

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АСР – автоматическая система регулирования
АЦП – аналогово-цифровой преобразователь
БУ – блок управления
ВРЧ – верхняя радиационная часть
ГС – главный сервомотор
ДС – динамическая связь
ИМ – исполнительный механизм
КДС – комплект динамической связи
КПД – коэффициент полезного действия
КР – корректирующий регулятор
КТС – комплекс технических средств
КЧ – корректор частоты
МУТ – механизм управления турбиной
МЭО – механизмы электрические однооборотные
НАДВ – направляющий аппарат дутьевых вентиляторов
НАДС – направляющий аппарат дымососов
ОЗУ – оперативное запоминающее устройство
ПА – противоаварийная автоматика
ПИ-закон – пропорционально-интегральный закон
ПП – перегретый пар
ПЛК – программный логический контроллер
ПО – 1) пароохладитель; 2) программное обеспечение
ППП – промежуточный пароперегреватель
ППТО – паропаровой теплообменник
ПТ – питатель топлива
ПТК – программно-технический комплекс
ПТН – питательный турбонасос
РД – регулятор давления
РКТ – регулирующий клапан турбины
РМ – регулятор мощности
РНМ – регулятор нейтронной мощности
РО – регулирующий орган
РОУ – редуционно-охладительная установка
РП – регулирующий прибор
РПК – регулирующий питательный клапан
РТ – регулятор температуры
СП – сервопривод
СР – стабилизирующий регулятор
ССУЗ – стержни системы управления и защиты
СУЗ – система управления и защиты
ТВЭЛы – тепловыделяющие элементы ядерного реактора
ЦПУ – центральное процессорное устройство
ЧУПДВ – частотный управляемый привод дутьевых вентиляторов
ЧУПДС – частотно-управляемый привод дымососов

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

AUS – прекращение управления, режим покоя
AWL – лист указаний по языку программирования в STEP7
AWS – 1) переключатель аналогового значения; 2) модульная программная функция
CAE – программированное обучение
CFC – 1) обозначение продукции SIMATIC S7; 2) графический экран параметрирования и структурирования в SIMATIC
CPU – центральный процессорный модуль
CYCLE – параметр времени считывания в стандартных функциональных модулях SIMATIC
D – D-звено
DB – 1) блок данных; 2) узел данных
DDC – система регулирования, в которой вся обработка сигналов от измерительного до исполнительного звена выполняется цифровым вычислителем
DIN – Немецкий институт по стандартизации
DP – 1) децентрализованная периферия; 2) протокол передачи PROFIBUS DP
EMSR – электротехника, техника измерений, управления и регулирования
FB – функциональный блок
FC – вызов функции (программа)
FM – функциональный модуль
FUZZY – общее название продуктов нечеткой логики
HAND – ручной режим работы
HL – верхний предел
HW – аппаратура
HW-Config – аппаратный инструмент конфигурации SIMATIC Manager
I – 1) I-звено (интегрирующее звено); 2) инструменты
IP – вид защиты
LIM – функция ограничения
LL – нижний предел
OP – 1) панель оператора; 2) прибор обслуживания (например, OP7, OP17)
OS – операторская станция
P – P-звено
PA – 1) автоматизация процесса; 2) протокол передачи (PROFIBUS PA)
PCS7 – обозначение продукта SIMATIC S7
PDM – аппаратный диспетчер процесса
PER_TM – период импульсного выхода
PG – прибор программирования со STEP7 как Window-приложение для программирования, обслуживания, наблюдения и диагностики компонент SIMATIC S7
PLC – программный логический контроллер
PLS – система управления процессором
PLT – 1) техника управления процессами; 2) точка измерения; 3) информационный пункт
PROFIBUS – Европейский стандарт EN50 170, том 2 (PROFIBUS DP – для децентрализованной периферии есть часть функций, определенных в этом стандарте; PROFIBUS PA – для автоматических процессов, расширяет PROFIBUS DP в части собственной техники передачи в соответствии со стандартом IEC 1158-2)

PV – действительное значение; значение процесса
R – трубопровод
SAMPLET – параметр интервала считывания в стандартных функциональных модулях SIMATIC
SCADA – управление и сбор данных
SIPART – обозначение продукции семейства процессных регуляторов фирмы SIEMENS
Soll – уставка (значение процесса)
SPC – автоматизированное задание уставки
SW – программное обеспечение
TD – текстовый дисплей
TE – термоэлемент
TIA – 1) полностью интегрированная автоматика; 2) обозначение для всех устройств SIMATIC
TM – 1) время процесса; 2) время срабатывания исполнительного устройства; 3) время пере-
хода
TN – время переустановки
TV – время упреждения
WinCC – станция наблюдения и обслуживания
Z – Z-звено

ВВЕДЕНИЕ

Основу современной энергетики составляют тепловые электрические станции (ТЭЦ, ГРЭС, АЭС). Для их управления широко используются системы автоматического регулирования, обеспечивающие повышение экономичности и безаварийности их работы. Однако эффективность и надежность работы теплоэнергетического оборудования определяется не только объемом автоматизации, но и в значительной степени эффективностью выбранных структур систем регулирования.

В данном пособии, состоящем из пяти глав, рассматриваются наиболее распространенные системы регулирования и их структуры для основного теплоэнергетического оборудования, т.е. для котлов (барабанных, прямоточных) и турбин в составе энергоблоков ТЭС и АЭС, а также приводятся основные характеристики различных комплексов технических средств (КТС) и примеры их реализации.

На ряду со структурами систем регулирования приводятся и динамические характеристики объектов регулирования, необходимые для параметрической оптимизации последних.

Уникальность данного пособия заключается в том, что в нем собран материал, позволяющий изучать широкий спектр вопросов, связанных с автоматизацией теплоэнергетических процессов на ТЭС и АЭС.

Пособие предназначено для студентов учреждений высшего образования при подготовке курсового и дипломного проектирования систем регулирования основного теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС, а также для изучения курсов по автоматизации специальностей «Проектирование и эксплуатация атомных электрических станций», «Тепловые электрические станции», «Автоматизация и управление теплоэнергетическими процессами», «Промышленная энергетика».

Авторы



СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ БАРАБАННОГО КОТЛА

1.1. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПИТАНИЯ БАРАБАННОГО КОТЛА

1.1.1. Общие сведения о системе

Автоматическая система регулирования (АСР) питания предназначена для поддержания материального соответствия между расходами питательной воды в котел и нагрузки котла по пару. Показателем этого соответствия служит уровень воды в барабане котла.

Снижение уровня воды ниже допустимых пределов может привести к нарушению циркуляции в экранных трубах (опрокидыванию циркуляции) и как следствие – к пережогу труб. При значительном повышении уровня воды в барабане возможен захват частиц воды паром, вынос ее в пароперегреватель и турбину, что вызывает занос пароперегревателя и турбины солями.

Автоматическая система регулирования питания барабанного котла должна обеспечить удержание уровня воды в допустимых пределах:

- при стационарном режиме максимально допустимые отклонения по уровню не должны превышать ± 20 мм;
- при скачкообразном возмущении по нагрузке на 10% максимально допустимые отклонения по уровню не должны превышать ± 50 мм.

Зона работы АСР питания обычно ограничена уставкой защиты от понижения уровня воды в барабане котла, с одной стороны, и уставкой открытия аварийного слива – с другой. Эти пределы определяют безопасность работы котла, превышение их вызывает аварийную ситуацию.

1.1.2. Динамические характеристики объекта регулирования

Отклонение уровня воды в барабане котла связано с наличием небаланса между притоком питательной воды и расходом пара и описывается дифференциальным уравнением вида

$$F(\rho_v - \rho_n) \frac{dH}{dt} = G_{ПВ} - D_n, \quad (1.1)$$

где F – площадь зеркала испарения, м^2 ; $\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{п}}$ – плотность воды и насыщенного пара, $\text{кг}/\text{м}^3$; $G_{\text{ПВ}}$ и $D_{\text{п}}$ – расход питательной воды и расход пара соответственно, $\text{кг}/\text{с}$.

Хотя на уровень воды в барабане котла оказывают влияние много возмущений, но при расчете оптимальных параметров настройки регулятора обычно используется передаточная функция по каналу возмущения расходом питательной воды в виде интегрирующего звена с запаздыванием:

$$G_{\text{ПВ}} = \frac{e^{-p\tau}}{Tp}, \quad (1.2)$$

где τ – постоянная времени запаздывания, принимается в пределах 15–20 с; T – постоянная времени интегрирования, принимается в пределах 100–150 с.

На рис. 1.1 приведены переходные процессы по изменению уровня воды в барабане котла при различных возмущениях. Для возмущений расходом питательной воды, расходом пара, расходом топлива и температурой питательной воды присуще явление «набухания» уровня. В данном случае кривая разгона будет иметь вид, изображенный на рис. 1.1, *а*, в остальных случаях – вид, изображенный на рис. 1.1, *б*.

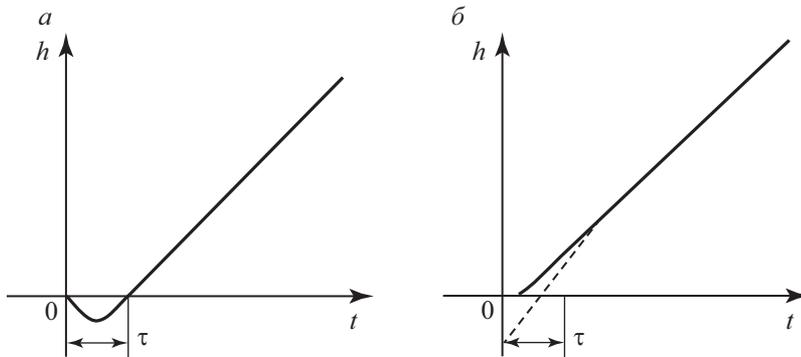


Рис. 1.1. Переходные процессы по изменению уровня воды в барабане котла при различных возмущениях:

а – при некипящем экономайзере; *б* – при кипящем экономайзере

Явление «набухания» уровня зависит от параметров пара и конструктивных особенностей котла и определяется в основном разностью предельных объемов насыщенного пара и кипящей воды. С повышением давления пара этот эффект уменьшается. Кроме того, «набухание» зависит от теплового

напряжения топочных экранов: с его увеличением также увеличивается паросодержание в топочных экранах, поэтому резко сказывается изменение нагрузки потребителей на «набухании» уровня. У современных котлов с высоким тепловым напряжением колебание уровня при резких и значительных изменениях нагрузки достигает существенных значений.

1.1.3. Структурная схема регулирования питания

На современных барабанных котлах производительностью 20 т/ч и выше применяются только АСР с трехимпульсным регулятором, что объясняется чрезвычайно жесткими требованиями, предъявляемыми к качеству регулирования (рис. 1.2).

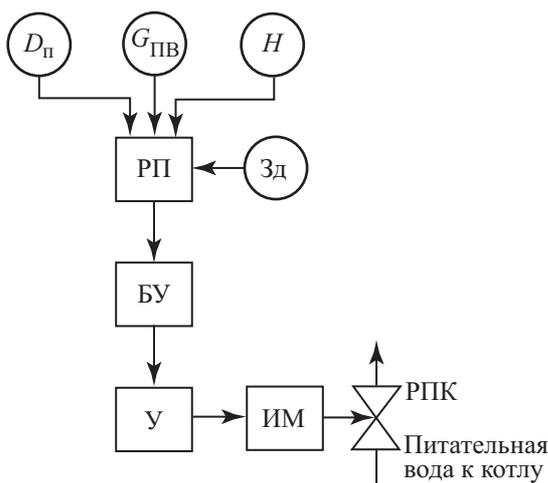


Рис. 1.2. Структурная схема регулирования питания барабанного котла:

$D_{п}$ – расход пара, $G_{ПВ}$ – расход питательной воды; H – уровень в барабане котла; РП – регулирующий прибор; Зд – задатчик; БУ – блок управления; У – усилитель; ИМ – исполнительный механизм; РПК – регулирующий питательный клапан

Типовая АСР питания содержит измерительные преобразователи уровня H , расхода пара $D_{п}$, расхода питательной воды $G_{ПВ}$; регулирующий прибор, формирующий ПИ-закон регулирования; коммутирующую и управляющую аппаратуру; исполнительный механизм; регулирующий орган.

1.2. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА (НАГРУЗКИ) БАРАБАННОГО КОТЛА

1.2.1. Общие сведения о системе

Система регулирования расхода топлива (нагрузки) предназначена для обеспечения потребителя требуемым количеством пара заданного давления. Давление пара является косвенным показателем соответствия количества пара, выработанного котлом, расходу пара на турбину.

Нарушение теплового баланса котла происходит за счет внутренних и внешних возмущений. К *внутренним* относятся *возмущения*, связанные с изменением характеристик топлива и его расхода. К *внешним* относятся *возмущения*, связанные с изменением количества потребляемого пара.

Таким образом, система регулирования должна выполнять две функции: компенсировать внутренние и внешние возмущения с помощью одного управляющего воздействия – расхода топлива. Эти требования определяют структуру системы регулирования.

Система регулирования расхода топлива должна обеспечить:

- поддержание в регулирующем режиме работы котла давления пара перед турбиной или в главной паровой магистрали с отклонением не более $\pm 2\%$ номинального;
- поддержание в базовом режиме работы котла расхода пара с отклонением не более $\pm 3\%$ заданного.

1.2.2. Динамические характеристики объекта регулирования

Котел как объект регулирования давления и тепловой нагрузки может быть представлен в виде последовательного соединения простых участков: топочной камеры; парообразующей части, состоящей из поверхностей нагрева, расположенных в топочной камере; барабана и пароперегревателя.

При параметрической оптимизации данной системы регулирования для *газомазутных котлов* используются динамические характеристики следующих участков:

- участок «расход топлива B_T – давление пара P_n за котлом»:

$$W_{\Delta B_T \Delta P_n}(p) = \frac{K_{\Delta B_T \Delta P_n} e^{-p\tau_{\Delta B_T \Delta P_n}}}{T_{\Delta B_T \Delta P_n} p + 1}, \quad (1.3)$$

где $K_{\Delta B_T \Delta P_n} = 1,5 \div 2,5$; $\tau_{\Delta B_T \Delta P_n} = 40 \div 60$ с; $T_{\Delta B_T \Delta P_n} = 300 \div 400$ с;

- участок «задание Z_d – расход топлива B_t к котлу»:

$$W_{Z_d B_t}(p) = \frac{K_{Z_d B_t} e^{-p\tau_{Z_d B_t}}}{T_{Z_d B_t} p + 1}, \quad (1.4)$$

где $K_{Z_d B_t} = 1 \div 1,5$; $\tau_{Z_d B_t} = 1 \div 1,5$ с; $T_{Z_d B_t} = 3 \div 5$ с.

Для *твердотопливных котлов* в системе регулирования нагрузки применяется сигнал по «теплоте». В этом случае используется динамическая характеристика следующих участков:

- участок «задание Z_d – теплота Q_t »:

$$W_{Z_d Q_t}(p) = \frac{K_{Z_d Q_t} e^{-p\tau_{Z_d Q_t}}}{T_{Z_d Q_t} p + 1}, \quad (1.5)$$

где $K_{Z_d Q_t} = 0,8 \div 1,2$; $\tau_{Z_d Q_t} = 15 \div 20$ с; $T_{Z_d Q_t} = 80 \div 120$ с;

- участок «задание Z_d – давление пара P_n за котлом»:

$$W_{Z_d P_n}(p) = \frac{K_{Z_d P_n} e^{-p\tau_{Z_d P_n}}}{T_{Z_d P_n} p + 1}, \quad (1.6)$$

где $K_{Z_d P_n} = 0,5 \div 2,0$; $\tau_{Z_d P_n} = 30 \div 35$ с; $T_{Z_d P_n} = 200 \div 250$ с.

1.2.3. Структурная схема регулирования расхода топлива (нагрузки)

Обычно система регулирования расхода топлива строится либо по каскадной схеме со стабилизирующим и корректирующим регуляторами, либо без корректирующего регулятора, но с подачей на него топлива двух сигналов, характеризующих внешние и внутренние возмущения (или скорость их изменения).

В каскадных системах регулирования контур стабилизации предназначен для подавления внутренних возмущений путем воздействия на регулирующий орган расхода топлива, осуществляя тем самым принцип регулирования по отклонению. Корректирующий регулятор предназначен для подавления внешних возмущений путем воздействия на задание стабилизирующему регулятору. В этом случае в системе осуществляется принцип регулирования по нагрузке. Кроме того, структура системы регулирования зависит как от вида сжигаемого топлива, так и от компоновки ТЭС (блочные или с поперечными связями). На рис. 1.3 приведены структурные схемы наиболее распространенных вариантов.

Система регулирования расхода топлива включает в себя измерительные преобразователи давления и расхода, регулирующий прибор, коммутирующую и управляющую аппаратуру, исполнительные механизмы, регулирующие органы.

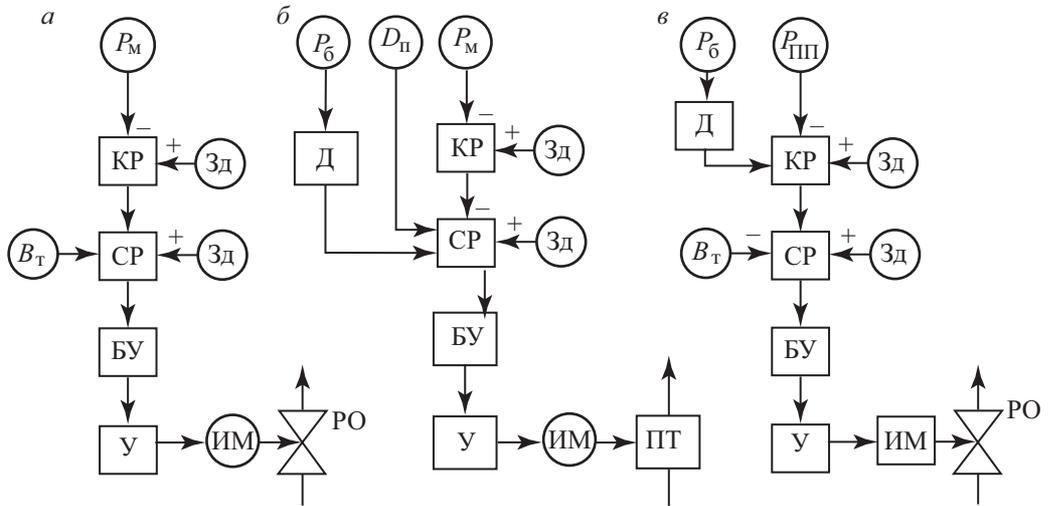


Рис. 1.3. Структурная схема регулирования расхода топлива (нагрузки):
 а – для газомазутного барабанного котла с поперечными связями; б – для твердотопливного барабанного котла с поперечными связями; в – для газомазутного котла на блочных ТЭС; P_M – давление в главной паровой магистрали; КР – корректирующий регулятор; B_T – расход газомазутного топлива; СР – стабилизирующий регулятор; $P_б$ – давление в барабане котла; $P_{Пп}$ – давление перегретого пара; Д – дифференциатор; ПТ – питатель топлива; РО – регулирующий орган (остальные обозначения см. на рис. 1.2)

1.3. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА ОБЩЕГО ВОЗДУХА БАРАБАННОГО КОТЛА

1.3.1. Общие сведения о системе

Система регулирования расхода общего воздуха предназначена для поддержания наиболее экономичного режима сжигания топлива в топке котла. Для полного сжигания единицы расхода топлива необходим определенный объем воздуха, количество которого зависит от вида, сорта и характеристик сжигаемого топлива.

Обычно в топку подается несколько больше воздуха, чем его требуется для полного сжигания топлива. Отношение количества воздуха, подаваемого в топку, к количеству воздуха, теоретически необходимого для полного сжигания топлива, называется *коэффициентом избытка воздуха в топке* α_T . Для газомазутных котлов $\alpha_{T\text{opt}} \approx 1,02 \div 1,05$, для твердотопливных – $\alpha_{T\text{opt}} \approx 1,2 \div 1,3$.

От значения α_T зависят потери теплоты (q_2 — с уходящими газами; q_3 — с химическим недожогом; q_4 — с механическим недожогом) и как следствие η_k — КПД (коэффициент полезного действия) котла.

Контроль α_T осуществляют по косвенным показателям. Наибольшее распространение получила оценка α_T по содержанию свободного кислорода в режимном сечении котла. Но из-за присосов воздуха в газовый тракт котла возрастает степень неопределенности контроля процесса горения по O_2 . Так присосы воздуха в количестве 5% удваивают показания содержания O_2 , что приводит к неэкономичному режиму работы оборудования. Более чувствительным и информативным параметром является концентрация оксида углерода (СО). Этот сигнал практически робастен к присосам воздуха в топку котла, поэтому при регулируемом химическом недожоге является наиболее представительным для регулирования избытка воздуха в топке котла.

Система регулирования расхода общего воздуха должна обеспечить:

- поддержание при постоянной заданной нагрузке котла содержания избыточного кислорода в дымовых газах с максимально допустимыми отклонениями $\pm 0,2\%$ — для газомазутных котлов и $\pm 0,5\%$ — для остальных котлов;
- протекание переходных процессов, вызываемых скачкообразным изменением нагрузки на 10% номинальной с максимальным отклонением в дымовых газах для газомазутных котлов — 0,3%, для остальных котлов — 1%.

1.3.2. Динамические характеристики объекта регулирования

Объект регулирования расхода общего воздуха барабанного котла состоит из двух участков:

- опережающего участка, представляющего собой участок воздушного тракта от напора дутьевых вентиляторов до места измерения расхода (давления) воздуха (V) с измерительным преобразователем;
- инерционного участка, представляющего собой участок газозвушного тракта котла от места измерения расхода (давления) воздуха до места измерения сигнала по O_2 (СО) с измерительным преобразователем.

Динамические свойства опережающего участка с достаточной для практических расчетов точностью могут быть представлены передаточной функцией вида

$$W_{HV}(p) = \frac{K_{HV} e^{-p\tau_{HV}}}{T_{HV} p + 1}, \quad (1.7)$$

где $K_{HV} = 1,5 \div 2$; $\tau_{HV} = 2 \div 3$ с; $T_{HV} = 10 \div 15$ с.

Динамические свойства инерционного участка также могут быть представлены передаточной функцией вида

$$W_{V_{O_2}}(p) = \frac{K_{V_{O_2}} e^{-p\tau_{V_{O_2}}}}{T_{V_{O_2}} p + 1}, \quad (1.8)$$

где $K_{V_{O_2}} = 0,5 \div 0,8$; $\tau_{V_{O_2}} = 20 \div 30$ с; $T_{V_{O_2}} = 40 \div 60$ с.

1.3.3. Структурная схема регулирования расхода общего воздуха

Система регулирования расхода общего воздуха является составной частью системы регулирования процесса горения в котле и строится как каскадная система с корректирующим и стабилизирующим регуляторами. В них стабилизирующий регулятор поддерживает соотношение топливо (теплота) – воздух, а корректирующий регулятор меняет это соотношение в зависимости от экономичности процесса горения.

На рис. 1.4 представлена система регулирования расхода общего воздуха для газомазутных котлов (в том числе и для прямоточных).

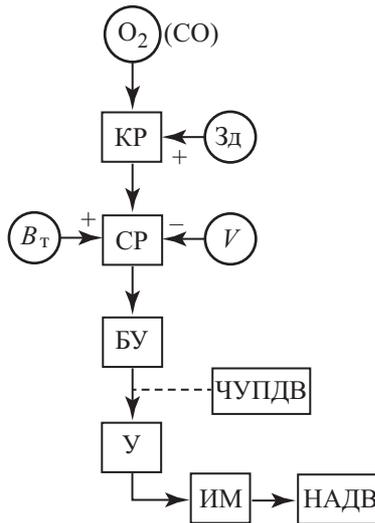


Рис. 1.4. Структурная схема регулирования расхода общего воздуха газомазутного котла: $O_2(CO)$ – концентрация кислорода (оксида углерода) в режимном сечении; V – расход воздуха; ЧУПДВ – частотный управляемый привод дутьевых вентиляторов; НАДВ – направляющий аппарат дутьевых вентиляторов (остальные обозначения см. на рис. 1.3)

Если расход топлива невозможно измерить с достаточной точностью, особенно твердого, то в этом случае используется система с сигналом по теплоте (рис. 1.5).

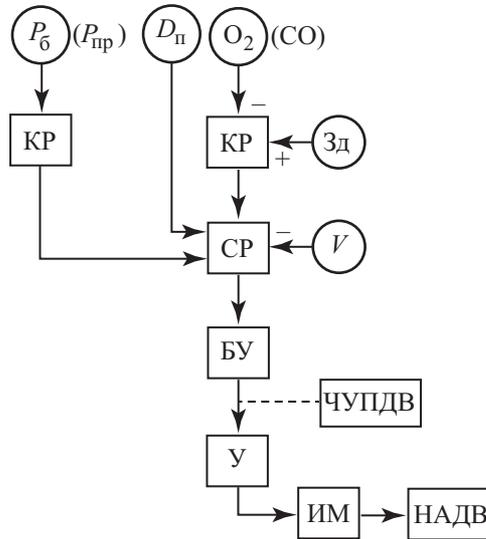


Рис. 1.5. Структурная схема регулирования расхода общего воздуха твердотопливного котла:

$P_{пр}$ – давление в зоне насыщения (промежуточной точке) пароводяного тракта прямоточного котла (остальные обозначения см. на рис. 1.3, 1.4)

1.4. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ РАЗРЕЖЕНИЯ В ТОПКЕ БАРАБАННОГО КОТЛА

1.4.1. Общие сведения о системе

Автоматическая система регулирования разрежения предназначена для поддержания материального соответствия между количеством газов, образующихся при сжигании топлива, и количеством газов, удаляемых из котла. Повышение давления в топке ведет к выбиванию дымовых газов из-за неплотности обшивки котла, а увеличение разрежения приводит к возрастанию присосов воздуха в топку, который не участвует в процессе горения, а увеличивает потери с уходящими газами. Резкое возрастание разрежения (до 200 кПА) может привести к срыву факела.

Система регулирования разрежения должна обеспечивать при стационарном режиме работы котла максимальное отклонение разрежения не более

± 20 Па, а при скачкообразном изменении нагрузки на 10% разрежение не должно изменяться более 30 Па.

1.4.2. Динамические характеристики объекта регулирования

Объектом регулирования разрежения в топке барабанного котла является участок газового тракта котла от измерительного преобразователя разрежения (S) до всаса дымососов газов (V_r) и может с достаточной степенью точности описываться аperiodическим звеном первого порядка с запаздыванием:

$$W_{V_r S}(p) = \frac{K_{V_r S} e^{-p\tau_{V_r S}}}{T_{V_r S} p + 1}, \quad (1.9)$$

где $K_{V_r S} = 1,5 \div 2,5$; $\tau_{V_r S} = 4 \div 5$ с; $T_{V_r S} = 20 \div 30$ с.

Передаточная функция участка от дутьевых вентиляторов (V_b) до измерительного преобразователя разрежения также может быть представлена аperiodическим звеном первого порядка с запаздыванием:

$$W_{V_b S}(p) = \frac{K_{V_b S} e^{-p\tau_{V_b S}}}{T_{V_b S} p + 1}, \quad (1.10)$$

где $K_{V_b S} = 1,2 \div 1,5$; $\tau_{V_b S} = 3 \div 5$ с; $T_{V_b S} = 10 \div 20$ с.

1.4.3. Структурная схема регулирования разрежения в топке

Система регулирования разрежения в топке котла тесно связана с системой регулирования расхода общего воздуха и является составной частью системы регулирования процесса горения. Данная система обычно представляет собой одноконтурную стабилизирующую АСР (рис. 1.6) (в том числе и для прямооточных котлов).

Динамическая связь между регуляторами расхода общего воздуха и разрежения выполняется в виде аperiodического звена первого порядка:

$$W_{\text{кдс}}(p) = \frac{K_{\text{кдс}}}{T_{\text{кдс}} p + 1}. \quad (1.11)$$

Динамическую связь целесообразно использовать для котлов, имеющих электрофильтры.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	3
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	4
ВВЕДЕНИЕ	6
1. СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ БАРАБАННОГО КОТЛА	7
1.1. Система регулирования питания барабанного котла	7
1.1.1. Общие сведения о системе	7
1.1.2. Динамические характеристики объекта регулирования	7
1.1.3. Структурная схема регулирования питания	9
1.2. Система регулирования расхода топлива (нагрузки) барабанного котла	10
1.2.1. Общие сведения о системе	10
1.2.2. Динамические характеристики объекта регулирования	10
1.2.3. Структурная схема регулирования расхода топлива (нагрузки)	11
1.3. Система регулирования расхода общего воздуха барабанного котла	12
1.3.1. Общие сведения о системе	12
1.3.2. Динамические характеристики объекта регулирования	13
1.3.3. Структурная схема регулирования расхода общего воздуха	14
1.4. Система регулирования разрежения в топке барабанного котла	15
1.4.1. Общие сведения о системе	15
1.4.2. Динамические характеристики объекта регулирования	16
1.4.3. Структурная схема регулирования разрежения в топке	16
1.5. Система регулирования температуры перегретого пара барабанного котла	17
1.5.1. Общие сведения о системе	17
1.5.2. Динамические характеристики объекта регулирования	18
1.5.3. Структурная схема регулирования температуры перегретого пара	18
1.6. Система регулирования непрерывной продувки барабанного котла	19
1.6.1. Общие сведения о системе	19
1.6.2. Динамические характеристики объекта регулирования	19
1.6.3. Структурная схема регулирования непрерывной продувки	20
2. СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛА	22
2.1. Система регулирования питания прямоточного котла	22
2.1.1. Общие сведения о системе	22
2.1.2. Динамические характеристики объекта регулирования	22
2.1.3. Структурная схема регулирования питания	23
2.2. Система регулирования нагрузки прямоточного котла	24
2.2.1. Общие сведения о системе	24
2.2.2. Динамические характеристики объекта регулирования	24
2.2.3. Структурная схема регулирования нагрузки	25

2.3.	Система регулирования температуры перегретого пара прямоточного котла	27
2.3.1.	Общие сведения о системе	27
2.3.2.	Динамические характеристики объекта регулирования	27
2.3.3.	Структурная схема регулирования температуры перегретого пара	28
2.4.	Система регулирования температуры промежуточного перегрева пара прямоточного котла	28
2.4.1.	Общие сведения о системе	28
2.4.2.	Динамические характеристики объекта регулирования	29
2.4.3.	Структурная схема регулирования температуры промежуточного перегрева пара. . .	30
3.	СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС	31
3.1.	Система регулирования редуционно-охлаждающей установки	31
3.1.1.	Общие сведения о системе	31
3.1.2.	Динамические характеристики объекта регулирования	31
3.1.3.	Структурная схема регулирования редуционно-охлаждающей установки	32
3.2.	Система регулирования подогревателей сетевой воды	33
3.2.1.	Общие сведения о системе	33
3.2.2.	Динамические характеристики объекта регулирования	33
3.2.3.	Структурная схема регулирования подогревателей сетевой воды	34
4.	СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ТЭС И АЭС	35
4.1.	Система регулирования мощности энергоблока ТЭС при первичном управлении турбиной	35
4.1.1.	Общие сведения о системе	35
4.1.2.	Динамические характеристики объекта регулирования	36
4.1.3.	Структурная схема регулирования мощности энергоблока	36
4.2.	Система регулирования мощности энергоблока ТЭС при первичном управлении котлом	37
4.2.1.	Общие сведения о системе	37
4.2.2.	Динамические характеристики объекта регулирования	38
4.2.3.	Структурная схема регулирования мощности энергоблока	38
4.3.	Система регулирования мощности водо-водяных реакторов АЭС.	39
4.3.1.	Общие сведения о системе	39
4.3.2.	Динамические характеристики объекта регулирования	40
4.3.3.	Структурная схема регулирования мощности водо-водяного реактора.	40
5.	ОПЫТ АВТОМАТИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ НА БАЗЕ КТС SIEMENS	42
5.1.	Проектирование регулирования с SIMATIC S7	42
5.1.1.	Обзор продукции регулирования SIMATIC	42
5.1.2.	Выбор изделий регулирования	45
5.1.2.1.	Техника подключения.	46
5.1.2.2.	Количественные параметры и динамика регулирования	48

5.1.2.3.	Критерий качества и точность регулирования	52
5.1.2.4.	Требования надежности	54
5.1.2.5.	Обслуживание и визуализация	55
5.1.2.6.	Комплексность и гибкость.	55
5.1.2.7.	Помощь при наладке: автонастройщик PID Self-Tuner	55
5.1.2.8.	Регулятор со встроенным настройщиком	57
5.1.3.	Преимущества программных регуляторов и функциональных модулей FM	60
5.2.	Исполнительные устройства и сенсоры регулирования	61
5.2.1.	Влияние исполнительных органов на регулирование	61
5.2.1.1.	Контакторы, реле и полупроводниковые реле	67
5.2.1.2.	Вентили и задвижки	67
5.2.1.3.	Заслонки и дроссельные заслонки	70
5.2.1.4.	Магнитные вентили	70
5.2.1.5.	Насосы и моторы с изменяемым числом оборотов	70
5.2.1.6.	Исполнительные звенья дозирования	71
5.2.2.	Влияние измерительной техники на регулирование	72
5.2.2.1.	Измерительные сигналы непосредственно подключаемых термоэлементов	73
5.2.2.2.	Измерительные сигналы непосредственно подключенного резисторного термометра	76
5.2.2.3.	Стандартные сигналы (0...10 В, 4...20 мА или 0...20 мА)	78
5.2.2.4.	Принцип измерения при аналоговом считывании	79
5.2.2.5.	Разрешение, точность и воспроизводимость	82
5.2.3.	Подключение исполнительных устройств и сенсоров к программному логическому контроллеру	82
5.3.	Отображение регулирования	84
5.3.1.	Мнемонические схемы по DIN 28004	85
5.3.2.	Проектная документация по DIN 19227, часть 1	87
5.3.3.	Регулятор на панели проектирования	90
5.3.3.1.	Программное регулирование в текстовом представлении STL	90
5.3.3.2.	Модульное регулирование в представлении CFC	91
5.3.3.3.	Параметрирование компактного регулирования	92
5.3.4.	Программный регулятор на панели обслуживания	93
5.3.5.	Панель обслуживания аппаратного регулятора	95
5.3.5.1.	Обслуживание регулирующих FM	95
5.3.5.2.	Обслуживание регуляторов SIPART	96
5.4.	Режимы работы	96
5.4.1.	Обзор режимов работы	96
5.4.2.	Режимы работы ручной и автоматический	98
5.4.2.1.	Плавное переключение из ручного режима в автоматический	98
5.4.2.2.	Плавное переключение из автоматического режима в ручной	99
5.4.2.3.	Переключение режимов из ручного в автоматический со скачком	100
5.4.2.4.	Переключение режимов из автоматического в ручной со скачком	101
5.4.2.5.	Переключение из автоматического режима в режим безопасного управляющего воздействия	102
5.4.2.6.	Переключение из режима SPC или DDC в режим уставки безопасности	102
5.4.3.	Запуск регулятора (программного) после перезапуска процессора	102

5.4.3.1.	Запуск регулирующего контура со скачком	103
5.4.3.2.	Плавный запуск регулирующего контура	103
5.4.4.	Режимы работы после включения и выключения регулятора	105
5.4.4.1.	Управляемый запуск контура управления	105
5.4.4.2.	Управляемый запуск регулирующего контура	107
5.4.5.	Безопасные режимы работы	107
5.4.5.1.	SPC-резерв	107
5.4.5.2.	DDC-резерв	108
5.4.5.3.	Уставка безопасности	109
5.4.5.4.	Безопасное управляющее воздействие	109
5.5.	Функции процессного регулятора	109
5.5.1.	Элементарные функции в ветви уставки	110
5.5.1.1.	Внутреннее задание уставки	110
5.5.1.2.	Внешнее задание уставки	110
5.5.1.3.	Уставка плавного перехода	110
5.5.1.4.	Ограничение уставки	111
5.5.2.	Элементарные функции ветви действительного значения	111
5.5.2.1.	Фильтр	111
5.5.2.2.	Нормирование	112
5.5.2.3.	Линеаризация	112
5.5.2.4.	Контроль за действительным значением	113
5.5.3.	Элементарные функции определения регулирующей разности	113
5.5.3.1.	Порог реагирования	113
5.5.3.2.	Образование отношений в регуляторе отношений	114
5.5.4.	Элементарные функции алгоритма	114
5.5.4.1.	Standard PI- или PID-алгоритм с D-звеном в прямой ветви	115
5.5.4.2.	PI- или PID-алгоритм с D-звеном в цепи обратной связи	116
5.5.4.3.	PI-алгоритм с D-звеном в цепи возмущения	116
5.5.4.4.	P-алгоритмы	117
5.5.5.	Элементарные функции выдачи сигнала	119
5.5.5.1.	Ограничение регулирующего воздействия	119
5.5.5.2.	Элементарные функции образования бинарных сигналов	119
5.5.5.3.	Ограничение ручного управляющего воздействия	119
5.6.	Структуры регулирования	119
5.6.1.	Подключение возмущения	120
5.6.2.	Регулирование с предупреждением	122
5.6.3.	Регулирование отношения	123
5.6.4.	Каскадное регулирование	124
5.6.5.	Регулирование с отдельными границами	129
5.6.6.	Регулирование вспомогательных величин	130
5.6.7.	Избирательное регулирование	131
5.6.8.	Регулирование множества величин	134
5.6.8.1.	Отрицательная связь	134
5.6.8.2.	Положительная связь	135
5.6.8.3.	Регулирование с предсказанием на основе модели	138
5.7.	Вызов программного регулятора в PLC	143

5.7.1. Уровни временного прерывания и интервалы считывания	143
5.7.2. Вызов в SIMATIC TIA	144
5.7.2.1. Деление частей программы на циклические и с прерыванием	144
5.7.2.2. Распределение временных тактов и интервалов считывания функциональных звеньев	144
5.7.2.3. Распределение временных тактов с помощью модуля LP_SCHED	147
5.7.2.4. Построение модульного регулирования	147
5.7.3. Вызов в SIMATIC PCS7	149
5.8. Ввод в действие процессных регуляторов	151
5.8.1. Первые шаги	151
5.8.1.1. Инсталляция и проверка сигнальных связей	152
5.8.1.2. Направление действия процессного регулятора	152
5.8.1.3. Предварительная установка параметров регулирования	153
5.8.1.4. Линеаризация значений процесса	154
5.8.1.5. Установка импульсных формирователей	156
5.8.1.6. Установка каскадных регуляторов	158
5.8.2. Регистрация переходной характеристики процесса	159
5.8.2.1. Перечень проверок при подготовке	159
5.8.2.2. Первая запись	161
5.8.2.3. Участки (объекты) регулирования с чисто инерционной характеристикой	162
5.8.2.4. Температурные участки с активным нагреванием и пассивным охлаждением	164
5.8.2.5. Температурные участки с активным нагреванием и активным охлаждением	166
5.8.3. Настроечное регулирование – выбор, границы и оценка	167
5.8.3.1. Установка интервала считывания при программном регулировании	169
5.8.3.2. Установка по Чену – Хроунзу – Ресвику	170
5.8.3.3. Настроечное регулирование участков с запаздыванием по Циглеру – Николсу	171
5.8.3.4. Настроечное регулирование по скорости нарастания	172
5.8.3.5. Настроечное регулирование для последующей оптимизации	173
5.8.4. Ввод в действие с помощью автонастройщика PID Self-Tuner	175
5.8.5. PCS7-PID-Tuner	178
ПРИЛОЖЕНИЯ	181
<i>Приложение 1. ПТК КОНТАР</i>	181
<i>Приложение 2. ПТК ОБЕН</i>	183
<i>Приложение 3. ПТК OMRON</i>	186
<i>Приложение 4. Примеры реализации систем автоматического регулирования на аппаратуре различных производителей</i>	196
ЛИТЕРАТУРА	210