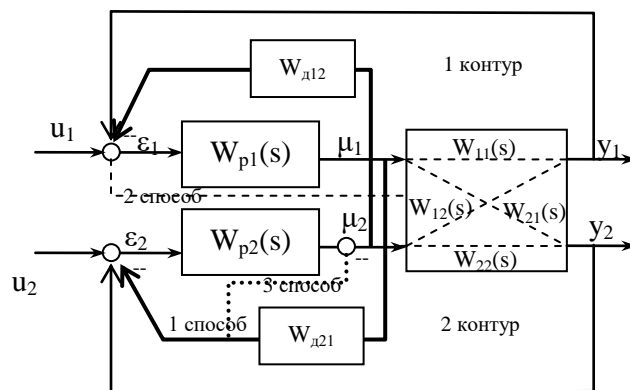


Рис. 10.6

Так как объект управления включает взаимно связанные регулируемые величины, то появляется $W_{12}(s)$, для компенсации влияния которой, вводим $W_{д12}(s)$.

Расчет системы и выбор динамических связей проводится аналогично предыдущему случаю:

1) определяются настроечные параметры 1-го и 2-го регулятора, обеспечивающие заданный запас устойчивости и условие \min_{\max} ; в результате находятся $\omega_{рез}$ контуров регулирования;

2) находятся параметры и настройки дополнительных корректирующих

связей

$$W_{д21}(s) = \frac{W_{21}(s)}{W_{22}(s) \cdot W_{p2}(s)} \quad \text{и} \quad W_{д12}(s) = \frac{W_{12}(s)}{W_{11}(s) \cdot W_{p1}(s)},$$
 обеспечивающих принцип автономности (инвариантности) на частотах $\omega_0 = 0$ и $\omega = \omega_{рез}$ (1 и 2 – го контуров).

Характерная особенность систем управления объектов со взаимосвязными регулируемыми величинами – появление дополнительных замкнутых на себя контуров преобразования сигнала. Система будет неустойчива, если хотя бы один из контуров будет неустойчивым. В рассматриваемом случае, появился контур с положительной обратной связью.

$$1 - W_{p2}(s)W_{д12}(s)W_{p1}(s)W_{д21}(s) = 0$$

При автоматизации сложных ТОУ приходится оценивать интенсивность взаимодействия подсистем. *Оценка интенсивности взаимодействия подсистем позволяет систематизировать процедуру синтеза многосвязных АТК.*

В результате анализа могут возникнуть следующие ситуации:

1). Для каждой управляемой выходной величины однозначно выбран управляющий параметр, матричная передаточная функция ТОУ диагональная либо квазидиагональная матрица. В этом случае задача автоматизации решается с помощью набора автономных одноконтурных систем. Выбор управляющих воздействий, как правило, производится на основе анализа функции чувствительности: $\partial y_i / \partial \mu_i = \max$. Необходимо учитывать динамические характеристики каналов передачи воздействия: инерционность каналов должна быть минимальной.

2). Матричная передаточная функция не сводится к квазидиагональной. Система автоматизации – многосвязная система управления. Анализ системы в статике возможен с применением метода Бристоля, а синтез – методом Вавилова - Имаева.

3). Для каждого выхода нельзя однозначно выбрать управляющий вход или количество переменных управления не совпадает с количеством выходов. Решение задачи автоматизации выполняют ситуационные системы управления, в основе построения которых лежат логические алгоритмы, в том числе алгоритмы искусственного интеллекта.

Тема 11 Регулирование основных технологических параметров

11.1. Регулирование расхода, соотношения расходов

В системах регулирования расхода применяют один из трех способов изменения расхода:

1. дросселирование потока вещества через регулирующий орган, устанавливаемый на трубопроводе (клапан, шибер, заслонка);
2. изменение напора в трубопроводе с помощью регулируемого источника энергии (например, изменением числа оборотов двигателя насоса или угла поворота лопастей вентилятора);
3. байпасирование, т.е. переброс избытка вещества из основного трубопровода в обводную линию.

Регулирование расхода после центробежного насоса осуществляется регулирующим клапаном, устанавливаемым на нагнетательном трубопроводе (рис. 11.1, а). При использовании поршневого насоса, применение подобной АСР недопустимо, так как при работе регулятора клапан может закрыться полностью, что приведет к разрыву трубопровода (или к помпажу, если клапан установлен на всасе насоса). В этом случае для регулирования расхода используют байпасирование потока (рис. 11.1, б).

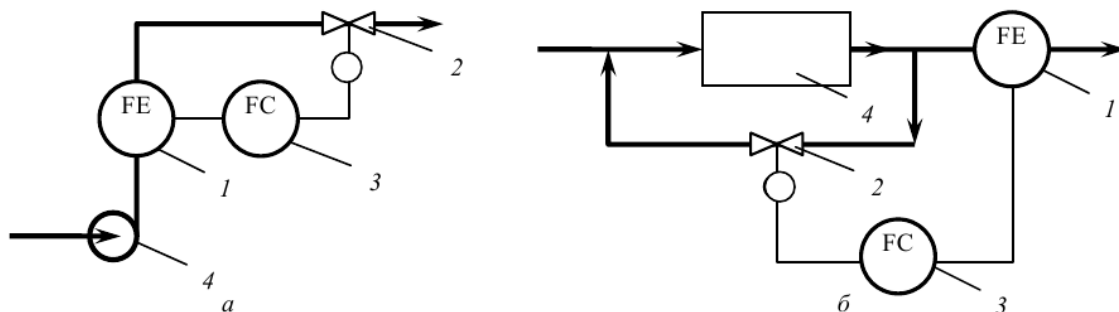


Рис. 11.1. Схемы регулирования расхода после центробежного (а) и поршневого (б) насосов.

1 – измеритель расхода; 2 – регулирующий клапан; 3 – регулятор; 4 – насос.

Регулирование расхода сыпучих веществ осуществляется изменением степени открытия регулирующей заслонки на выходе из бункера (рис 11.2, а), либо изменением скорости движения.

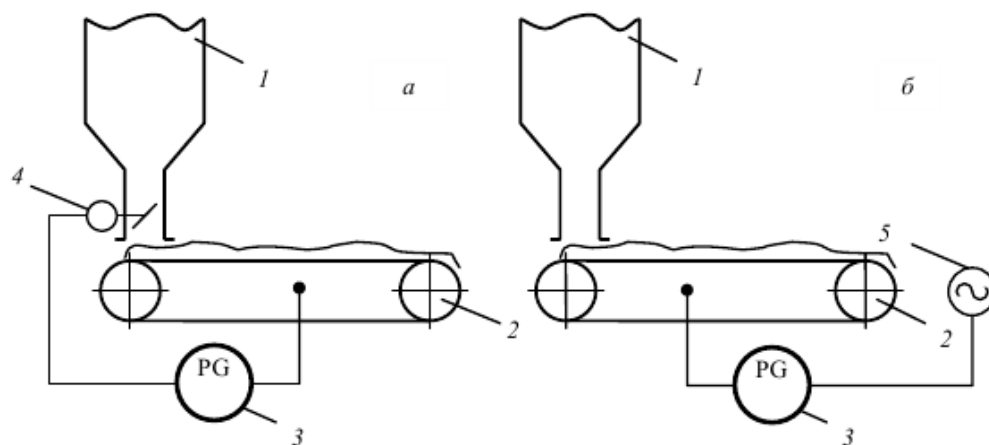


Рис. 11.2. Схемы регулирования расходов сыпучих веществ:
1 – бункер; 2 – транспортер; 3 – регулятор; 4 – регулирующая заслонка; 5 – электродвигатель

Регулирование соотношения расходов двух веществ можно осуществлять тремя способами:

1. При незаданной общей производительности расход одного вещества (рис. 11.3, а) G_1 , называемый «ведущим», может меняться произвольно; второе вещество подается при постоянном соотношении γ с первым, так что «ведомый» расход равен γG_1 . Иногда вместо регулятора соотношения используют реле соотношения и обычный регулятор для одной переменной (рис. 11.3, б). Выходной сигнал реле б, устанавливающего заданный коэффициент соотношения γ , подается в виде задания регулятору 5, обеспечивающему поддержание «ведомого» расхода.

2. При заданном «ведущем» расходе кроме АСР соотношения применяют и АСР «ведущего» расхода (рис. 11.3, в). При такой схеме в случае изменения задания по расходу G_1 автоматически изменится и расход G_2 (в заданном соотношении с G_1).

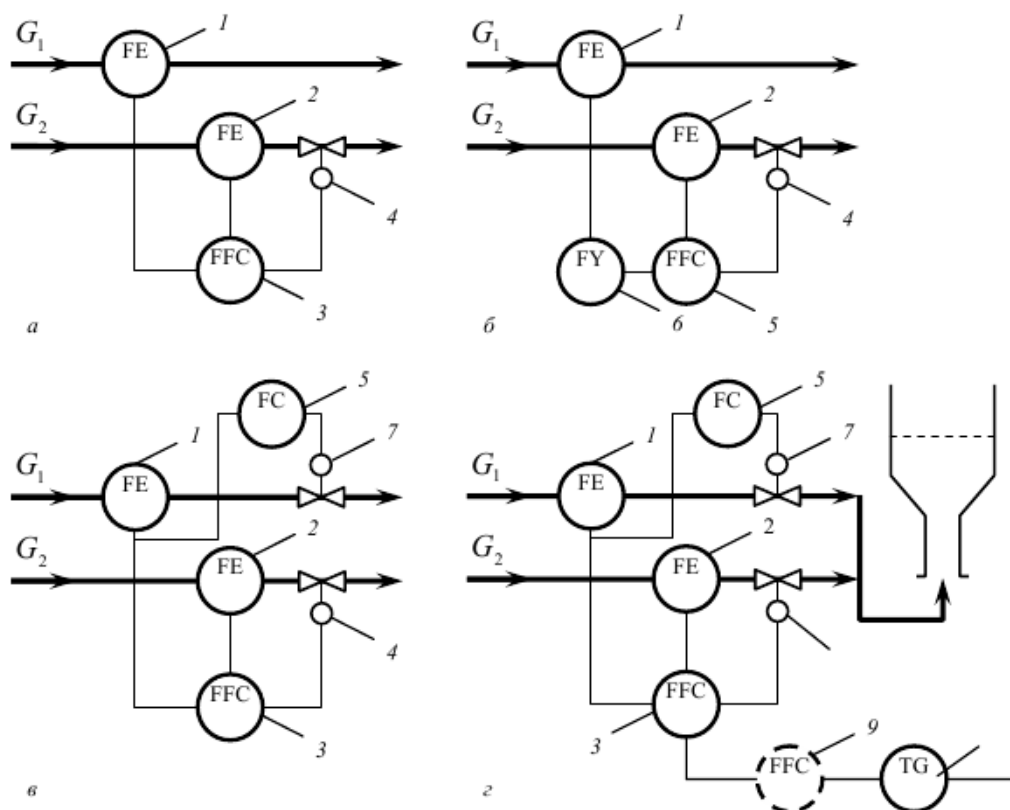


Рис. 11.3. Схемы регулирования соотношения расходов.

1,2 – измерители расхода, 3 – регулятор отношения, 4, 7 – регулирующие клапаны; 5 – регулятор расхода, 6 – реле соотношения, 8 – регулятор температуры, 9 – устройство

3. При заданной общей нагрузке и коррекции коэффициента по третьему параметру. АСР соотношения расходов является внутренним контуром в каскадной системе регулирования третьего технологического параметра y (например, температуры) этом заданный коэффициент соотношения устанавливается внешним регулятором в зависимости от этого параметра, так что $G_2 = \gamma(y)G_1$ (рис. 11.3, г). Особенность настройки каскадных АСР состоит в том, что на задание внутреннему регулятору устанавливают ограничение $x_{рн} \leq x_p \leq x_{рв}$. Для АСР соотношения расходов это соответствует ограничению $\gamma_n \leq \gamma \leq \gamma_v$. Если выходной сигнал внешнего регулятора выходит за пределы $[x_{рн}, x_{рв}]$, то задание регулятору соотношения остается на предельно допустимом значении γ (т. е. γ_n или γ_v).

11.2 Регулирование уровня

Уровень является косвенным показателем гидродинамического равновесия в аппарате.

Постоянство уровня свидетельствует о соблюдении материального баланса, когда приток жидкости равен стоку, и скорость изменения уровня равна нулю.

В общем случае изменение уровня описывается уравнением вида

$$S \frac{dL}{dt} = G_{\text{вх}} - G_{\text{вых}} \pm G_{\text{об}},$$

где S – площадь горизонтального (свободного) сечения аппарата; $G_{\text{вх}}$, $G_{\text{вых}}$ – расходы жидкости на входе в аппарат и выходе из него; $G_{\text{об}}$ – количество жидкости, образующейся (или расходуемой) в аппарате в единицу времени.

В зависимости от требуемой точности поддержания уровня применяют один из следующих двух способов регулирования:

1. позиционное регулирование, при котором уровень в аппарате поддерживается в заданных, достаточно широких пределах: $L_{\text{в}} \leq L \leq L_{\text{н}}$. Такие системы регулирования устанавливают на сборниках жидкости или промежуточных емкостях (рис.11.4). При достижении предельного значения уровня происходит автоматическое переключение потока на запасную емкость;

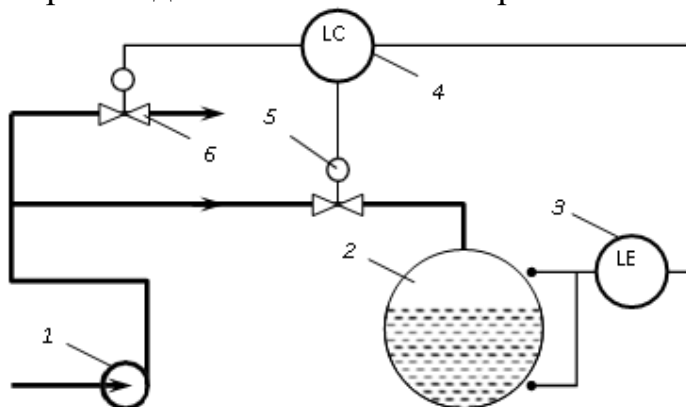


Рис. 11.4. Схема позиционного регулирования уровня:

1 – насос; 2 – аппарат; 3 – сигнализатор уровня; 4 – регулятор уровня; 5,6 – регулирующие клапаны.

2. непрерывное регулирование, при котором обеспечивается стабилизация уровня на заданном значении, т. е. $L = L^0$

Особенно высокие требования предъявляются к точности регулирования уровня в теплообменных аппаратах, в которых уровень жидкости существенно влияет на тепловые процессы. Например, в паровых теплообменниках уровень конденсата определяет фактическую поверхность теплообмена. В таких АСР для регулирования уровня без статической погрешности применяют ПИ-регуляторы. П-регуляторы используют лишь в тех случаях, когда не требуется высокое качество регулирования и возмущения в системе не имеют постоянной составляющей, которая может привести к накоплению статической погрешности.

При отсутствии фазовых превращений в аппарате уровень в нем регулируют одним из трех способов:

1. изменением расхода жидкости на входе в аппарат (регулирование «на притоке», рис. 11.5, а);

2. изменением расхода жидкости на выходе из аппарата (регулирование «на стоке», рис. 11.5, б);

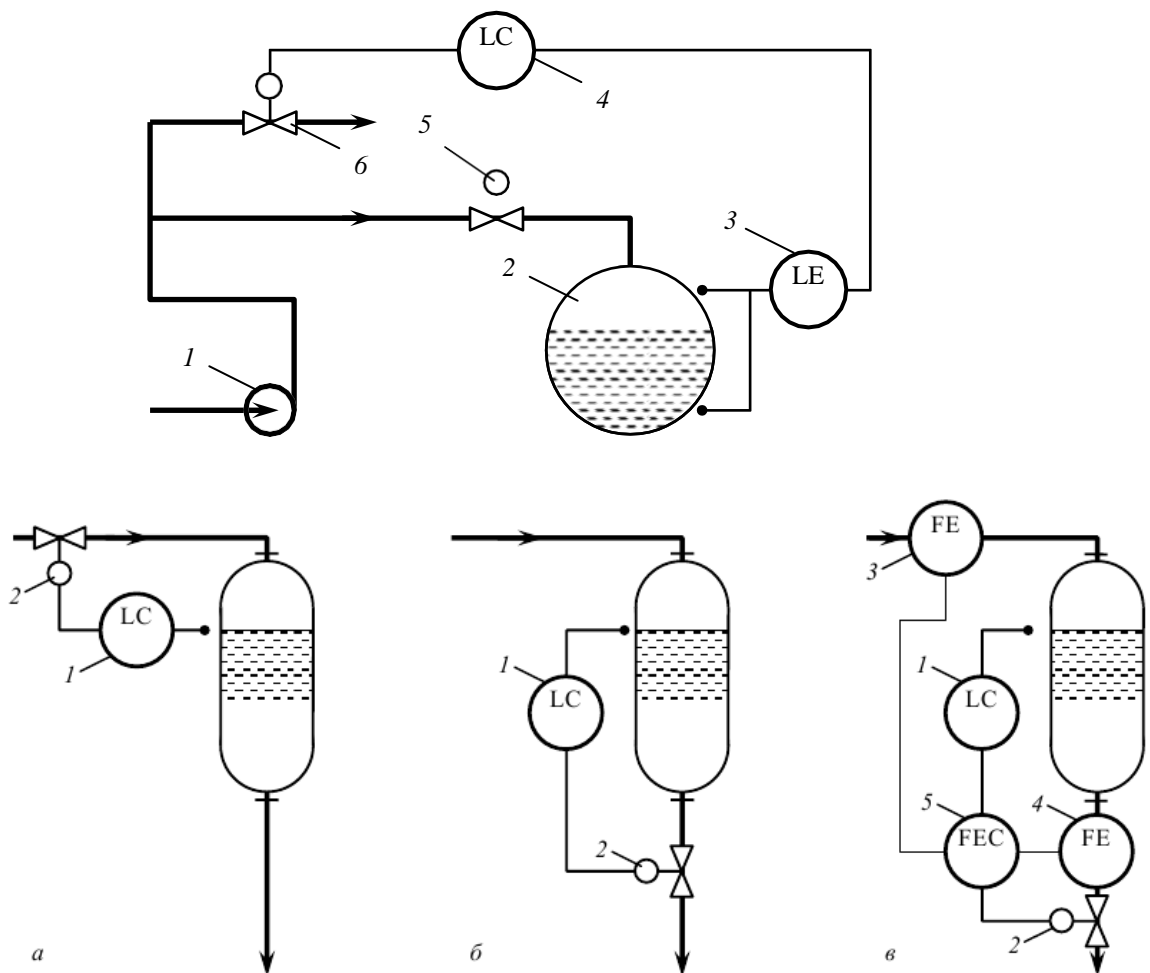


Рис. 11.5. Схемы непрерывного регулирования уровня:

а – регулирование «на притоке»; *б* – регулирование «на стоке», *в* – каскадная АСР (1 регулятор уровня, 2 – регулирующий клапан, 3, 4 – измерители расхода, 5 – регулятор соотношения).

3 – регулированием соотношения расходов жидкости на входе в аппарат и выходе из него с коррекцией по уровню (каскадная АСР, рис. 11.5, в); отключение корректирующего контура может привести к накоплению ошибки при регулировании уровня, так как вследствие неизбежных погрешностей в настройке регулятора соотношения расходы жидкости на входе и выходе аппарата не будут точно равны друг другу, и вследствие интегрирующих свойств объекта, уровень в аппарате будет непрерывно нарастать (или убывать).

В случае, когда гидродинамические процессы в аппарате сопровождаются фазовыми превращениями, можно регулировать уровень изменением подачи теплоносителя (или хладагента). В таких аппаратах уровень взаимосвязан с другими параметрами (например, давлением), поэтому выбор способа регулирования уровня в каждом конкретном случае должен выполняться с учетом остальных контуров регулирования.

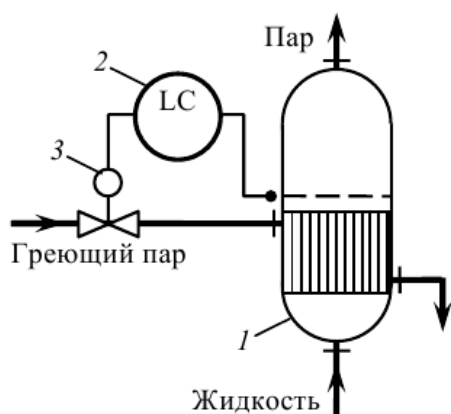


Рисунок 11.6 – Схема регулирования уровня в испарителе:
1 – испаритель; 2 – регулятор уровня, 3 – регулирующий клапан.

Особое место в системах регулирования уровня занимают АСР уровня в аппаратах с кипящим (псевдосжиженным) слоем зернистого материала (рис. 11.7). Устойчивое поддержание уровня кипящего слоя возможно в достаточно узких пределах соотношения расхода газа и массы слоя. При значительных колебаниях расхода газа (или расхода зернистого материала) наступает режим уноса слоя или его оседания. Поэтому к точности регулирования уровня кипящего слоя предъявляют особо высокие требования. В качестве регулирующих воздействий используют расход зернистого материала на входе или выходе аппарата (рис. 11.7, а) или расход газа на охлаждение слоя (рис. 11.7, б).

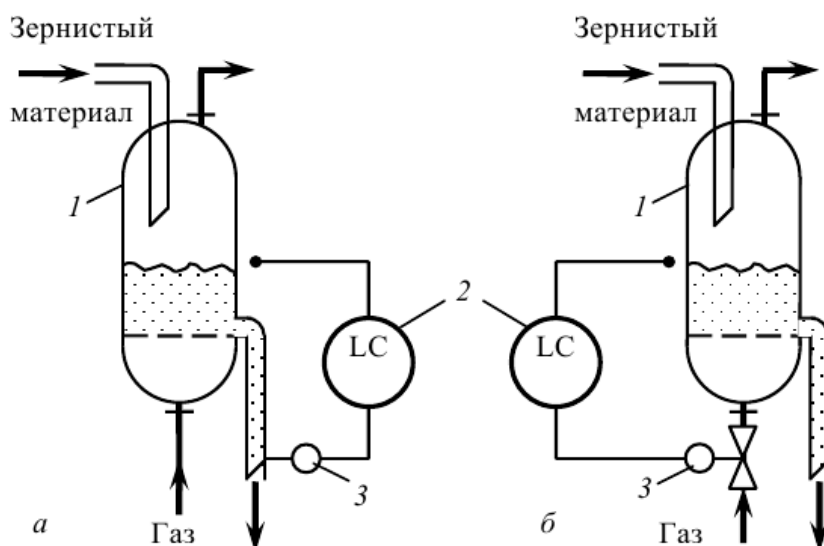


Рис. 11.7. Регулирование уровня кипящего слоя:
а – отводом зернистого материала, б – изменением расхода газа (1 – аппарат с кипящим слоем, 2 – регулятор уровня, 3 – регулирующий орган).

11.3 Регулирование давления

Давление является показателем соотношения расходов газовой фазы на входе в аппарат и выходе из него. Постоянство давления свидетельствует о

соблюдении материального баланса по газовой фазе. Обычно давление (или разрежение) в технологической установке стабилизируют в каком-либо одном аппарате, а по всей системе оно устанавливается в соответствии с гидравлическим сопротивлением линии и аппаратов. Например, в многокорпусной выпарной установке (см. рис. 11.8, а) стабилизируют разрежение в последнем выпарном аппарате. В остальных аппаратах при отсутствии возмущений устанавливается разрежение, которое определяется из условий материального и теплового балансов с учетом гидравлического сопротивления технологической линии.

В тех случаях, когда давление существенно влияет на кинетику процесса (например, в процессе ректификации), предусматривается система стабилизации давления в отдельных аппаратах (рис. 11.8, б). Кроме того, при регулировании процесса бинарной ректификации часто в качестве косвенного показателя состава смеси используют ее температуру кипения, которая однозначно связана с составом лишь при постоянном давлении. Поэтому в продуктовых ректификационных колоннах обычно предусматривают специальные системы стабилизации давления.

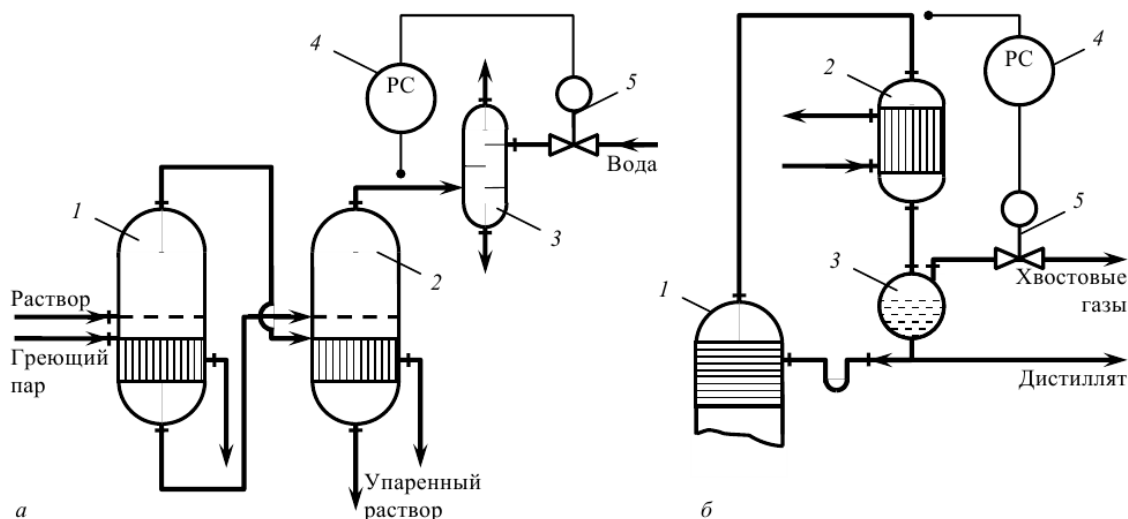


Рис.11.8

а – регулирование разрежения в многокорпусной выпарной установке:

1,2 – выпарные аппараты; 3 – барометрический конденсатор; 4 – регулятор разрежения; 5 – регулирующий клапан.

б – АСР давления в ректификационной колонне: 1 – колонна; 2 – дефлегматор; 3 – флегмовая ёмкость; 4 – регулятор давления; 5 – регулирующий клапан

11.4 Регулирование разрежения в многокорпусной выпарной установке

В данной системе регулирующим воздействием является расход охлаждающей воды в барометрический конденсатор, который влияет на скорость конденсации вторичного пара.

11.5 Регулирование перепада давления.

В таких аппаратах регулируется перепад давления, характеризующий гидродинамический режим, который влияет на протекание процесса (рис. 1.9).

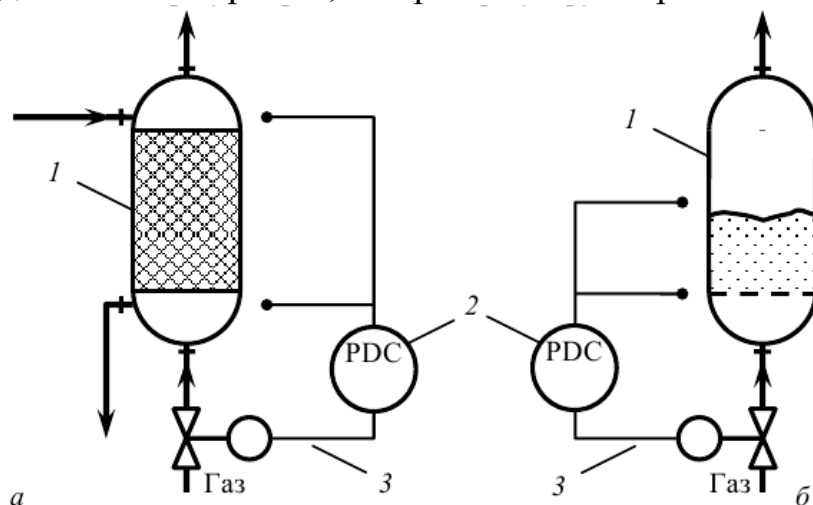


Рис. 11.9. Схема регулирования перепада давления:

а – в колонном аппарате с насадкой; б – в аппарате с кипящим слоем (1 – аппарат; 2 – регулятор перепада давления; 3 – регулирующий клапан).

11.6 Регулирование температуры.

Температура является показателем термодинамического состояния системы и используется как выходная координата при регулировании тепловых процессов. Динамические характеристики объектов в системах регулирования температуры зависят от физико-химических параметров процесса и конструкции аппарата. Поэтому общие рекомендации по выбору АСР температуры сформулировать невозможно, и требуется анализ каждого конкретного процесса.

К общим особенностям АСР температуры можно отнести значительную инерционность тепловых процессов и промышленных датчиков температуры. Поэтому одна из основных задач при проектировании АСР температуры – уменьшение инерционности датчиков.

Рассмотрим, например, динамические характеристики термометра в защитном чехле (рис. 1.10).

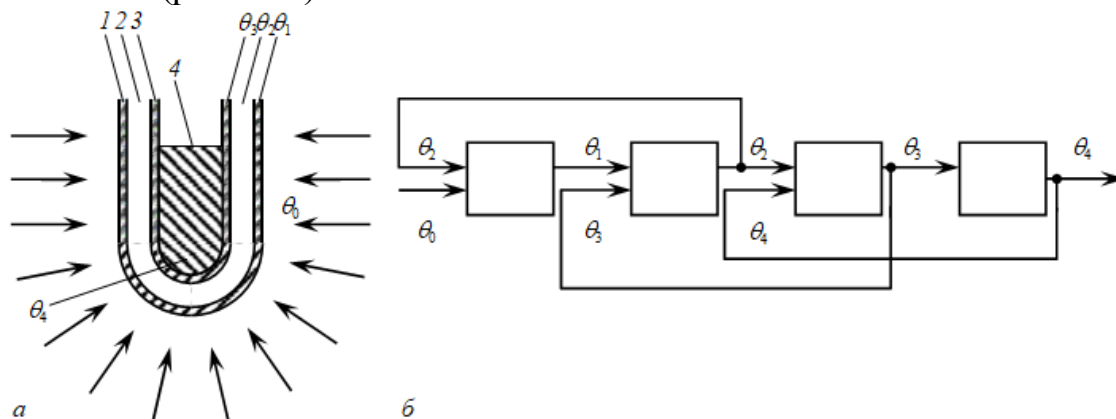


Рисунок 11.10 – Принципиальная (а) и структурная (б) схемы термометра:

1 – защитный чехол; 2 – воздушная прослойка; 3 – стенка термометра; 4 – рабочая жидкость.

Структурную схему термометра можно представить как последовательное соединение четырех тепловых емкостей (рис. 11.10, б): защитного чехла 1, воздушной прослойки 2, стенки термометра 3 и собственно рабочей жидкости 4. Если пренебречь тепловым сопротивлением каждого слоя, то все элементы можно аппроксимировать апериодическими звеньями 1-го порядка, уравнения которых имеют вид:

$$M_j c_{pj} \frac{d\theta_j}{dt} = \alpha_{j1} F_{j1} (\theta_{j-1} - \theta_j) - \alpha_{j2} F_{j2} (\theta_j - \theta_{j+1}),$$

$$j = \overline{1,4}; \quad \theta_5 = 0$$

где

$$T_j \frac{d\theta_j}{dt} + \theta_j = k_{j1} \theta_{j-1} + k_{j2} \theta_{j+1},$$

$$T_j = \frac{M_j c_{pj}}{\alpha_{j1} F_{j1} - \alpha_{j2} F_{j2}};$$

$$k_{j1} = \frac{\alpha_{j1} F_{j1}}{\alpha_{j1} F_{j1} - \alpha_{j2} F_{j2}}; k_{j2} = \frac{\alpha_{j2} F_{j2}}{\alpha_{j1} F_{j1} - \alpha_{j2} F_{j2}}; \quad (11.1)$$

M_j – масса соответственно чехла, воздушной прослойки, стенки и жидкости; c_{pj} – удельные теплоемкости; α_{j1} , α_{j2} – коэффициенты теплоотдачи; F_{j1} , F_{j2} – поверхности теплоотдачи.

Как видно из уравнений (11.1), основными направлениями уменьшения инерционности датчиков температуры являются:

- повышение коэффициентов теплоотдачи от среды к чехлу в результате правильного выбора места установки датчика; при этом скорость движения среды должна быть максимальной; при прочих равных условиях более предпочтительна установка термометров в жидкой фазе (по сравнению с газообразной), в конденсирующемся паре (по сравнению с конденсатом) и т. п.;
- уменьшение теплового сопротивления и тепловой емкости защитного чехла в результате выбора его материала и толщины;
- уменьшение постоянной времени воздушной прослойки за счет применения наполнителей (жидкость, металлическая стружка); у термоэлектрических преобразователей (термопар) рабочий спай припаивается к защитному чехлу;
- выбор типа первичного преобразователя; например, при выборе термометра сопротивления, термопары или манометрического термометра необходимо учитывать, что наименьшей инерционностью обладает термопара в малоинерционном исполнении, наибольшей – манометрический термометр.

11.7 Регулирование pH

Системы регулирования pH можно подразделить на два типа, в зависимости от требуемой точности регулирования. Если скорость изменения pH

невелика, а допустимые пределы ее колебаний достаточно широки, применяют позиционные системы регулирования, поддерживающие pH в заданных пределах: $pH_n \leq pH \leq pH_v$. Ко второму типу относятся системы, обеспечивающие регулирование процессов, в которых требуется точное поддержание pH на заданном значении (например, в процессах нейтрализации). Для их регулирования используют непрерывные ПИ– или ПИД– регуляторы.

Общей особенностью объектов при регулировании pH является нелинейность их статических характеристик, связанная с нелинейной зависимостью pH от расходов реагентов. На рис. 11.11 показана кривая титрования, характеризующая зависимость pH от расхода кислоты G_1 . Для различных заданных значений pH на этой кривой можно выделить три характерных участка: первый (средний), относящийся к почти нейтральным средам, близок к линейному и характеризуется очень большим коэффициентом усиления; второй и третий участки, относящиеся к сильно щелочным или кислым средам, обладают наибольшей кривизной.

На первом участке объект по своей статической характеристике приближается к релейному элементу. Практически это означает, что при расчете линейной АСР коэффициент усиления регулятора настолько мал, что выходит за пределы рабочих настроек промышленных регуляторов. Так как собственно реакция нейтрализации проходит практически мгновенно, динамические характеристики аппаратов определяются процессом смешения и в аппаратах с перемешивающими устройствами достаточно точно описываются дифференциальными уравнениями 1-го порядка с запаздыванием. При этом, чем меньше постоянная времени аппарата, тем сложнее обеспечить устойчивое регулирование процесса, так как начинают сказываться инерционность приборов и регулятора и запаздывание в импульсных линиях.

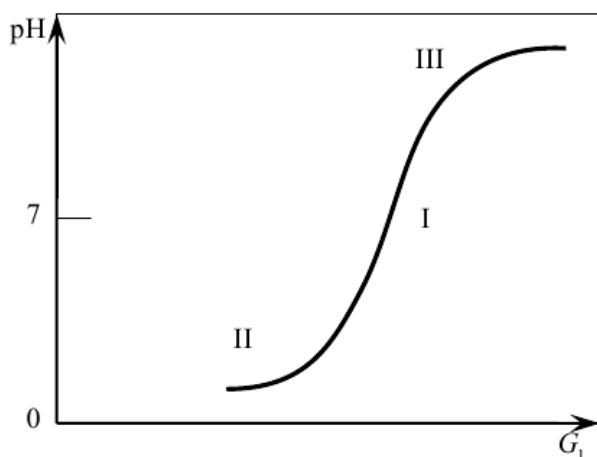


Рис. 11.11. Зависимость величины pH от расхода реагента

Для обеспечения устойчивого регулирования pH применяют специальные системы. На рис. 11.12, а показан пример системы регулирования pH с двумя регулирующими клапанами.

Клапан 1, обладающий большим условным диаметром, служит для грубого регулирования расхода и настроен на максимальный диапазон изменения выходного сигнала регулятора $[x_{pH}, x_{pHv}]$ (рис. 11.12, б, кривая 1). Клапан 2,

служащий для точного регулирования, рассчитан на меньшую пропускную способность и настроен таким образом, что при $x_p = x_p^0 + \Delta$ он полностью открыт, а при $x_p = x_p^0 - \Delta$ – полностью закрыт (кривая 2). Таким образом, при незначительном отклонении рН от pH^0 , когда $x_p^0 - \Delta \leq x_p \leq x_p^0 + \Delta$, степень открытия клапана 1 практически не изменяется, и регулирование ведется клапаном 2. Если $|x_p - x_p^0|$, клапан 2 остается в крайнем положении, и регулирование осуществляется клапаном 1.

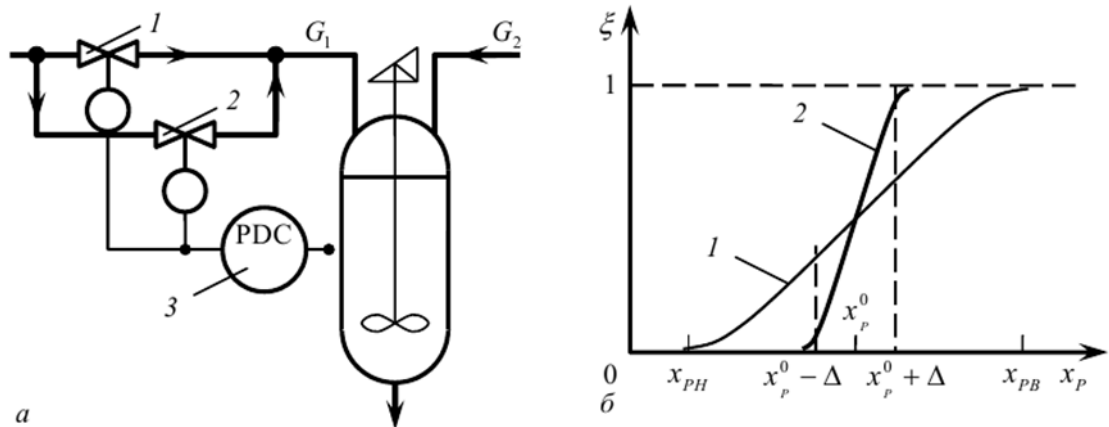


Рис. 11.12. Пример системы регулирования рН:

а – функциональная схема; б – статические характеристики клапанов (1, 2 – регулирующий клапан; 3 – регулятор рН).

На втором и третьем участках статической характеристики (рис. 11.12, б) ее линейная аппроксимация справедлива лишь в очень узком диапазоне изменения рН, и в реальных условиях ошибка регулирования за счет линеаризации может оказаться недопустимо большой. В этом случае более точные результаты дает кусочно-линейная аппроксимация (рис. 11.13), при которой линеаризованный объект имеет переменный коэффициент усиления.

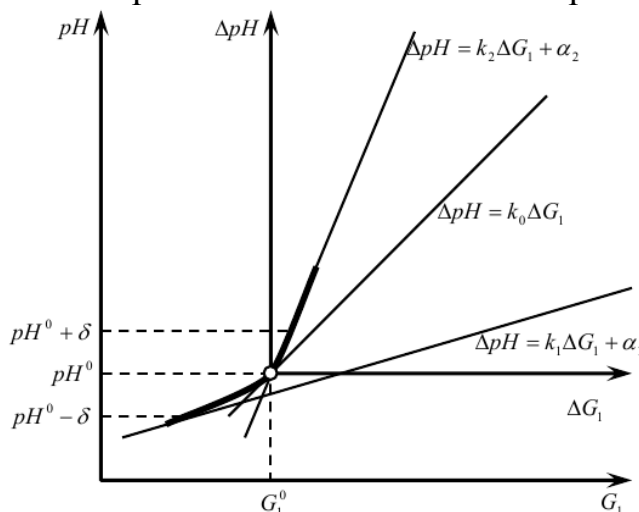


Рис. 11.13. Кусочно-линейная аппроксимация статической характеристики объекта при регулировании рН.

На рис. 11.14 приведена структурная схема такой АСР. В зависимости от рассогласования рН, включается в работу один из регуляторов, настроенный на соответствующий коэффициент усиления объекта.

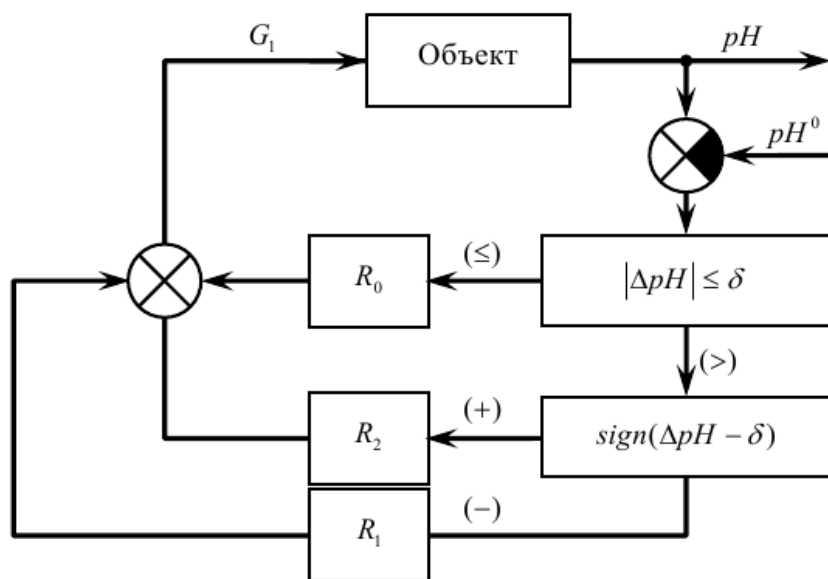


Рис. 11.14. Структурная схема системы регулирования рН с двумя регуляторами

Тема 12. Автоматизация гидромеханических процессов

12.1. Автоматизация процессов перемещения жидкостей и газов

Процессы перемещения жидкостей и газов и процессы разделения и очистки неоднородных систем относят к гидромеханическим процессам.

В промышленности для транспортировки жидкостей по трубопроводам наиболее часто применяют:

1. Центробежные насосы.
2. Поршневые насосы.

Для перемещения газов применяют поршневые компрессоры.

Регулирование работы насосов и компрессоров обычно состоит в поддержании их заданной производительности.

Дросселируя поток можно изменить производительность насоса. Этот метод регулирования производительности насоса не является экономичным вследствие дополнительных потерь энергии, обуславливаемых гидравлическим сопротивлением дросселя, однако этот метод отличается простотой, поэтому его часто используют.

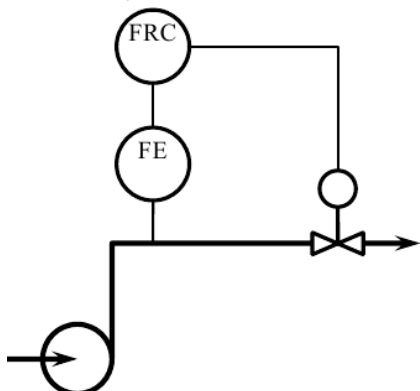


Рис. 12.2. Схема регулирования производительности центробежных насосов.

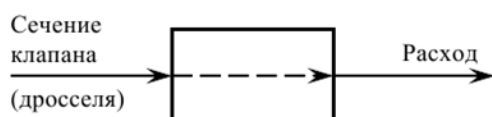


Рис. 2.2. Канал сечение клапана – расход

Чувствительный элемент АСР, например диафрагма, монтируется на нагнетательной линии перед клапаном, что обеспечивает меньшую колебательность процесса регулирования. При увеличении расхода жидкости проходное сечение клапана уменьшается, при этом повышается суммарное гидравлическое сопротивление линии, и расход жидкости уменьшается до заданного значения.

Дросселировать линию всасывания центробежных насосов не рекомендуется, т. к. это вызывает кавитацию, которая приводит к быстрому разрушению насоса, а также к резкому понижению производительности и напора насоса. Клапан на нагнетательной линии насоса может работать и от регуляторов других величин, что определяется требованиями технологии.

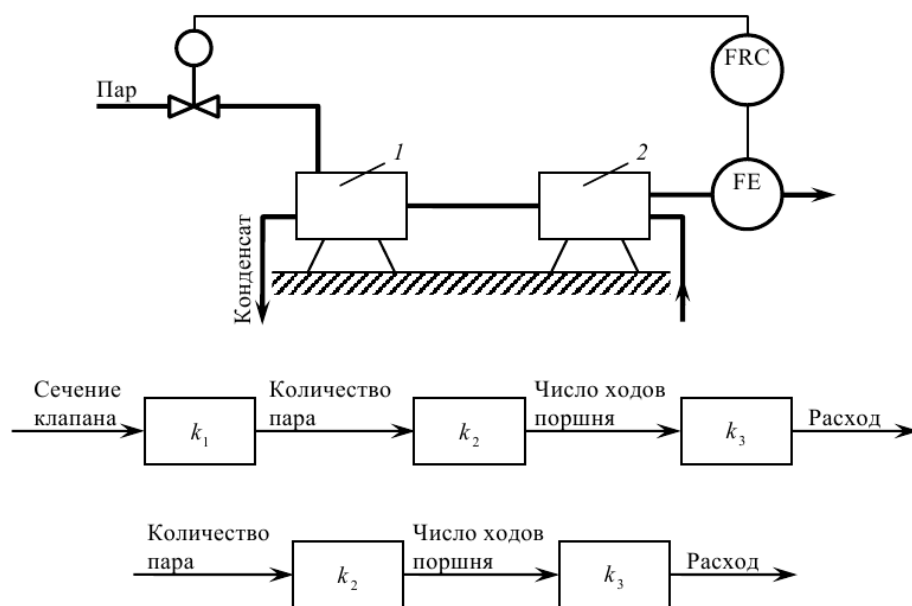


Рис.12.3. Схема стабилизации производительности поршневых насосов.
1 – паровая машина; 2 – поршневой насос.

В случае применения объемных поршневых насосов давление, обуславливающее перемещение жидкости, создается при периодическом вытеснении из замкнутого объема возвратно-поступательно движущимся поршнем. Производительность поршневого насоса практически постоянна и не зависит от напора. Поршневые насосы приводятся в действие паровыми машинами или электродвигателями.

Производительность поршневого насоса с паровым приводом регулируется изменением подачи пара в цилиндр привода. Для этого на паропроводе устанавливают клапан, при открытии проходного сечения которого к приводу насоса будет подаваться различное количество пара, определяющее число ходов поршня насоса и тем самым изменяя его производительность. Управляющее воздействие на клапан подают от регулятора расхода, а чувствительный элемент системы устанавливают на нагнетательной линии насоса. По сравнению с дросселированием это более рациональный метод.

При часто и резко изменяющемся давлении пара применяют каскадную систему регулирования давления пара с коррекцией по расходу нагнетаемого продукта.

Регулирование производительности поршневых насосов с приводом от электродвигателя осуществляется путем перепуска части жидкости с нагнетательной линии на всасывающую. Таким же образом регулируют производительность шестеренчатых и лопастных насосов.

Производительность центробежных компрессоров (газодувок) стабилизируется системами с клапаном, установленным на всасывающей линии.

Такие компрессоры неустойчиво работают в области помпажа, характеризующийся наличием больших давлений и малых расходов: при работе

в этой области уменьшение потребления газа приводит к кратковременному изменению потока направления газа. При этом возникают большие колебания давления газа, которые могут вызвать поломку компрессора. Однако коэффициент полезного действия компрессора имеет наибольшее значение вблизи области помпажа.

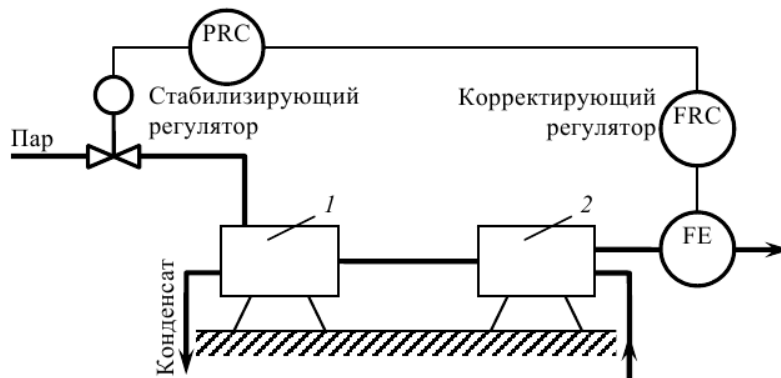


Рис. 12.4. Каскадная система регулирования производительности поршневых насосов.

1 – паровая машина; 2 – поршневой насос.

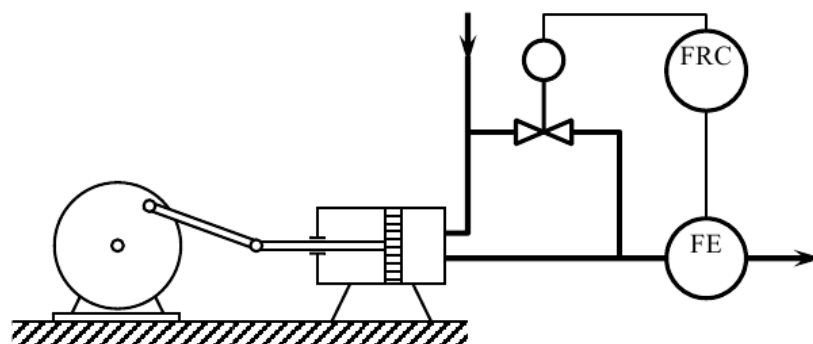


Рис. 12.5. Схема регулирования производительности поршневого насоса с электроприводом

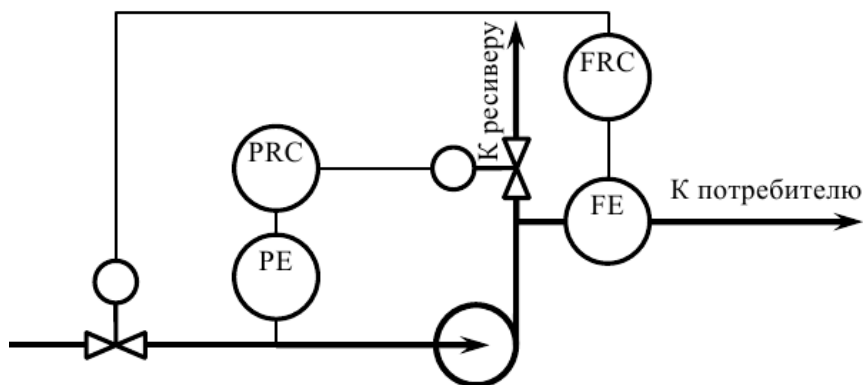


Рис. 12.6. Схема регулирования производительности центробежного компрессора (газодувки) с противопомпажной защитой.

Для обеспечения работы компрессора в этих условиях необходимо иметь противопомпажную автоматическую защиту.

В качестве такой защиты может использоваться система сброса части сжатого газа в ресивер при уменьшении его расхода в линию к потребителю. При приближении к области помпажа регулятор расхода откроет клапан, установленный на линии к ресиверу. Это обусловит увеличение производительности компрессора, снижение давления в нагнетательной линии и повышение давления во всасывающей линии, что предотвратит помпаж компрессора.

Регулирование производительности поршневых компрессоров, развивающих большие давления, обычно осуществляется методом перепуска части газа с нагнетательной линии во всасывающую по байпасному трубопроводу.

Работа такой системы регулирования в значительной степени облегчается меньшей пульсацией давления вследствие сжимаемости газов.



Рис. 2.7. Структурная схема производительности работы поршневых компрессоров.

Тема 13 Автоматизация тепловых процессов

Тепловые процессы играют значительную роль в технологии производства энергетических ресурсов. Химические реакции веществ с также их физические превращения сопровождаются, как правило, тепловыми эффектами. Тепловые явления часто составляют основу технологических процессов.

Передачу тепла от горячих теплоносителей к более холодным осуществляют в теплообменниках.

Различают теплообменники:

1. непосредственного смешения теплоносителей;
2. поверхностные теплообменники, в которых тепло передается через глухую разделительную стенку:

- теплопередача может протекать без изменения агрегатного состояния теплоносителей (нагреватели, холодильники);

- с изменением агрегатного состояния (испарители, конденсаторы).

Нагревание продуктов проводят также в трубчатых печах топочными газами.

13.1. Регулирование теплообменников смешения.

Регулирование теплообменников смешения заключается в поддержании постоянства температуры $T_{см}$ суммарного потока на выходе. Для создания необходимого температурного режима в химических аппаратах используют передачу энергии в результате смешения двух и более веществ с разными теплосодержаниями.

Во многих задачах регулирования состава или температуры в резервуаре с мешалкой при определении передаточных функций принимают перемешивание идеальным. Тогда объект описывается дифференциальным уравнением первого порядка с постоянной времени, равной времени пребывания в резервуаре. Однако на практике отмечается запаздывание, по истечении которого изменение концентрации или температуры питания происходит на выходе из резервуара. Это запаздывание (запаздывание смешения) зависит от размеров резервуара, вязкости жидкости, конструкции и скорости вращения мешалки, определяющих интенсивность перемешивания.

Структурная схема регулирования теплообменника смешения представлена на рис. 13.1.

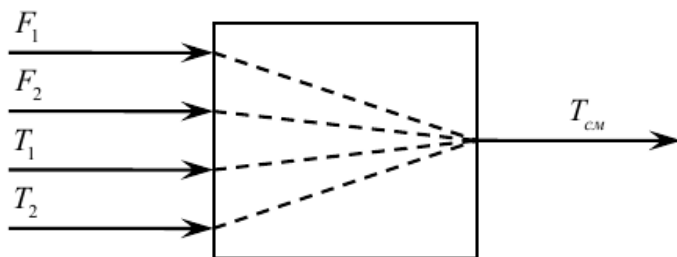


Рис. 13.1. Структурная схема регулирования теплообменника смешения

Если $T_2 > T_{см} > T_1$, при этом теплоемкости и плотности жидкостей одинаковы, то $T_{см} = T_1 + \frac{F_2}{F_1 + F_2}(T_2 - T_1)$, (потерями в окружающую среду пренебрегаем).

Остановимся на особенностях статической характеристики собственно процесса смешения. Рассмотрим для примера аппарат непрерывного действия, в котором смешиваются два потока с расходами G_1 и G_2 , температурами θ_1 и θ_2 , удельными теплоемкостями c_{p1} и c_{p2} (рис. 13.2).

Пусть задача регулирования состоит в поддержании заданного значения θ^0 температуры выходного потока путём изменения расхода G_1 при условии, что основными источниками возмущений являются расход и температура второго потока G_2 и θ_2 , а температура θ_1 и удельные теплоемкости веществ постоянны и равны θ_1^0 , c_{p1} и c_{p2} .

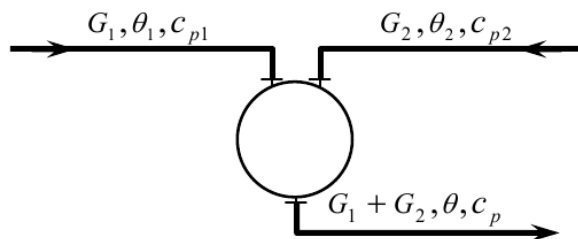


Рис. 13.2. Принципиальная схема теплообменника смешения.

Найдем статические характеристики объекта по каналу регулирования $G_1 - \theta$ и каналам возмущения $G_2 - \theta$ (рис.3.3). Для этого запишем уравнение теплового баланса:

$$G_1 \theta_1^0 c_{p1} + G_2 \theta_2 c_{p2} = (G_1 + G_2) \theta c_p,$$

где

$$c_p = (G_1 c_{p1} + G_2 c_{p2}) / (G_1 + G_2).$$

Отсюда

$$\theta = \frac{G_1 \theta_1^0 c_{p1}}{G_1 c_{p1} + G_2 c_{p2}} + \frac{G_2 \theta_2 c_{p2}}{G_1 c_{p1} + G_2 c_{p2}}. \quad (13.1)$$

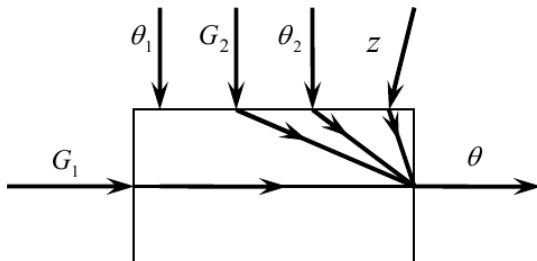


Рис. 13.3. Структурная схема теплообменника смешения.

Как видно из (13.1), характерной особенностью теплообменников смешения является нелинейность статических характеристик по температурным каналам, $\theta_1 - \theta$ и $\theta_2 - \theta$.

При условии малых отклонений координат объекта от их заданных значений можно провести линеаризацию зависимости (3.1) и найти приближенно коэффициенты усиления объекта по каждому каналу.

Обозначим заданные значения входных и выходных координат через G_1^0, G_2^0, θ_2^0 и разложим функцию (3.1) в ряд Тейлора в малой окрестности G_1^0, G_2^0, θ_2^0 :

$$\theta = \theta^0 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial G_1} \right)^0 (G_1 - G_1^0) + \left(\frac{\partial \theta}{\partial G_2} \right)^0 (G_2 - G_2^0) + \left(\frac{\partial \theta}{\partial \theta_2} \right)^0 (\theta_2 - \theta_2^0),$$

где

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial G_1} \right)^0 = \frac{G_2^0 c_{p1} c_{p2} (\theta_1^0 - \theta_2^0)}{(G_1^0 c_{p1} + G_2^0 c_{p2})^2};$$

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial G_2} \right)^0 = \frac{G_1^0 c_{p1} c_{p2} (\theta_2^0 - \theta_1^0)}{(G_1^0 c_{p1} + G_2^0 c_{p2})^2};$$

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial \theta_2} \right)^0 = \frac{G_2^0 c_{p2}}{G_1^0 c_{p1} + G_2^0 c_{p2}}.$$

(13.2)

Переходя к отклонениям $y = \theta - \theta^0, x_p = G_1 - G_1^0, x_{в1} = G_2 - G_2^0, x_{в2} = \theta_2 - \theta_2^0$ получим уравнение статической характеристики в виде:

$$y = k_p x_p + k_1 x_{в1} + k_2 x_{в2},$$

где

$$k_p = \left(\frac{\partial \theta}{\partial G_1} \right)^0; k_1 = \left(\frac{\partial \theta}{\partial G_2} \right)^0; k_2 = \left(\frac{\partial \theta}{\partial \theta_2} \right)^0.$$

Анализ зависимостей (13.3) показывает, что даже при обычных возмущениях, наблюдаемых на практике, ошибка в результате линеаризации может оказаться существенной. Например, при увеличении расхода G_2 на 30 % по сравнению с заданным коэффициент усиления k_p может измениться на 5-20%, а k_1 – на 25-40% от расчетных, в зависимости от соотношения расходов G_1 и G_2 . Стабилизация отношения $G_1 / G_2 = \gamma^0$ позволяет уменьшить влияние этой нелинейности, так как

$$\theta = \frac{\theta_1^0 c_{p1}}{c_{p1} + \frac{G_2}{G_1} c_{p2}} + \frac{\theta_2^0 c_{p2}}{\frac{G_2}{G_1} c_{p1} + c_{p2}} = \frac{\theta_1^0 c_{p1}}{c_{p1} + \frac{1}{\gamma^0} c_{p2}} + \frac{\theta_2^0 c_{p2}}{\gamma^0 c_{p1} + c_{p2}}$$

и при отсутствии других возмущений, кроме G_2 , будет обеспечиваться постоянство выходной температуры.

Наличие других источников возмущения, кроме G_2 , потребует введение коррекции γ^0 , например, в зависимости от значения выходной температуры θ (см. пример каскадной АСР, рис. 13.7).

Рассмотрим несколько вариантов систем автоматизации теплообменников смешения и проведем их сравнительный анализ по качеству процессов регулирования.

Вариант 1. Задача стабилизации выходной температуры смеси θ решается применением одноконтурной замкнутой системы регулирования, в котором регулирующим воздействием является расход G_1 (рис. 13.4). Использование регулятора с интегральной составляющей и законе регулирования (ПИ- или ПИД-регулятор) гарантирует поддержание заданного значения θ в установившемся режиме, однако качество переходного процесса может оказаться неудовлетворительным при большой инерционности канала регулирования и сильных возмущениях.

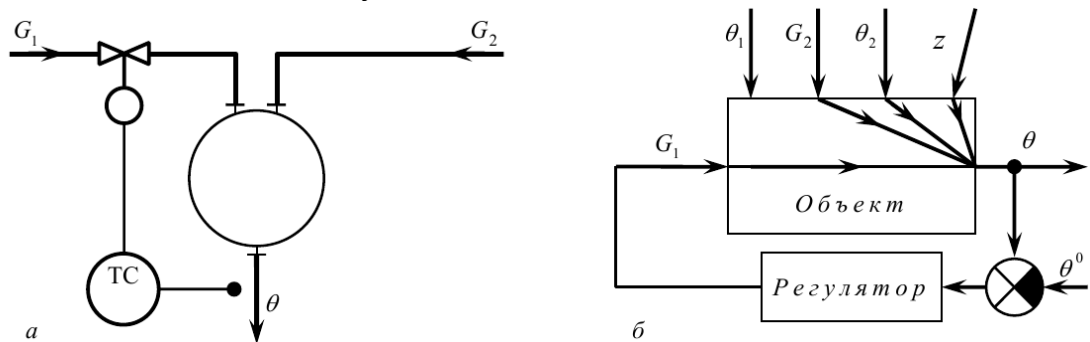
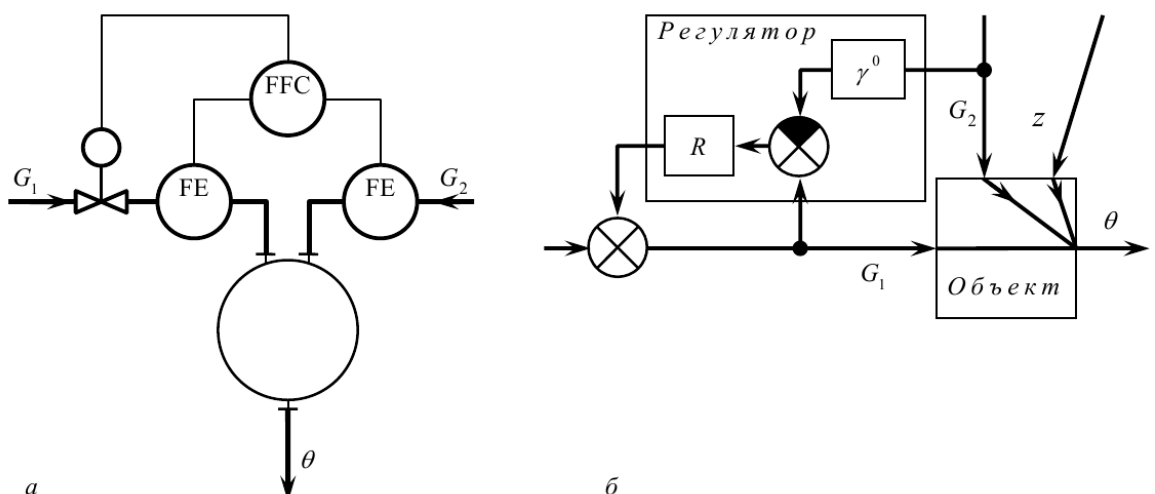
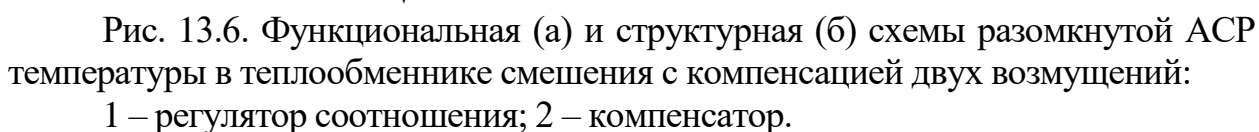


Рис. 13.4. Функциональная (а) и структурная (б) схемы замкнутой одноконтурной АСР температуры в теплообменнике смешения.

Вариант 2 включает систему регулирования соотношения расходов G_1 и G_2 (рис. 13.5). Это разомкнутая система регулирования, способная обеспечить инвариантность регулируемой температуры смеси θ к возмущениям по расходу G_2 , однако при наличии любого другого возмущения θ не будет равна заданной.



Вариант 3 (рис. 13.6) отличается компенсатором возмущения по θ_2 . Таким образом, данная система регулирования может обеспечить независимость выходной температуры от двух основных возмущений G_2 и θ_2 . Однако при наличии других возмущений (например, изменение теплопотерь в окружающую среду) температура будет отклоняться от заданной.



Вариант 4 – система регулирования соотношения расходов G_1 и G_2 с коррекцией коэффициента по выходной температуре смеси θ (рис. 13.7), т.е. двухкаскадная АСР. Основным (внешним) регулятором является регулятор температуры 1, а вспомогательным (внутренним) – регулятор соотношения 2, осуществляющий компенсацию возмущения по расходу G_2 .

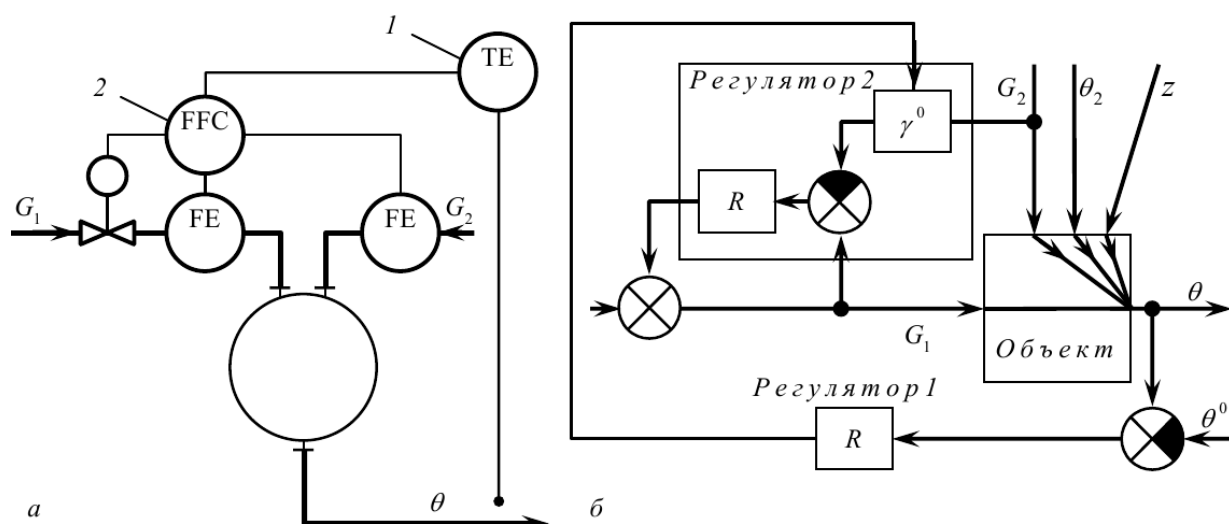


Рис. 13.7. Функциональная (а) и структурная (б) схемы каскадной АСР температуры в теплообменнике смешения:

1 – регулятор температуры; 2 – регулятор соотношения расходов.

Вариант 5 – система регулирования температуры смеси с коррекцией по двум возмущениям G_2 и θ_2 , т.е. комбинированная АСР. Динамический компенсатор 2 (рис. 3.8) в данном случае должен содержать вычислительное устройство для расчёта корректирующей поправки на задание по выходной температуре регулятору 1 в зависимости от температуры и расхода второго потока.

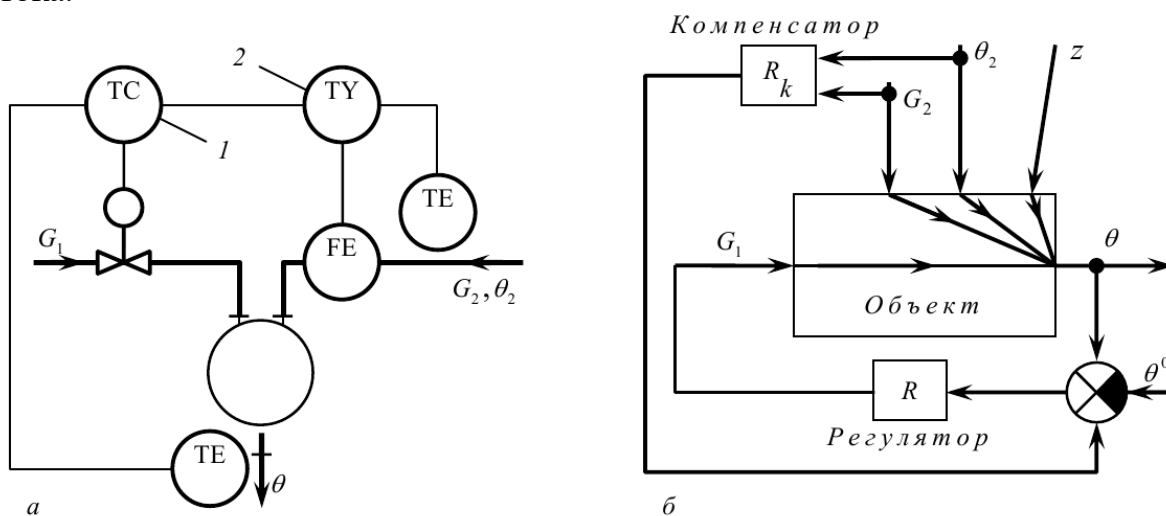


Рис. 13.8. Функциональная (а) и структурная (б) схемы комбинированной АСР температуры в теплообменнике смешения:

1 – регулятор температуры; 2 – компенсатор.

Из рассмотренных примеров систем автоматизации наилучшее качество регулирования обеспечат два последних варианта. При этом в случае приборной реализации систем предпочтительнее четвертый вариант, который легко выполняется на серийных промышленных регуляторах. При использовании ЦВМ или микропроцессорной техники реализация любой из этих систем не представляет затруднений.

13.2. Регулирование поверхностных теплообменников.

Регулирование поверхностных теплообменников заключается в поддержании постоянства температуры одного из теплоносителей на выходе из теплообменника, например, T_{x2} .

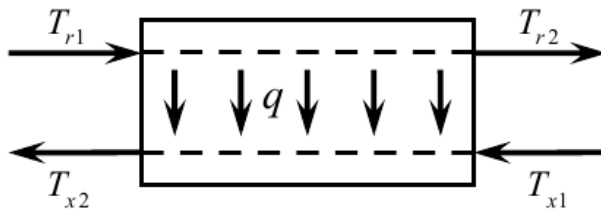


Рис. 13.9. Структурная схема поверхностного противотокового теплообменника.

Температура T_{x2} зависит от скорости передачи тепла или теплового потока q через стенку; в свою очередь эта температура определяется движущей силой процесса или средним температурным напором ΔT_{cp} . Величина ΔT_{cp} представляет собой логарифмическую разность температур

$$\Delta T_{cp} = \frac{(T_{r1} - T_{x2}) - (T_{r2} - T_{x1})}{\ln \frac{T_{r1} - T_{x2}}{T_{r2} - T_{x1}}} \quad (13.4)$$

Величина ΔT_{cp} зависит от значений температур теплоносителей на входе и выходе теплообменника и, в частности, от температуры T_{x2} . С возрастанием T_{x2} движущая сила процесса уменьшается и наоборот. Это свидетельствует о том, что поверхностные теплообменники обладают свойством самовыравнивания.

Если отношение $\frac{(T_{r1} - T_{x2})}{(T_{r2} - T_{x1})} < 4$, то движущую силу процесса при инженерных расчётах можно определить по среднеарифметической разности температур:

$$\Delta T_{cp} = \frac{(T_{r1} - T_{x2}) - (T_{r2} - T_{x1})}{2} \quad (13.5)$$

Погрешность такой замены не превышает 10 %.

Основное уравнение теплообменника $q = KA\Delta T_{cp}$ в этом случае примет вид

$$q = KA \frac{(T_{r1} - T_{x2}) - (T_{r2} - T_{x1})}{2}, \quad (13.6)$$

где K – коэффициент теплопередачи стенки; A – поверхность теплообменника.

Установим зависимость между температурой холодного теплоносителя на выходе T_{x2} и массовыми выходами теплоносителей и в случае, когда обменивающиеся теплом жидкости не изменяют своего агрегатного состояния.

Тепловой поток q через стенку выразим двумя следующими балансовыми уравнениями:

$$q = c_g F_{гг} (T_{г1} - T_{г2});$$

$$q = c_x F_{хх} (T_{х1} - T_{х2}),$$

(13.7-13.8)

где c_g и c_x – удельные теплоёмкости теплоносителей, $F_{гг}$ и $F_{хх}$ – их массовые расходы.

Из этих уравнений найдём температуры $T_{х2}$ и $T_{г2}$ и подставим их в уравнение (13.6)

$$q = \frac{KA}{2} \left\{ T_{г1} - \left[T_{х1} + \frac{q}{c_x F_{хх}} \right] + \left[T_{г1} - \frac{q}{c_g F_{гг}} \right] - T_{х1} \right\}$$

Из последнего равенства определим тепловой поток

$$q = \frac{T_{г1} - T_{х1}}{\frac{1}{KA} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{c_x F_{хх}} + \frac{1}{c_g F_{гг}} \right)}$$

(13.9)

Разделив равенство (13.8) на (13.9), получим зависимость искомой относительной температуры от других величин процесса

$$\frac{T_{х2} - T_{х1}}{T_{г1} - T_{х1}} = \frac{1}{\frac{c_x F_{хх}}{KA} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{c_x F_{хх}}{c_g F_{гг}} \right)}$$

(13.10)

Полученная зависимость в виде семейства кривых приведена на рис. 13.11, где показано влияние массовых расходов теплоносителей на температуру $T_{х2}$.

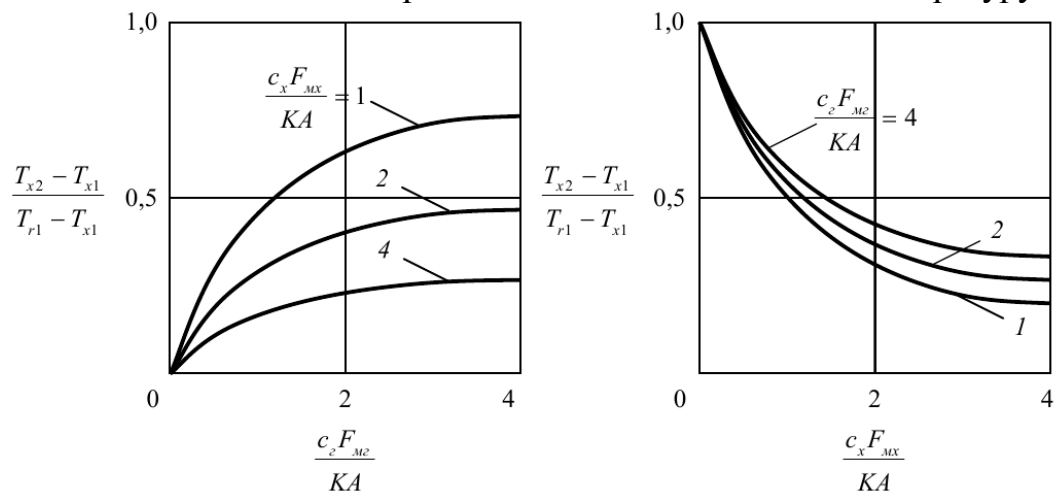


Рис. 13.11. Зависимость температуры на выходе теплообменника $T_{х2}$ от массовых расходов холодного (х) и горячего (г) теплоносителей

Из этих зависимостей следует, что температура $T_{х2}$ зависит от $F_{гг}$ и $F_{хх}$. Поскольку поток нагреваемого продукта представляет собой нагрузку объекта, для поддержания постоянства температуры $T_{х2}$ может быть рекомендована схема регулирования, приведённая на рис. 13.12, а, по которой температуру продукта

на выходе из теплообменника регулируют путём воздействия на расход другого теплоносителя $F_{\text{МГ}}$.

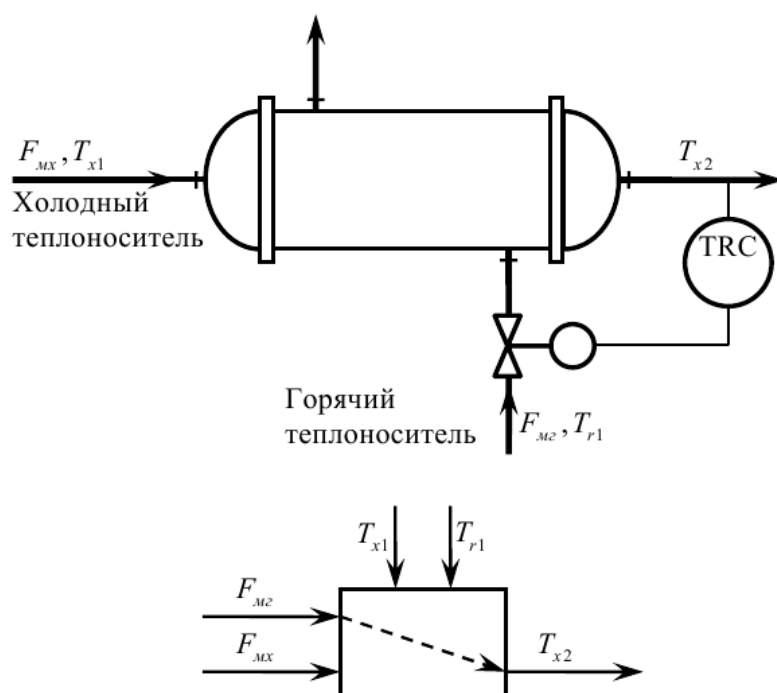


Рис. 13.12. Схема регулирования поверхностного теплообменника воздействием на расход горячего теплоносителя.

Однако из зависимостей (рис. 13.11), следует, что температура T_{x2} более чувствительна к нагрузке холодного теплоносителя, чем к расходу горячего теплоносителя. В связи с этим затрудняется качественное регулирование теплообменников в широком интервале изменения расходов теплоносителей, и требуются регуляторы с дифференцирующей составляющей.

Если по условиям технологии не допускается изменение потоков теплоносителей, то температуру продукта на выходе из теплообменника регулируют путём байпасирования части продукта и изменения его расхода (рис. 13.13). При этом регулирующий клапан устанавливают на байпасной линии. Такие схемы применяют, например, при использовании тепла горячих промежуточных или конечных продуктов для нагрева исходного сырья. Отметим, что байпасирование одного из теплоносителей требует некоторого увеличения поверхности теплообменника и большего расхода греющего агента (для переохлаждения или перегрева продукта) чем при дросселировании. Однако при этом улучшаются динамические характеристики системы регулирования вследствие исключения теплообменника из контура регулирования и уменьшения времени запаздывания объекта.

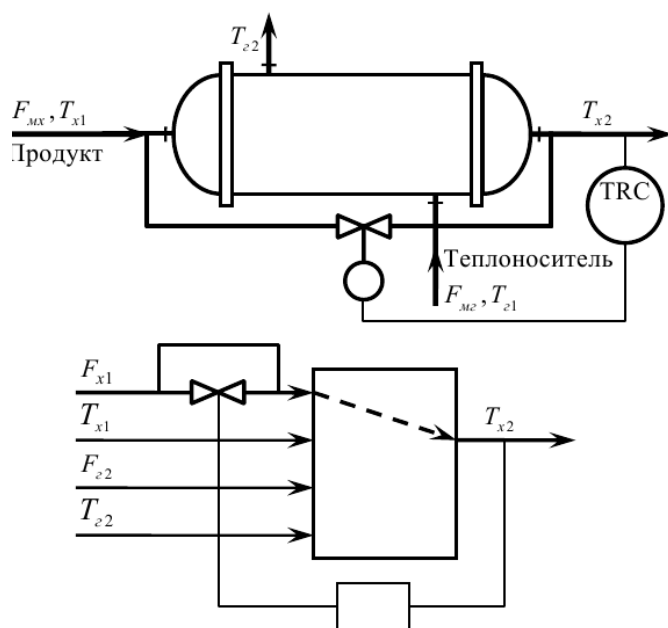


Рис. 13.13. Схема регулирования поверхностного теплообменника байпасированием холодного теплоносителя (продукта).

При изменении агрегатного состояния теплоносителей их температура в теплообменнике практически не изменяется и скорость теплопередачи q можно определить по равенству

$$q = rF_M, \quad (13.11)$$

где r – теплота фазового перехода; F_M – массовый расход среды.

Если в качестве греющего агента применяют водяной пар, то температуру технологического продукта обычно регулируют путём изменения подачи пара (рис.13.14 а). При значительных колебаниях давления пара применяют каскадную систему регулирования давления пара с коррекцией по температуре нагретого продукта (рис.13.14 б).

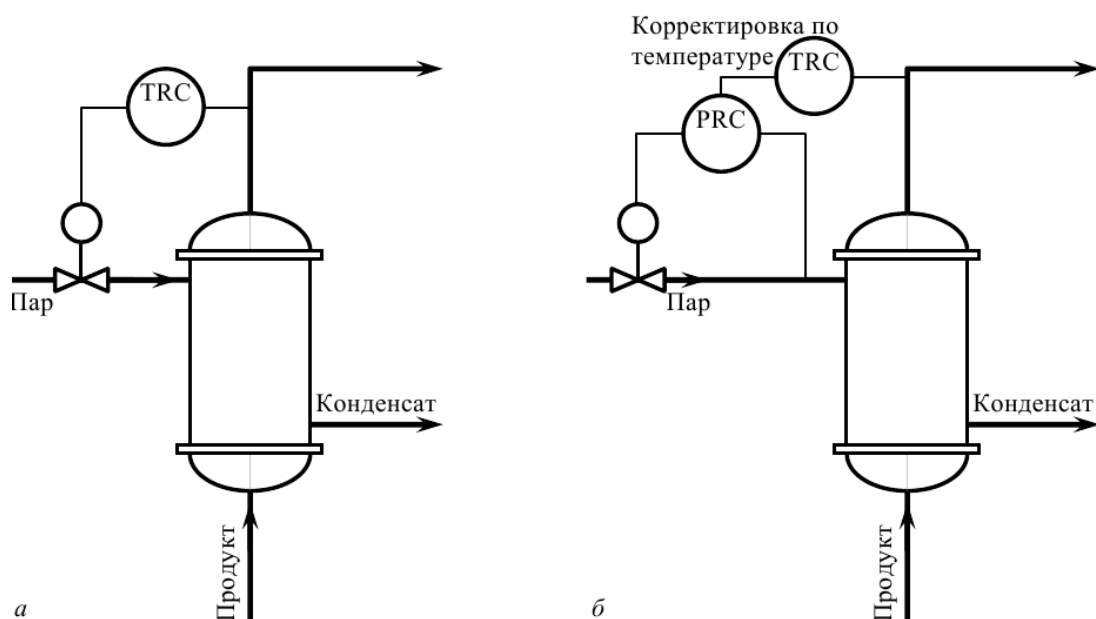


Рис. 13.14. а – схема регулирования работы теплообменника воздействием на расход греющего пара; б – каскадная система регулирования температуры продукта

Возможно также регулирование скорости теплопередачи путём поддержания постоянства температуры продукта на выходе из теплообменника клапаном, установленным на линии отвода конденсата (рисунок 13.15).

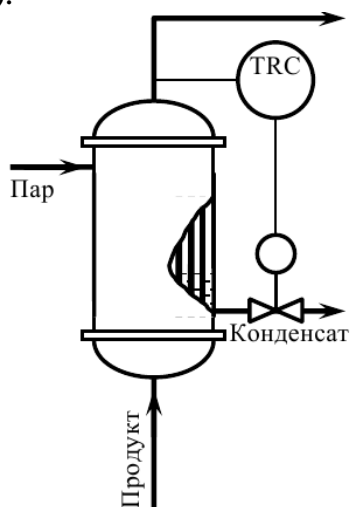


Рис. 13.15. Схема регулирования работы теплообменника путём воздействия на расход конденсата.

Это приводит к частичному замещению теплообменника конденсатом, что в свою очередь скажется на суммарной величине коэффициента передачи теплообменника, а следовательно, и на скорости теплопередачи. Такая система реагирует более медленно, чем система с клапаном на линии пара, её применение рекомендуется лишь при отсутствии резких возмущений по нагрузке. Но вместе с тем она позволяет лучше использовать тепло водяного пара, так как значения его давления и температуры более высоки вследствие отсутствия дополнительных гидравлических сопротивлений на паропроводе, а отводимый конденсат принимает температуру несколько меньшую, чем температура конденсации пара. Это позволяет повысить эффективность работы теплообменника на 5-7 %. Кроме того, по размерам клапан, установленный на линии отвода конденсата будет меньше того, который установлен на линии подачи греющего пара.

Процесс конденсации технологического продукта может быть охарактеризован температурой конденсата этого продукта. Непосредственное регулирование этих величин с воздействием на расход пара, являющийся нагрузкой конденсатора, не представляется возможным.

В этом случае наиболее широко применяют схемы, предусматривающие поддержание постоянства давления паров технологического продукта с воздействием на расход хладагента или конденсата, так как контуры регулирования давления достаточно динамичны. Регулирование уровня путём отвода конденсата (рис. 13.16, а) обеспечивает соблюдение материального баланса конденсатора. По расходу хладагента можно судить о тепловой нагрузке объекта. Изменение расхода конденсата продукта (рис. 13.16,б) обуславливает изменение теплообменной поверхности, благодаря частичному заполнению

конденсатора жидкостью. Последнее, вследствие того, что при конденсации коэффициенты передачи паров значительно выше, чем при охлаждении конденсата, приводит к изменению скорости теплопередачи. Тепловую нагрузку объекта определяют по текущему значению уровня конденсата.

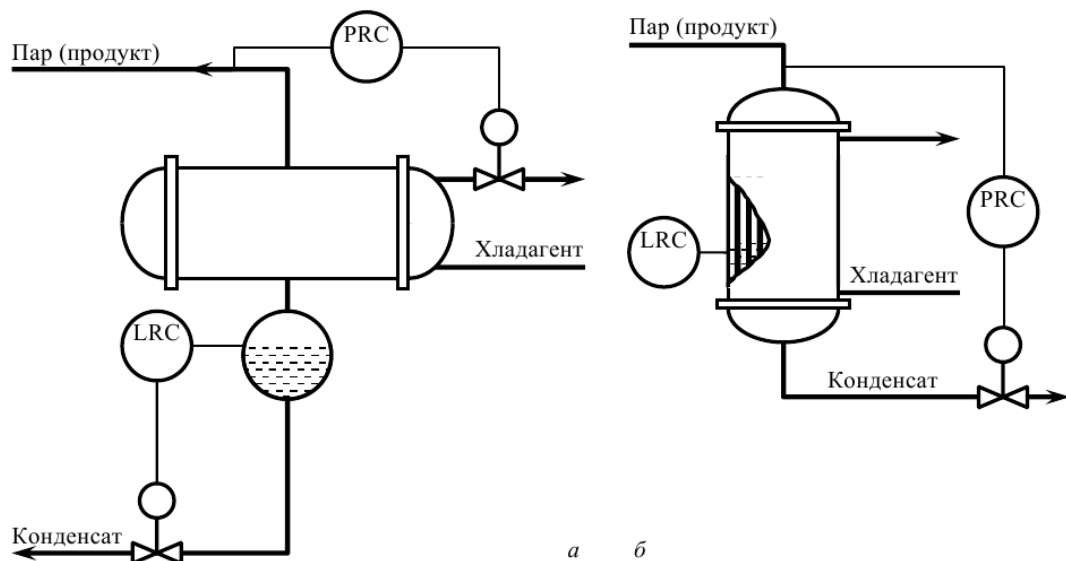


Рис. 13.16. Схемы регулирования работы конденсаторов путём воздействия на расходы хладагента (а) и конденсата (б).

13.3. Автоматизация трубчатых печей.

Прокачиваемый через змеевик трубчатой печи продукт нагревается за счет тепла образующегося при сжигании топливного газа.

Цель регулирования трубчатых печей поддержание постоянства температуры продукта на выходе из печи.

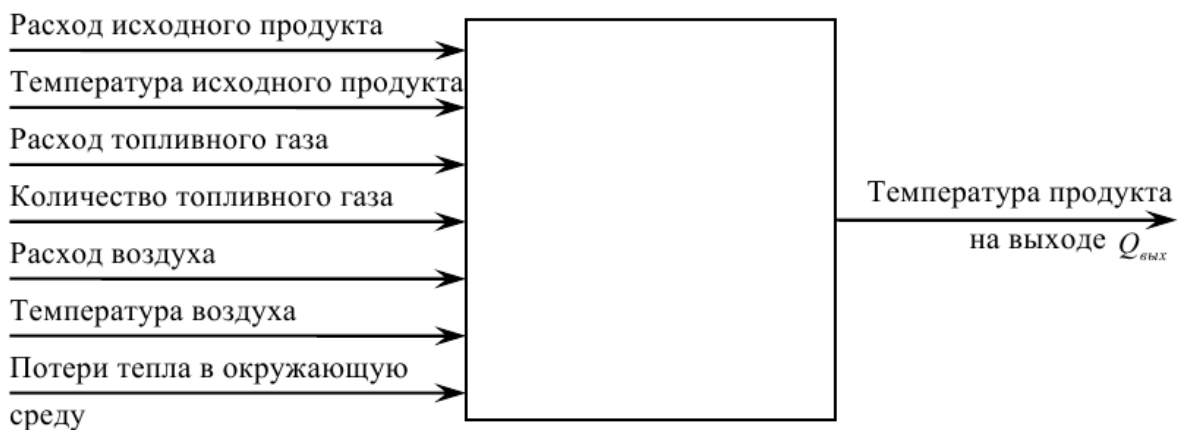


Рис. 13.17. Структурная схема регулирования трубчатых печей.

Возмущениями объекта являются:

- Расход и температура исходного продукта.
- Теплотворная способность топлива.
- Количество и температура воздуха, подаваемого для сжигания топлива.
- Потери тепла в окружающую среду.

Эти возмущения можно скомпенсировать с помощью АСР температуры продукта на выходе из печи, управляющей подачей топлива в печь. Однако трубчатые печи обладают запаздыванием по передаче тепла от дымовых газов через стенку змеевика к проходящему по змеевику продукту. Кроме того, переходный процесс по каналу "расход топлива – температура продукта на выходе" продолжается несколько часов. Поэтому при использовании одноконтурной АСР динамическая ошибка и время регулирования достигает больших значений.

Вместе с тем температура газов над перевальной стенкой достаточно быстро реагирует на изменение режима работы печи, обусловленное изменением количества топливного газа, подаваемого на сжигание.

Поэтому существенное улучшение качества регулирования температуры продукта на выходе из печи может быть достигнуто применением каскадной схемы регулирования, рис. 13.18, состоящей из регулятора температуры продукта на выходе из печи (корректирующий регулятор), воздействующего на задание регулятора температуры газов над перевальной стенкой (стабилизирующий регулятор), который управляет подачей топлива в печь. Стабилизирующий регулятор начинает компенсировать возникающие возмущения, влияющие на процесс сгорания топлива прежде, чем они приведут к изменению температуры продукта.

При резком изменении перегрузки печи по расходу нагреваемого продукта и при наличии возмущения по расходу топлива используют также выше описанную схему каскадного регулирования, стабилизирующий регулятор которой воздействует на регулятор соотношения расходов продукта и топлива. В этом случае регулятор соотношения управляет подачей топлива в печь, рис. 13.19.

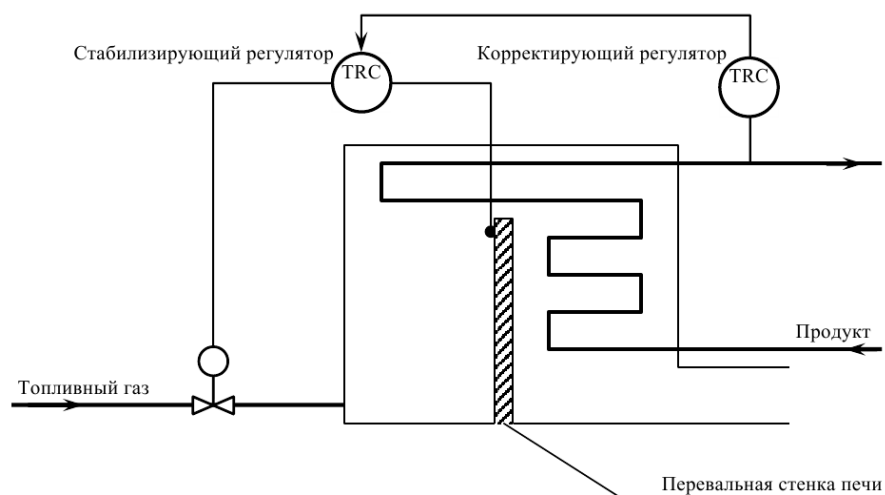


Рис. 13.18. Схема связанного регулирования процесса в трубчатой печи.

При принудительной подаче первичного воздуха оптимальный его расход, при котором температура в топке принимает максимальное значение, поддерживают посредством регулятора соотношения топливный газ – воздух",

обеспечивающего заданное значение коэффициента избытка воздуха, определяющего интенсивность процесса сгорания.

Если при этом теплотворная способность топлива существенно изменяется, то на регулятор соотношения направляют корректирующий сигнал от регулятора стабилизации содержания кислорода в топочных газах. Это обеспечивает полное сгорание топлива и высокое качество регулирования.

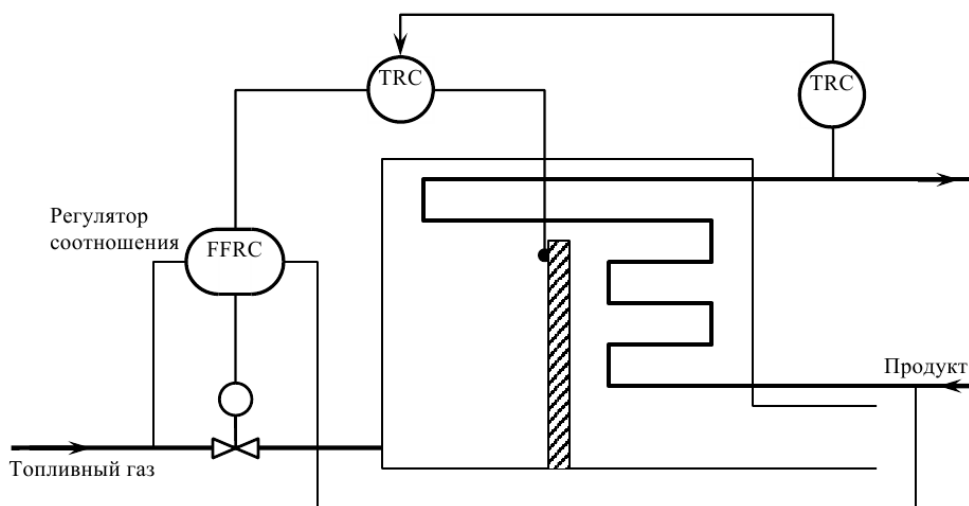


Рис. 13.19. Каскадная схема регулирования трубчатой печи с регулятором соотношения "топливный газ – продукт".

Сильным возмущением режима работы трубчатых печей со стороны топливного газа является изменение его давления. Это изменение компенсируют введением в АСР температуры продукта на выходе из печи дополнительного регулятора давления, задание на который подают от регулятора температуры в топочном пространстве (рисунок 13.20).

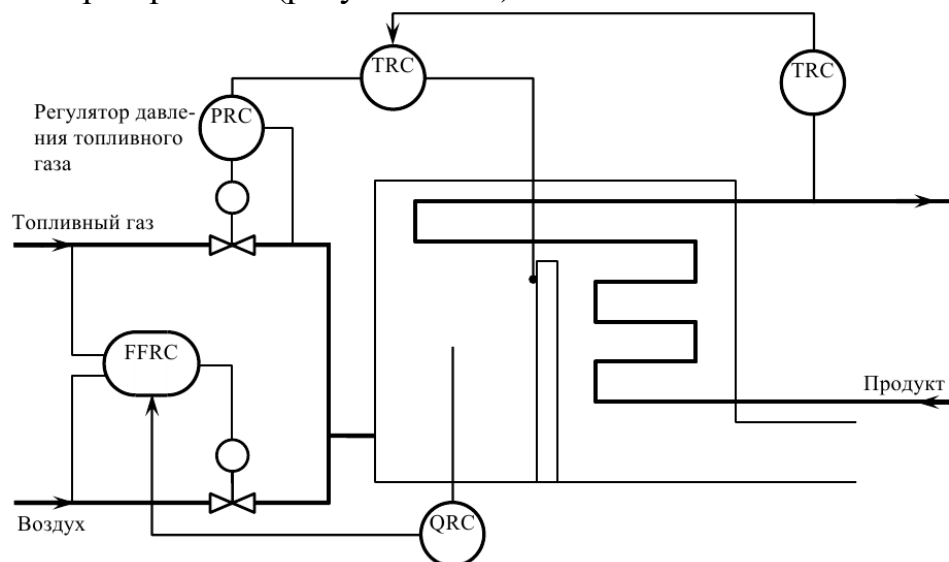


Рис. 13.20. Каскадная схема регулирования температуры продукта на выходе с регулятором соотношения "топливный газ – воздух" и коррекцией по содержанию кислорода в топочных газах.

Такие системы обеспечивают качественное регулирование расхода топливного газа, так как расход газа в большой степени зависит от его давления.

Так как зависимость температуры в топке от соотношения "топливо – воздух" имеет экстремальный характер, при автоматизации трубчатых печей применяют системы экстремального регулирования.

На рис. 13.21 экстремальный регулятор отыскивает максимальные значения температуры дымовых газов над перевальной стенкой, воздействуя на регулятор соотношения "топливный газ – воздух", управляющий подачей первичного воздуха.

При регулировании соотношения "топливный газ – воздух" необходимо обеспечить меры безопасности, так как при недостатке воздуха в топке может образоваться взрывоопасная смесь. Следует предусмотреть ограничения расхода топлива так, чтобы этот расход никогда не превышал максимального допустимого значения, соответствующего текущему значению расхода воздуха. При уменьшении расхода воздуха относительно определенного значения нужно обязательно автоматически уменьшать подачу топлива в топку.

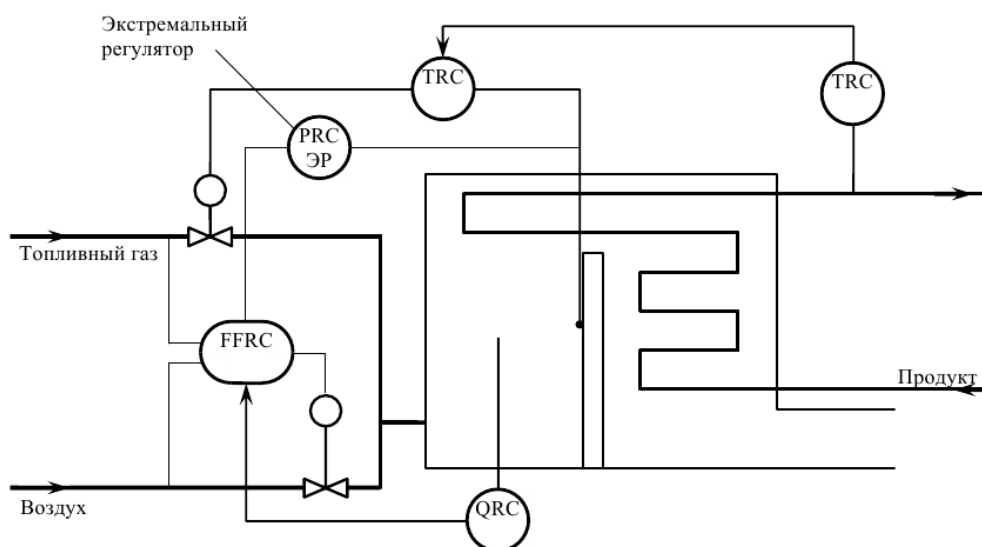


Рис. 13.21. Схема регулирования температуры продукта в печи с экстремальным регулятором, корректирующим соотношение "газ – воздух".

Список используемой литературы

- 1 Автоматическое управление в химической промышленности: учебник для ВУЗов. Под ред. Е.Г. Дудникова. – М.: Химия, 1987. – 368 с.
- 2 Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления: Учебник / А.Р.Гайдук. – М.: Высш. шк., 2010. – 415 с.
- 3 Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
- 4 Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем / Учеб пособие для вузов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 640 с.
- 5 Плетнёв, Г.В. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учебник для студентов вузов / Г.П. Плетнев. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 352 с.
- 6 Плетнев, Г.П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций: учебное пособие для вузов. – М., Энергоиздат, 1981. – 368 с.
- 7 Прошин, И.А. Автоматизация технологических процессов и производств Подготовка и выполнение курсового проектирования [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / И.А. Прошин, Н.Н. Руденко. – Электрон. дан. – Пенза : ПензГТУ, 2013. – 252 с. – Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=62506
- 8 Ротач, В.А. Теория автоматического управления: учебник для Вузов / В.Я. Ротач. – 5-е изд. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008.