

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Тепловые электрические станции»

В. И. Назаров

СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЭС И АЭС

Учебно-методическое пособие
для студентов специальностей

1-43 01 04 «Тепловые электрические станции»;
1-43 01 08 «Проектирование и эксплуатация атомных
электрических станций»; 1-53 01 04 «Автоматизация
и управление теплоэнергетическими процессами»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области энергетики и энергетического оборудования*

Минск
БНТУ
2021

УДК 621.1:681.51(076.58)

ББК 32.965я73

Н19

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра «Электроники» УО «БГУИР», зав. кафедрой,

канд. техн. наук, доцент *С. М. Сацук*;

начальник турбинного участка филиала «Инженерный центр»

ОАО «Белэнергоремналадка», канд. техн. наук *А. М. Таращук*

Назаров, В. И.

Н19

Системы регулирования теплоэнергетических процессов на ТЭС и АЭС : учебно-методическое пособие для студентов специальностей 1-43 01 04 «Тепловые электрические станции»; 1-43 01 08 «Проектирование и эксплуатация атомных электрических станций»; 1-53 01 04 «Автоматизация и управление теплоэнергетическими процессами» / В. И. Назаров. – Минск : БНТУ, 2021. – 54 с.

ISBN 978-985-583-704-7.

Данное учебно-методическое пособие предназначено для студентов при проведении курсового и дипломного проектирования по курсам «Теория автоматического регулирования», «Теория автоматического управления», «Проектирование устройств защиты и автоматики».

УДК 621.1:681.51(076.58)

ББК 32.965я73

ISBN 978-985-583-704-7

© Назаров В. И., 2021

© Белорусский национальный
технический университет, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1. Система регулирования питания барабанного котла	7
1.1. Общие сведения о системе.....	7
1.2. Динамические характеристики объекта регулирования.....	7
1.3. Структурная схема регулирования питания.....	9
2. Система регулирования расхода топлива (нагрузки) барабанного котла	11
2.1. Общие сведения о системе.....	11
2.2. Динамические характеристики объекта регулирования.....	11
2.3. Структурная схема регулирования расхода топлива (нагрузки).....	13
3. Система регулирования расхода общего воздуха котла	15
3.1. Общие сведения о системе.....	15
3.2. Динамические характеристики объекта регулирования.....	16
3.3. Структурная схема регулирования расхода общего воздуха.....	17
4. Система регулирования разрежения в топке котла	20
4.1. Общие сведения о системе.....	20
4.2. Динамические характеристики объекта регулирования разрежения в топке котла	20
4.3. Структурная схема регулирования разрежения в топке котла	21
5. Система регулирования температуры перегретого пара барабанного котла	23
5.1. Общие сведения о системе.....	23
5.2. Динамические характеристики объекта регулирования.....	23
5.3. Структурная схема регулирования температуры перегретого пара	24

6. Система регулирования непрерывной продувки барабанного котла	26
6.1. Общие сведения о системе	26
6.2. Динамические характеристики объекта регулирования	26
6.3. Структурная схема регулирования непрерывной продувки	27
7. Система регулирования питания прямоточного котла	29
7.1. Общие сведения о системе	29
7.2. Динамические характеристики объекта регулирования	29
7.3. Структурная схема регулирования питания прямоточного котла	31
8. Система регулирования нагрузки прямоточного котла	32
8.1. Общие сведения о системе	32
8.2. Динамические характеристики объекта регулирования	32
8.3. Структурная схема регулирования нагрузки прямоточного котла	33
9. Система регулирования температуры перегретого пара прямоточного котла	35
9.1. Общие сведения о системе	35
9.2. Динамические характеристики объекта регулирования	35
9.3. Структурная схема регулирования температуры перегретого пара	36
10. Система регулирования температуры промежуточного перегрева пара прямоточного котла	37
10.1. Общие сведения о системе	37
10.2. Динамические характеристики объекта регулирования	38
10.3. Структурная схема регулирования температуры промежуточного перегрева пара	38

11. Система регулирования	
редукционно-охладительной установки	40
11.1. Общие сведения о системе	40
11.2. Динамические характеристики объекта	
регулирования	40
11.3. Структурная схема регулирования	
редукционно-охладительной установки	41
12. Система регулирования подогревателей	
сетевой воды	42
12.1. Общие сведения о системе	42
12.2. Динамические характеристики объекта	
регулирования	42
12.3. Структурная схема регулирования	
подогревателей сетевой воды	43
13. Система регулирования мощности энергоблока	
ТЭС при первичном управлении турбиной	45
13.1. Общие сведения о системе	45
13.2. Динамические характеристики объекта	
регулирования	46
13.3. Структурная схема регулирования мощности	
энергоблока	47
14. Система регулирования мощности энергоблока	
ТЭС при первичном управлении котлом	48
14.1. Общие сведения о системе	48
14.2. Динамические характеристики объекта	
регулирования	49
14.3. Структурная схема регулирования мощности	
энергоблока	49
15. Система регулирования мощности	
водо-водяных реакторов АЭС	50
15.1. Общие сведения о системе	50
15.2. Динамические характеристики объекта	
регулирования	52
15.3. Структурная схема регулирования мощности	
водо-водяного реактора	52
Литература	54

ВВЕДЕНИЕ

Основу современной энергетики составляют тепловые электрические станции (ТЭЦ, ГРЭС, ФЭС). 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 учебно-методическом пособии рассматриваются наиболее распространенные системы регулирования и их структуры для основного теплоэнергетического оборудования, т. е. для котлов (барабанных, прямоточных) и турбин в составе энергоблоков.

На ряду с этим в данном учебно-методическом пособии рассматриваются и динамические характеристики объектов регулирования, необходимые для параметрической оптимизации систем регулирования.

Учебно-методическое пособие предназначено для курсового и дипломного проектирования систем регулирования основного теплоэнергетического оборудования ТЭС.

1. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПИТАНИЯ БАРАБАННОГО КОТЛА

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

АСР питания барабанного котла должна обеспечить удержание уровня 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 установкой защиты от понижения уровня в барабане котла, с одной стороны, и уставкой открытия аварийного слива, с другой. Эти пределы определяют безопасность работы котла, превышение их вызывает аварийную ситуацию.

1.2. 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:

$$F(\rho_B - \rho_{\Pi}) \frac{dH}{dt} = W - D_{\Pi}, \quad (1.1)$$

где F – площадь зеркала испарения, м²;

ρ_B, ρ_{Π} – плотность воды и насыщенного пара, кг/м³;

W и D_{Π} – расходы воды и пара соответственно, кг/с.

Хотя на уровень 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:

$$W_{HW}(p) = \frac{e^{-p\tau}}{Tp}, \quad (1.2)$$

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 в барабане котла при различных возмущениях. Для возмущений расходом питательной воды, расходом пара, расходом топлива и температурой питательной воды присуще явление «набухания уровня», и в этом случае кривая разгона будет иметь вид, как на рис. 1.1, *а*, в остальных случаях – рис. 1.1, *б*.

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 повышается 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.

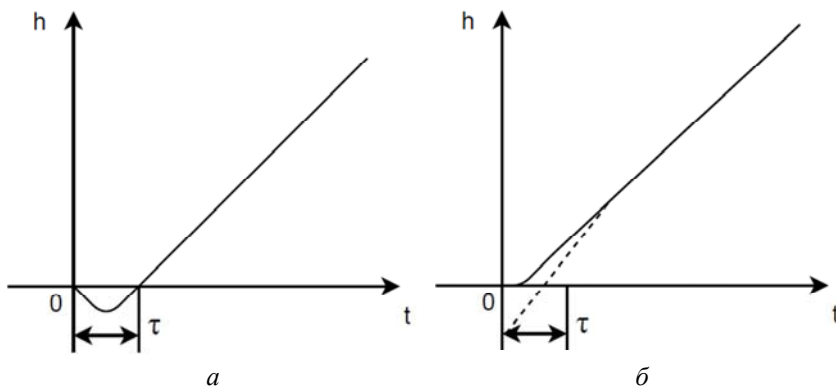


Рис. 1.1. переходные процессы по уровню при различных возмущениях:
a – при некипящем экономайзере,
б – при кипящем экономайзере

1.3. Структурная схема регулирования питания

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

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

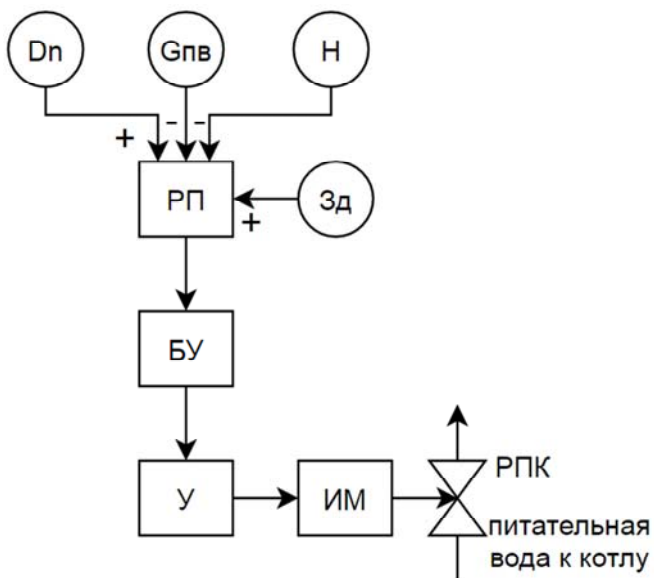


Рис. 1.2. Структурная схема регулирования питания барабанного котла:

БУ – блок управления; У – усилитель; ИМ – исполнительный механизм;
 РПК – регулирующий питательный клапан; D_n – расход пара,
 $G_{пв}$ – расход питательной воды; H – уровень в барабане котла;
 Зд – датчик

2. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА (НАГРУЗКИ) БАРАБАННОГО КОТЛА

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, его расходу 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.

Поэтому 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 ± 2 % номинального;
- поддержание в базовом режиме работы котла расхода пара с отклонением не более ± 3 % заданного.

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 расхода топлива B_T – давление пара P_{II} за котлом:

$$W_{\Delta B_T \Delta P_{II}}(p) = \frac{K_{\Delta B_T \Delta P_{II}} e^{-p\tau_{\Delta B_T \Delta P_{II}}}}{T_{\Delta B_T \Delta P_{II}} p + 1}, \quad (2.1)$$

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

– участок задания Z_d – расход топлива B_T к котлу:

$$W_{Z_d \Delta B_T}(p) = \frac{K_{Z_d \Delta B_T} e^{-p\tau_{Z_d \Delta B_T}}}{T_{Z_d \Delta B_T} p + 1}, \quad (2.2)$$

где $K_{Z_d \Delta B_T} = 1-1,5$; $\tau_{Z_d \Delta B_T} = 1-1,5$ с; $T_{Z_d \Delta B_T} = 3-5$ с.

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

– участок задания Z_d – «теплота» Q_T :

$$W_{Z_d \Delta Q_T}(p) = \frac{K_{Z_d \Delta Q_T} e^{-p\tau_{Z_d \Delta Q_T}}}{T_{Z_d \Delta Q_T} p + 1}, \quad (2.3)$$

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

– участок задания Z_d – давление пара P_{II} за котлом:

$$W_{Z_d \Delta P_{II}}(p) = \frac{K_{Z_d \Delta P_{II}} e^{-p\tau_{Z_d \Delta P_{II}}}}{T_{Z_d \Delta P_{II}} p + 1}, \quad (2.4)$$

где $K_{Z_d \Delta P_{II}} = 0,5-2,0$; $\tau_{Z_d \Delta P_{II}} = 30-35$ с; $T_{Z_d \Delta P_{II}} = 200-250$ с.

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 регулятор 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 и осуществляет 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. 2.1 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.

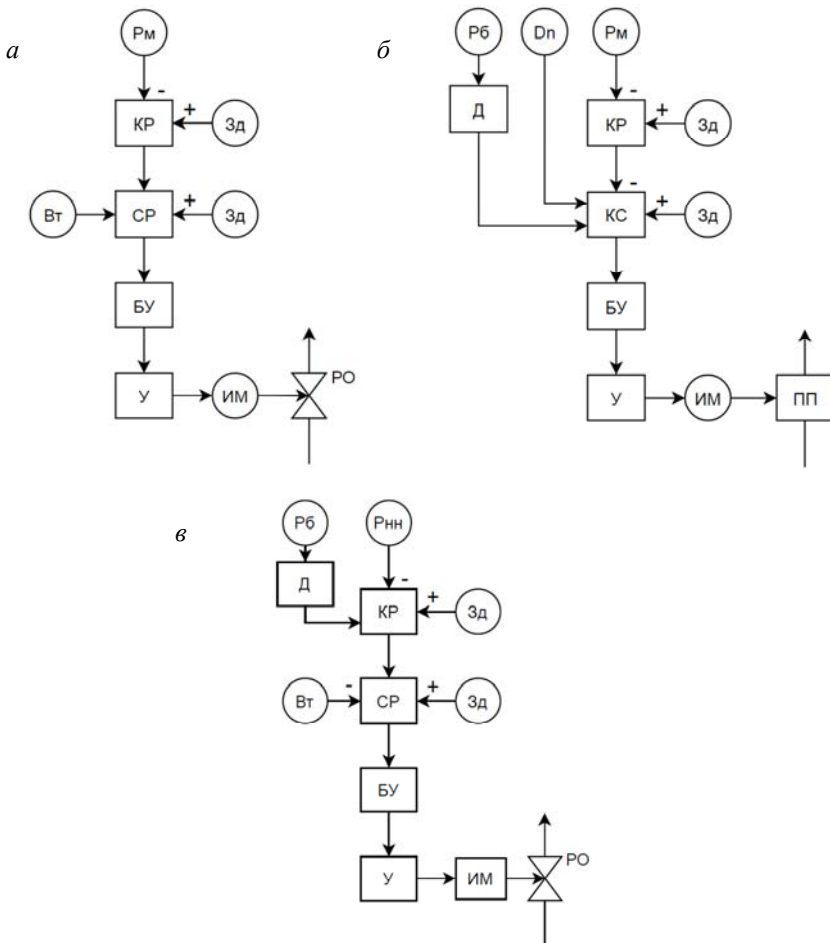


Рис. 2.1. Структурная схема регулирования расхода топлива (нагрузки) для:

- a* – газомазутного барабанного котла с поперечными связями;
 - б* – твердотопливного барабанного котла с поперечными связями;
 - в* – для газомазутного котла на блочных ТЭС;
- КР – корректирующий регулятор; СР – стабилизирующий регулятор;
 $В_T$ – расход газомазутного топлива; P_M – давление в главной паровой магистрали; $P_б$ – давление в барабане котла;
 Д – дифференциатор; ПП – питатель твердого топлива;
 РО – регулирующий орган. Остальные обозначения см. рис. 1.2

3. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА ОБЩЕГО ВОЗДУХА КОТЛА

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 $\alpha_{Topt} \approx 1,02-1,05$, для твердотопливных $\alpha_{Topt} \approx 1,2-1,3$.

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 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 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 здесь является концентрация оксида углерода CO. Этот сигнал практически робастен к присосам воздуха в топку котла,

при регулируемом химнедожоге 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 O_2 в дымовых газах для газомазутных котлов – $0,3\%$, для остальных котлов – $1\% O_2$.

3.2. Динамические характеристики объекта регулирования

Объект регулирования здесь состоит из двух участков:

- опережающий, представляющий собой участок воздушного тракта от напора дутьевых вентиляторов до места измерения расхода (давления) воздуха с измерительным преобразователем;

- инерционный, представляющий собой участок газозвушного тракта котла от места измерения расхода (давления) воздуха до места измерения сигнала по O_2 (CO) с измерительным преобразователем.

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

$$W_{HV}(p) = \frac{K_{HV} e^{-p\tau_{HV}}}{T_{HV} p + 1}, \quad (3.1)$$

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

Динамические свойства инерционного участка также могут быть представлены передаточной функцией вида

$$W_{VO_2}(p) = \frac{K_{VO_2} e^{-p\tau_{VO_2}}}{T_{VO_2} p + 1}, \quad (3.2)$$

где $\tau_{VO_2} = 20-30$ с; $T_{VO_2} = 40-60$ с; $K_{VO_2} = 0,5-0,8$.

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. 3.1 представлена система регулирования расхода общего воздуха для газомазутных котлов.

Если расход топлива невозможно измерить с достаточной точностью, особенно твердого, то используется в этом случае система с сигналом по теплоте (рис. 3.2).

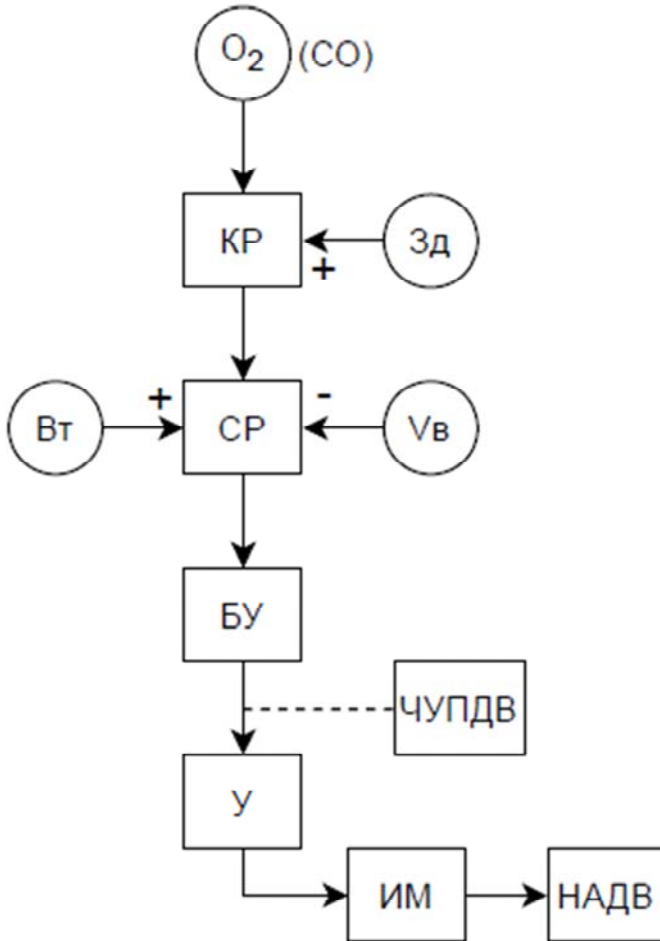


Рис. 3.1. Структурная схема регулирования расхода общего воздуха газомазутного котла:

$O_2(CO)$ – концентрация кислорода (оксида углерода) в режимном сечении; V – расход воздуха; ЧУПДВ – частотный управляемый привод дутьевых вентиляторов;

НАДВ – направляющий аппарат дутьевых вентиляторов.

Остальные обозначения см. рис. 2.1

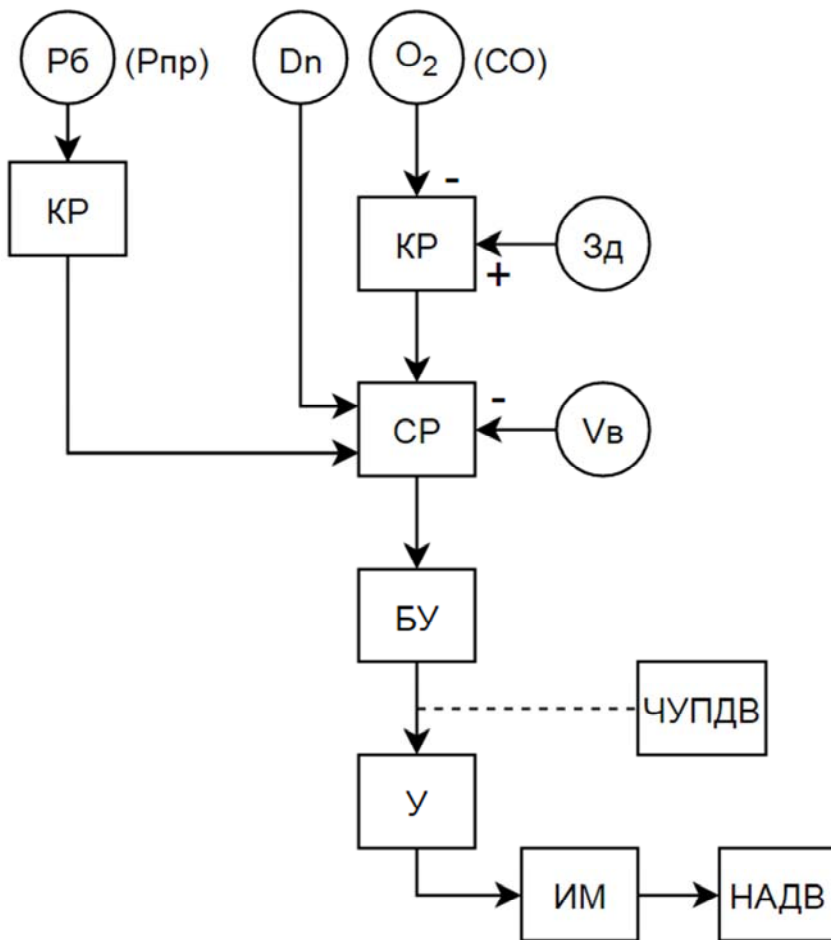


Рис. 3.2. Структурная схема регулирования расхода
 общего воздуха твердотопливного котла:
 $P_{пр}$ – давление в зоне насыщения (промежуточной точке)
 пароводяного тракта прямооточного котла.
 Остальные обозначения см. рис. 2.1, 3.1

4. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ РАЗРЕЖЕНИЯ В ТОПКЕ КОТЛА

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 увеличению присосов воздуха в топку, который не участвует в процессе горения, а приводит к увеличению потерь с уходящими газами. Резкое увеличение 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.

4.2. Динамические характеристики объекта регулирования

Объектом регулирования здесь является участок газового тракта котла от измерительного преобразователя разрежения до всаса дымососов и может с достаточной степенью точности описываться аperiодическим звеном первого порядка с запаздыванием:

$$W_{V_r S}(p) = \frac{K_{V_r S} e^{-p\tau_{V_r S}}}{T_{V_r S} p + 1}, \quad (4.1)$$

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

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

$$W_{V_B S}(p) = \frac{K_{V_B S} e^{-p\tau_{V_B S}}}{T_{V_B S} p + 1}, \quad (4.2)$$

где $\tau_{V_B S} = 3-5$ с; $T_{V_B S} = 10-20$ с; $T_{V_B S} = 10-20$ с.

4.3. Структурная схема регулирования разрежения в топке котла

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 одно-контурную стабилизирующую АСР.

Динамическая связь (КДС) между регуляторами расхода общего воздуха и разрежения выполняется в виде апериодического звена первого порядка:

$$W_{КДС}(p) = \frac{K_{КДС}}{T_{КДС} p + 1}. \quad (4.3)$$

Динамическую связь целесообразно использовать для котлов, имеющих электрофильтры.

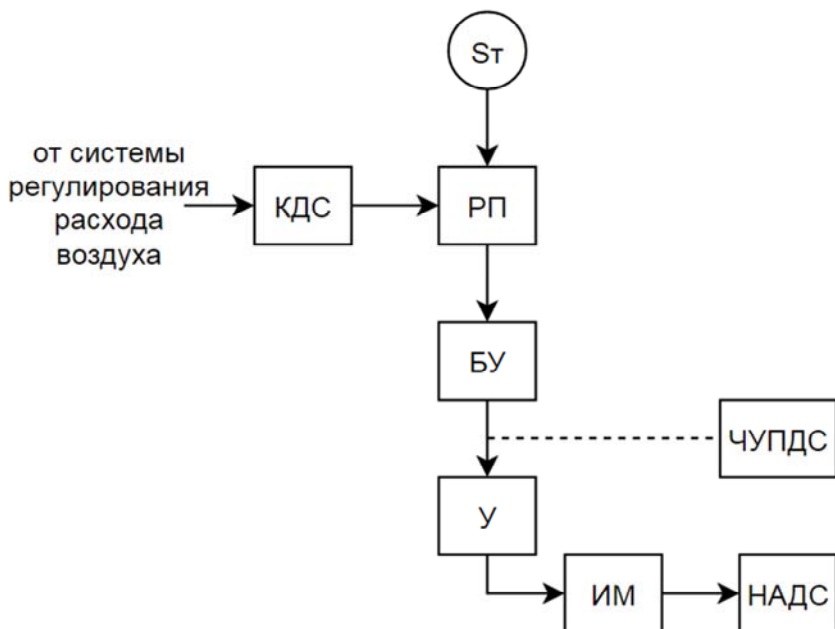


Рис. 4.1. Структурная схема регулирования разрежения в топке котла:
 S_T – сигнал по разрежению в топке котла; НАДС – направляющий аппарат дымососов; ЧУПДС – частотно-управляемый привод дымососов; КДС – комплект динамической связи.
 Остальные обозначения см. рис. 1.2

5. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА БАРАБАННОГО КОТЛА

5.1. Общие сведения о системе

Система регулирования температуры перегретого пара предназначена для поддержания заданного температурного режима в паровом тракте барабанного котла.

Система регулирования температуры перегретого пара должна:

- поддерживать заданное значение температуры перегретого пара на выходе котла с максимальным отклонением менее 1 % номинального значения температуры;
- гарантировать протекание переходных процессов, вызываемых скачкообразными изменениями заданного значения нагрузки на 10 % с максимальным отклонением температуры свежего пара на выходе котла не более 8 °С.

Точность поддержания заданного значения температуры свежего пара на выходе из котла существенно влияет на экономичность его работы и долговечность металла пароперегревателя.

На температуру пара оказывает влияние большое количество возмущений, из них наиболее существенными являются нагрузка котла, шлакование топки, загрязнение поверхностей нагрева, температура питательной воды, избыток воздуха.

Для регулирования температуры перегретого пара барабанного котла в основном применяется смешивание путем впрыска собственного конденсата.

5.2. Динамические характеристики объекта регулирования

Объектом регулирования здесь является участок парового тракта котла от пароохладителя до измерительного преобразователя температуры пара (опережающий участок) и инерцион-

ный участок, включающий в себя собственно пароперегреватель до измерительного преобразователя температуры пара.

Опережающий участок с достаточной степенью точности описывается аperiodическим звеном первого порядка с запаздыванием:

$$W_{Gt}(p) = \frac{K_{Gt} e^{-p\tau_{Gt}}}{T_{Gt}p + 1}, \quad (5.1)$$

где $\tau_{Gt} = 3-5$ с; $T_{Gt} = 30-40$ с; $K_{Gt} = 1,5-2$.

Передаточная функция участка пароперегревателя – измерительный преобразователь температуры пара также может быть представлен аperiodическим звеном первого порядка с запаздыванием:

$$W_{tt}(p) = \frac{K_{tt} e^{-p\tau_{tt}}}{T_{tt}p + 1}, \quad (5.2)$$

где $\tau_{tt} = 50-70$ с; $T_{tt} = 200-250$ с; $K_{tt} = 0,8-1,2$.

5.3. Структурная схема регулирования температуры перегретого пара

В практике для барабанных котлов в основном применяется каскадная система регулирования с исчезающим импульсом из промежуточной точки.

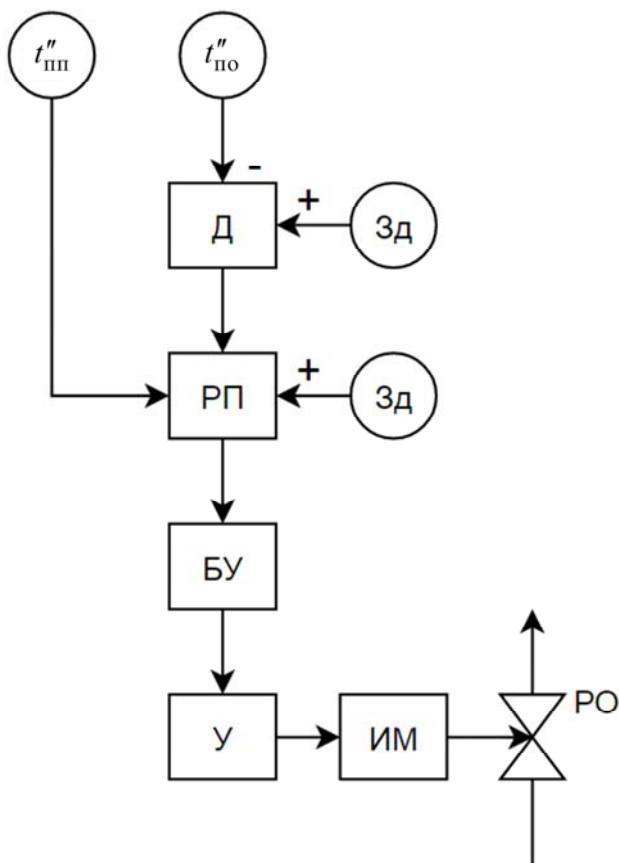


Рис. 5.1. Структурная схема регулирования температуры перегретого пара:

$t''_{\text{по}}$ – сигнал по температуре пара за пароохладителем;

$t''_{\text{пп}}$ – сигнал по температуре пара за пароперегревателем.

Остальные обозначения см. предыдущие структурные схемы

6. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОДУВКИ БАРАБАННОГО КОТЛА

6.1. Общие сведения о системе

Система регулирования непрерывной продувки предназначена для поддержания общего солесодержания котловой воды в пределах нормы путем удаления избытка солей, скапливающихся в котловой воде в процессе парообразования.

Повышение солесодержания может привести к уносу солей котловой воды в пароперегреватель и турбину, что приводит к интенсивному накипеобразованию и ухудшению теплообмена и даже к перегреву в местах образования накипи.

6.2. Динамические характеристики объекта регулирования

Объектом регулирования здесь является участок, включающий измерительный преобразователь солемера, и участок, включающий трубопроводы и измерительный преобразователь расходомера продувочной воды.

Первый участок является инерционным и в основном определяется динамическими характеристиками солемера с передаточной функцией аperiodического звена с запаздыванием:

$$W_{\text{NaCl}}(p) = \frac{K_{\text{NaCl}} e^{-p\tau_{\text{NaCl}}}}{T_{\text{NaCl}}p + 1}, \quad (6.1)$$

где $\tau_{\text{NaCl}} = 60\text{--}100$ с; $T_{\text{NaCl}} = 400\text{--}600$ с; $K_{\text{NaCl}} = 0,8\text{--}1,0$.

Второй участок является опережающим и также определяется динамическими характеристиками расходомера продувочной воды с передаточной функцией аperiodического звена с запаздыванием:

$$W_{G_{\text{пр}}} (p) = \frac{K_{G_{\text{пр}}} e^{-p\tau_{G_{\text{пр}}}}}{T_{G_{\text{пр}}} p + 1}, \quad (6.2)$$

где $\tau_{G_{\text{пр}}} = 4-6$ с; $T_{G_{\text{пр}}} = 15-20$ с; $K_{G_{\text{пр}}} = 1,5-2$.

6.3. Структурная схема регулирования непрерывной продувки

Для регулирования непрерывной продувки обычно используются двух- или трехимпульсные схемы, см. рис. 6.1 и 6.2.

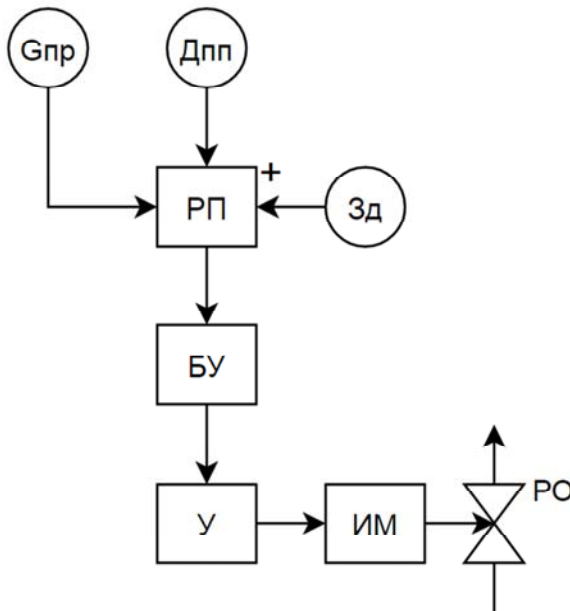


Рис. 6.1. Структурная схема регулирования непрерывной продувки двухимпульсная:

$G_{\text{пр}}$ – сигнал по расходу продувочной воды, остальные обозначения см. предыдущие структурные схемы

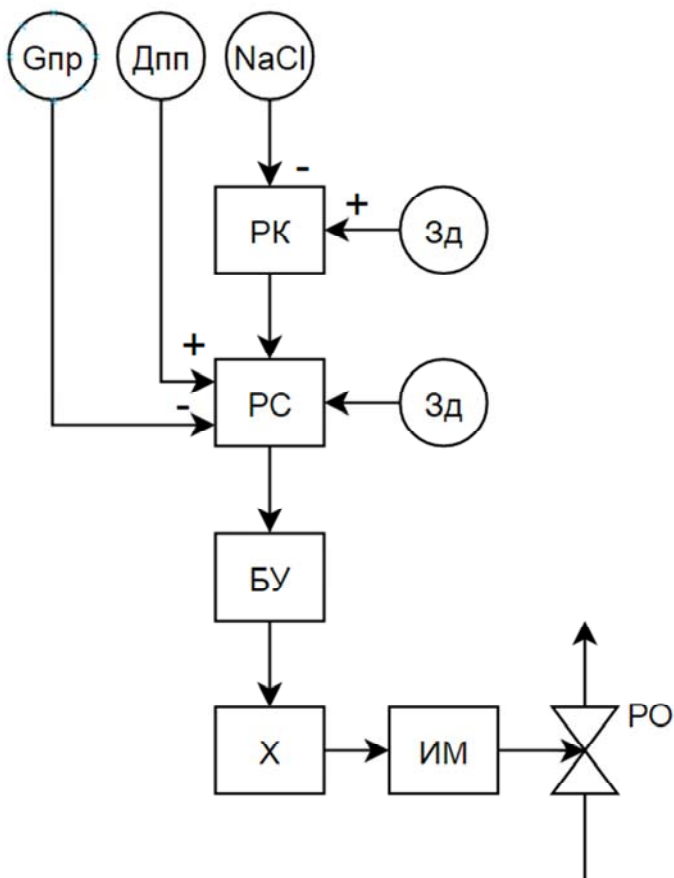


Рис. 6.2. Структурная схема регулирования непрерывной продувки трехимпульсная:

$NaCl$ – сигнал по солесодержанию, остальные обозначения см. предыдущие структурные схемы

7. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПИТАНИЯ ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛА

7.1. Общие сведения о системе

В типовых схемах регулирования питания прямоточного котла расход питательной воды приводится в соответствии с изменяющимся в зависимости от режима расходом топлива. При этом расход питательной воды регулируют таким образом, чтобы поддержать заданное значение температуры пара в промежуточной точке пароводяного тракта (обычно за верхней радиационной частью). При регулировании расхода питательной воды изменяется перепад давления на РПК (регулирующий питательный клапан) и здесь вступает в работу второй контур, который приводит перепад давления на РПК, равный первоначальному.

Такое построение системы регулирования питания в виде двух контуров, связанных между собой лишь динамическими связями, обеспечивает гибкость системы, компенсирует динамические отклонения в переходном процессе параметров пара, отбираемого на турбопривод. Схема обеспечивает надежное питание котла в случае ограничения по тем или иным причинам диапазона изменения частоты вращения приводной турбины, а также при переключении с турбонасоса на электронасос или изменении гидравлического сопротивления пароводяного тракта.

7.2. Динамические характеристики объекта регулирования

Объектом регулирования здесь является участок, включающий в себя участок трубопровода от РПК до измерительного преобразователя расхода питательной воды. Этот участок является опережающим. Второй участок – инерционный, включающий пароводяной тракт котла с измерительным преобра-

зователем температуры пара за ВРЧ. Опережающий участок, с приемлемой точностью, может быть представлен апериодическим звеном первого порядка с запаздыванием:

$$W_{G_{\text{пв}}}(p) = \frac{K_{G_{\text{пв}}} e^{-p\tau_{G_{\text{пв}}}}}{T_{G_{\text{пв}}} p + 1}, \quad (7.1)$$

где $\tau_{G_{\text{пв}}} = 10 - 15$ с; $T_{G_{\text{пв}}} = 50 - 70$ с; $K_{G_{\text{пв}}} = 1,5 - 2,5$.

Инерционный участок может быть представлен апериодическим звеном второго порядка с запаздыванием:

$$W_{GT}(p) = \frac{K_{GT} e^{-p\tau_{GT}}}{(T_{GT} p + 1)(\sigma_{GT} p + 1)}, \quad (7.2)$$

где $\tau_{GT} = 50 - 70$ с; $T_{GT} = 100 - 150$ с; $\sigma_{GT} = 50 - 70$ с; $K_{GT} = 0,5 - 1,0$.

Для второго контура регулирования объектом регулирования является участок, включающий в себя паровой тракт с ПТН и водяной тракт с измерительным преобразователем перепада давления на РПК, и может быть представлен апериодическим звеном первого порядка с запаздыванием:

$$W_{\Delta P_{\text{РПК}}}(p) = \frac{K_{\Delta P_{\text{РПК}}} e^{-p\tau_{\Delta P_{\text{РПК}}}}}{T_{\Delta P_{\text{РПК}}} p + 1}, \quad (7.3)$$

где $\tau_{\Delta P_{\text{РПК}}} = 5 - 10$ с; $T_{\Delta P_{\text{РПК}}} = 20 - 30$ с; $K_{\Delta P_{\text{РПК}}} = 0,8 - 1,2$.

7.3. Структурная схема регулирования питания прямоточного котла

На рис. 7.1 приведена типовая структурная схема регулирования питания прямоточного котла.

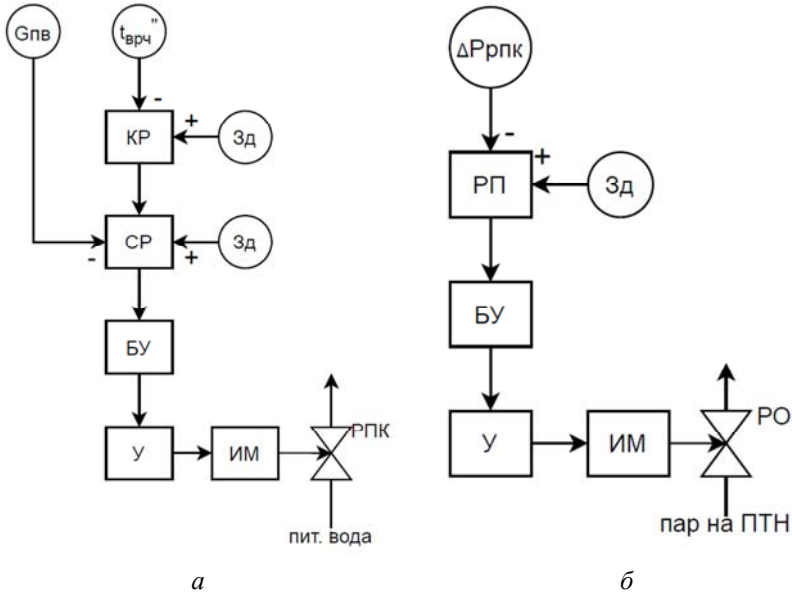


Рис. 7.1. Структурная схема регулирования питания прямоточного котла:

$t''_{врч}$ – температура пара за ВРЧ; $\Delta P_{рпк}$ – перепад давления на РПК.

Остальные обозначения см. предыдущие структурные схемы

8. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ НАГРУЗКИ ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛА

8.1. Общие сведения о системе

Регулирование тепловой нагрузки прямоточного котла требует совместного и согласованного изменения расхода топлива и расхода питательной воды.

Для газомазутных котлов в основном применяется импульс по расходу топлива, а для твердотопливных котлов применяется импульс по тепловой нагрузке, отражающей тепловыделение в топке.

8.2. Динамические характеристики объекта регулирования

Объектом регулирования для газомазутных котлов является участок, включающий в себя участок газомазутопровода и измерительный преобразователь расхода топлива. Этот участок является опережающим. Второй участок – инерционный, включающий газопаровой тракт котла и измерительный преобразователь давления пара перед турбиной (при первичном регулировании котлом), либо газопаровой тракт котла, включающий турбину и генератор (при первичном регулировании турбиной).

Опережающий участок может быть представлен аperiodическим звеном первого порядка с запаздыванием:

$$W_{BT}(p) = \frac{K_{BT} e^{-p\tau_{BT}}}{T_{BT}p + 1}, \quad (8.1)$$

где $\tau_{BT} = 2-4$ с; $T_{BT} = 10-15$ с; $K_{BT} = 1,5-2,5$.

Инерционный участок может быть представлен аperiodическим звеном второго порядка с запаздыванием (при первичном регулировании котлом):

$$W_{P_o}(p) = \frac{K_{P_o} e^{-p\tau_{P_o}}}{(T_{P_o}p + 1)(\sigma_{P_o}p + 1)}, \quad (8.2)$$

где $\tau_{P_o} = 50\text{--}70$ с; $T_{P_o} = 120\text{--}160$ с; $\sigma_{P_o} = 30\text{--}50$ с; $K_{P_o} = 0,5\text{--}0,7$.

При первичном регулировании турбиной:

$$W_N(p) = \frac{K_N e^{-p\tau_N}}{(T_N p + 1)(\sigma_N p + 1)}, \quad (8.3)$$

где $\tau_N = 60\text{--}80$ с; $T_N = 140\text{--}180$ с; $\sigma_N = 40\text{--}50$ с; $K_N = 0,8\text{--}1,0$.

Для твердотопливного котла опережающий участок включает в себя газовый тракт котла до измерительных преобразователей давления и расхода среды в промежуточной точке и может быть описан аperiodическим звеном первого порядка с запаздыванием:

$$W_Q(p) = \frac{K_Q e^{-p\tau_Q}}{T_Q p + 1}, \quad (8.4)$$

где $\tau_Q = 15\text{--}20$ с; $T_Q = 50\text{--}70$ с; $K_Q = 1,2\text{--}1,5$.

8.3. Структурная схема регулирования нагрузки прямоточного котла

На рис. 8.1, а, б, в приведены типовые структурные схемы регулирования нагрузки прямоточного котла.

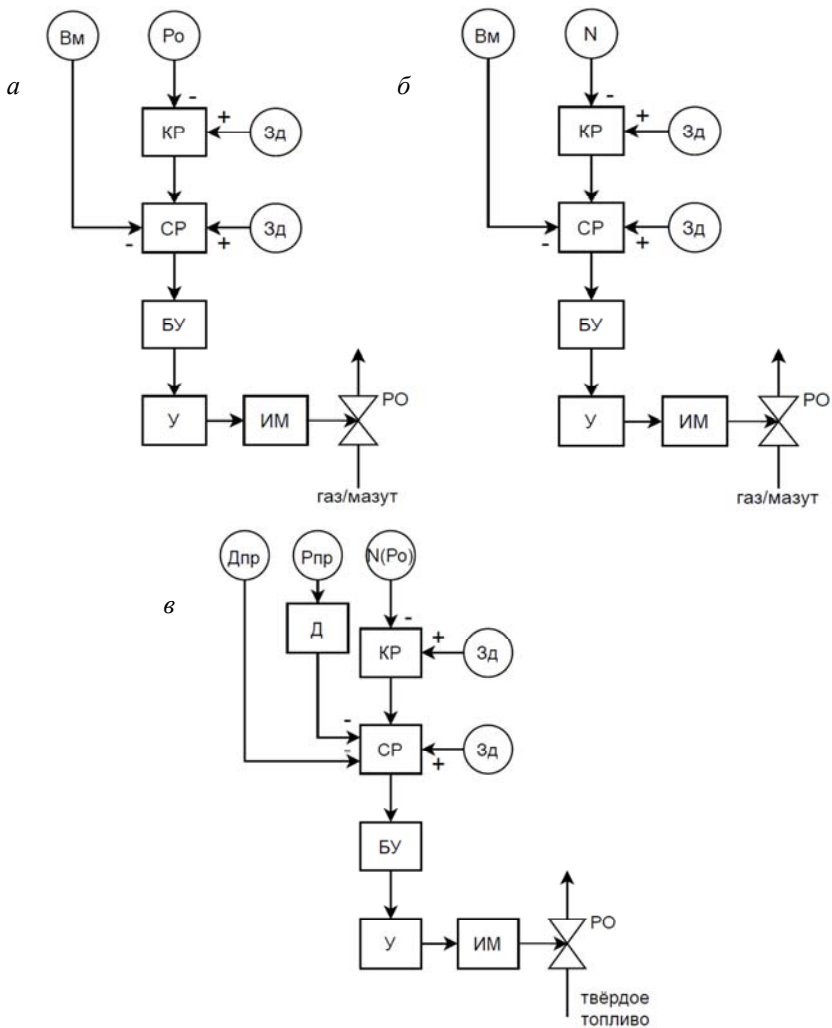


Рис. 8.1. Структурная схема регулирования нагрузки прямоточного котла:
 а – при первичном регулировании котлом (газوماзутное топливо);
 б – при первичном регулировании турбиной (газوماзутное топливо);
 в – при первичном регулировании турбиной (котлом)
 для твердотопливного котла;
 $D_{пр}$, $P_{пр}$ – расход пара и давления в промежуточной точке пароводяного тракта котла (зона насыщения); N – мощность энергоблока.
 Остальные обозначение см. предыдущие структурные схемы

9. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛА

9.1. Общие сведения о системе

Основную роль в поддержании температуры перегрева пара играет установление требуемого соотношения между расходами подаваемых в котел топлива и питательной воды. Это обеспечивает грубое регулирование температуры перегрева пара. Поскольку к статической и динамической точности регулирования температуры пара предъявляют высокие требования, в качестве дополнительного средства тонкого регулирования используют впрыскивающие пароохладители. Обычно впрыскивающий пароохладитель устанавливают в одном из промежуточных сечений пароперегревателя. Для улучшения качества процесса регулирования температуры и обеспечения в то же время надежности металла поверхностей нагрева применяют несколько впрысков (обычно два).

9.2. Динамические характеристики объекта регулирования

Объект регулирования здесь разбивается на два участка: опережающий участок, включающий пароохладитель, паровой тракт и измерительный преобразователь температуры пара, и инерционный участок, включающий паровой тракт, собственно пароперегреватель и измерительный преобразователь температуры пара.

Опережающий участок может быть представлен аperiodическим звеном первого порядка с запаздыванием:

$$W_{Gt}(p) = \frac{K_{Gt} e^{-p\tau_{Gt}}}{T_{Gt}p + 1}, \quad (9.1)$$

где $\tau_{Gt} = 2-4$ с; $T_{Gt} = 10-15$ с; $K_{Gt} = 1,5-2,6$.

Инерционный участок может быть представлен аperiodическим звеном второго порядка с запаздыванием:

$$W_{tt}(p) = \frac{K_{tt} e^{-p\tau_{tt}}}{(T_{tt}p + 1)(\sigma_{tt}p + 1)}, \quad (9.2)$$

где $\tau_{tt} = 10-15$ с; $T_{tt} = 40-50$ с; $\sigma_{tt} = 15-20$ с; $K_{tt} = 0,6-0,8$.

9.3. Структурная схема регулирования температуры перегретого пара

Регулирование температуры перегретого пара последовательно включенных перегревателей участков первичного тракта осуществляется с помощью каскадной системы регулирования см. рис. 9.1.

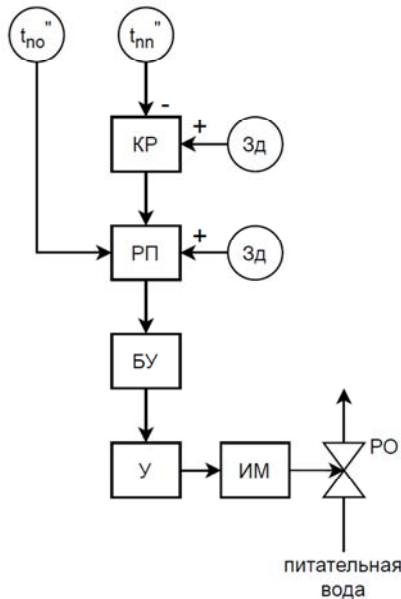


Рис. 9.1. Структурная схема регулирования температуры перегретого пара:

t''_{nn} – температура пара за перегревателем;

t''_{no} – температура пара за пароохладителем.

Остальные обозначения см. предыдущие структурные схемы

10. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛА

10.1. Общие сведения о системе

Впрыск воды в пароперегреватель приводит к образованию пара, не прошедшего часть высокого давления турбины (цикл с начальными параметрами пара 4,0 МПа/540 °С). Поэтому для регулирования температуры промперегрева впрыскивающие пароохладители применяют сравнительно редко (в основном как аварийный для защиты промперегревателей от недопустимого повышения температуры). Практическое применение чаще всего находят паропаровые тепловые теплообменники и перепуск пара в обвод первой ступени промперегревателя (см. рис. 10.1, а, б).

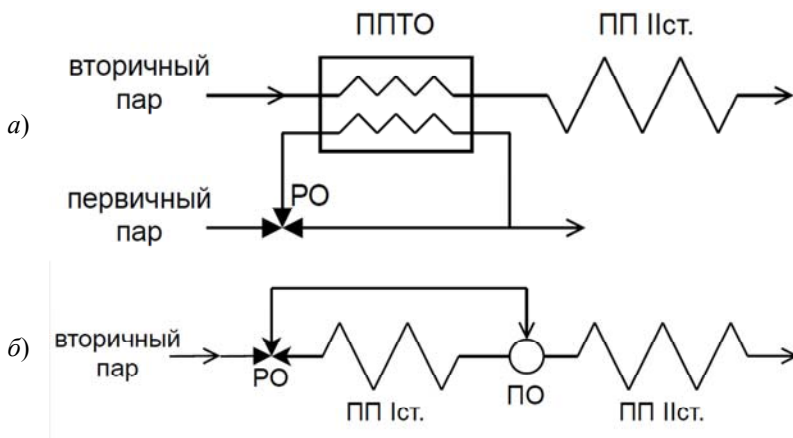


Рис. 10.1 Регулирование температуры пара промперегрева:

а – паропаровым теплообменником;

б – перепуском пара в обвод первой ступени;

ППТО – паропаровой теплообменник; ППП I ст – промежуточный пароперегреватель I ступени; РО – регулирующий орган, трехходовой клапан; ППП II ст – промежуточный пароперегреватель II ст;

ПО – пароохладитель

10.2. Динамические характеристики объекта регулирования

Объект регулирования здесь разбивается на два участка: опережающий, включающий ППТО, паровой тракт и измерительный преобразователь температуры пара (рис. 10.1, *а*) или паровой тракт, собственно промежуточный пароперегреватель I ст, пароохладитель и измерительный преобразователь температуры пара (рис. 10.1 *б*) и инерционный, включающий паровой тракт, собственно промежуточный пароперегреватель II ступени и измерительный преобразователь температуры пара.

Опережающий участок может быть представлен апериодическим звеном второго порядка с запаздыванием:

$$W_{Dt}(p) = \frac{K_{Dt} e^{-p\tau_{Dt}}}{(T_{Dt}p + 1)(\sigma_{Dt}p + 1)}, \quad (10.1)$$

где $\tau_{Dt} = 20-30$ с; $T_{Dt} = 200-250$ с; $\sigma_{Dt} = 40-60$ с; $K_{Dt} = 1-1,5$.

Инерционный участок также может быть представлен апериодическим звеном второго порядка с запаздыванием:

$$W_{It}(p) = \frac{K_{It} e^{-p\tau_{It}}}{(T_{It}p + 1)(\sigma_{It}p + 1)}, \quad (10.2)$$

где $\tau_{It} = 20-40$ с; $T_{It} = 200-250$ с; $\sigma_{It} = 60-80$ с; $K_{It} = 0,5-0,8$.

10.3. Структурная схема регулирования температуры промежуточного перегрева пара

Регулирование температуры промежуточного перегрева пара осуществляется по типовым схемам, приведенным на рис. 10.2, *а* и *б*.

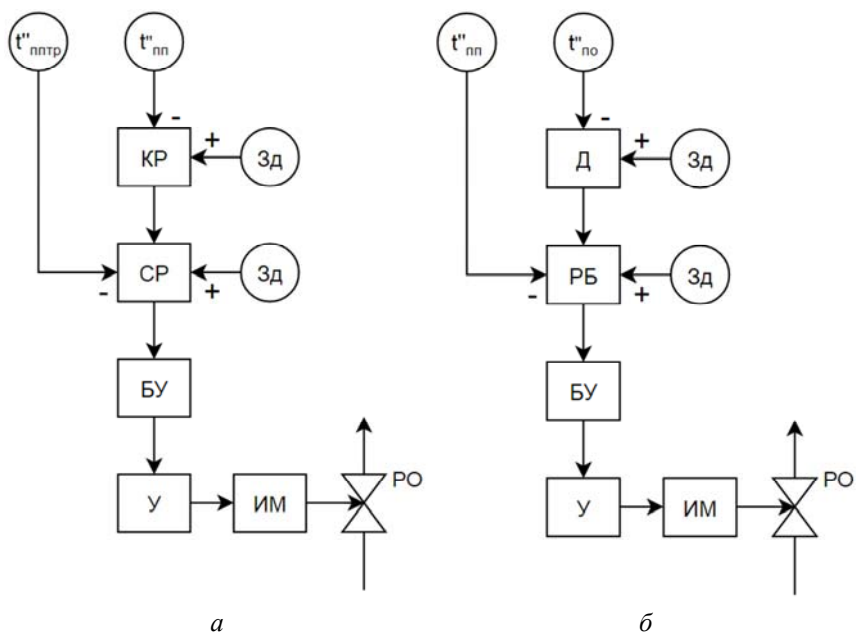


Рис. 10.2. Структурная схема регулирования температуры пара промперегрева:

а – паропаровые теплообменники;

б – перепуск пара в обвод первой ступени.

Обозначения см. в приведенных структурных схемах

11. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕДУКЦИОННО-ОХЛАДИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

11.1. Общие сведения о системе

В редукионно-охладительной установке (РОУ) осуществляется понижение давления пара, пропускаемого через редукионный клапан, и понижение температуры за счет впрыска охлаждающей воды в коллектор редуцированного пара. С помощью РОУ резервируются промышленные и теплофикационные отборы турбин, осуществляется связь между общими паропроводами станции высокого и среднего давления.

11.2. Динамические характеристики объекта регулирования

Объект регулирования здесь представляет собой связанную динамическую систему с двумя входными регулирующими воздействиями – расход пара ($D_{\text{п}}$) и расход охлаждающей воды ($D_{\text{в}}$), и тремя регулирующими параметрами: давление пара за РОУ ($P_{\text{роу}}$), температура пара за РОУ ($t_{\text{роу}}$), и расход пара за РОУ ($D_{\text{роу}}$).

Все динамические характеристики РОУ как объекта регулирования удовлетворительно описываются аperiodическими звеньями первого порядка с запаздыванием:

– по каналу $D_{\text{п}} - t_{\text{роу}}$:

$$W_{D_{\text{п}}t}(p) = \frac{K_{D_{\text{п}}t} e^{-p\tau_{D_{\text{п}}t}}}{T_{D_{\text{п}}t} p + 1}, \quad (11.1)$$

где $\tau_{D_{\text{п}}t} = 2-3$ с; $T_{D_{\text{п}}t} = 8-12$ с; $K_{D_{\text{п}}t} = 1-1,5$.

– по каналу $D_{\text{в}} - t_{\text{роу}}$:

$$W_{D_{\text{в}}t}(p) = \frac{K_{D_{\text{в}}t} e^{-p\tau_{D_{\text{в}}t}}}{T_{D_{\text{в}}t} p + 1}, \quad (11.2)$$

где $\tau_{D_{Bt}} = 3-5$ с; $T_{D_{Bt}} = 10-15$ с; $K_{D_{Bt}} = 1,5-2$.

– по каналу $D_{п} - P_{роу}$:

$$W_{Dp}(p) = \frac{K_{Dp} e^{-p\tau_{Dp}}}{T_{Dp}p + 1}, \quad (11.3)$$

где $\tau_{Dp} = 2-3$ с; $T_{Dp} = 8-12$ с; $K_{Dp} = 1-1,5$.

11.3. Структурная схема регулирования редуционно-охладительной установки

Регулирование параметров $P_{роу}$, $t_{роу}$ и $D_{роу}$ осуществляется двумя одноконтурными системами, связанными динамическими устройствами.

Динамическая связь обычно представляет собой апериодическое звено.

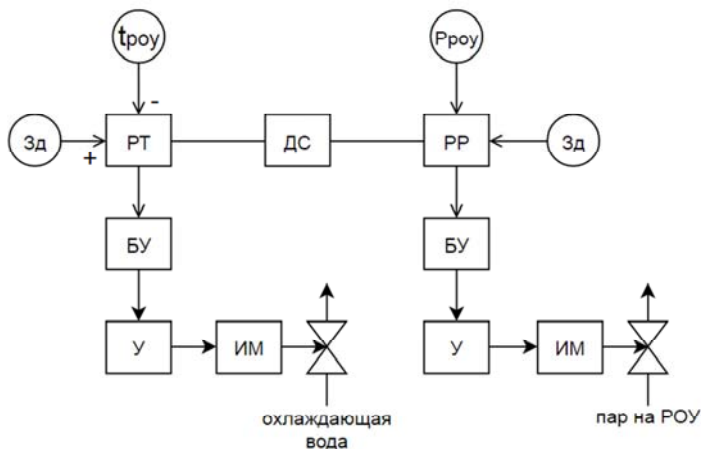


Рис. 11.1. Структурная схема регулирования РОУ:

РР – регулятор давления за РОУ; РТ – регулятор температуры пара за РОУ; ДС – динамическая связь, $t_{роу}$ – сигнал по температуре пара за РОУ; $P_{роу}$ – сигнал по давлению пара за РОУ.

Остальные обозначения см. предыдущие структурные схемы

12. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ СЕТЕВОЙ ВОДЫ

12.1. Общие сведения о системе

Подогреватели теплофикационной сетевой воды предназначены для ее подогрева до требуемой температуры и представляют собой поверхностные теплообменники. Регулируемыми величинами здесь являются температура прямой сетевой воды и уровень конденсата греющего пара.

Наиболее экономичный способ регулирования температуры сетевой воды заключается в изменении давления пара в отопительных отборах воздействием на регулирующие диафрагмы, а более точное регулирование осуществляется обводом части сетевой воды помимо сетевых подогревателей. Если теплофикационная турбина не имеет средств поддержания давления в отборе, то тогда регулирование температуры сетевой воды осуществляется средствами регулирования установок, например, изменением расхода сетевой воды.

12.2. Динамические характеристики объекта регулирования

Подогреватель как объект регулирования разделяется на два участка: температуры прямой сетевой воды и уровня конденсата в подогревателе.

Все эти участки удовлетворительно описываются аperiодическими звеньями первого порядка с запаздыванием.

Участок изменения давления в отборе турбины – температуры сетевой воды:

$$W_{pt}(p) = \frac{K_{pt} e^{-p\tau_{pt}}}{T_{pt}p + 1}, \quad (12.1)$$

где $\tau_{pt} = 10-15$ с; $T_{pt} = 30-40$ с; $K_{pt} = 0,8-1,2$.

Участок обвод части сетевой воды – температура сетевой воды:

$$W_{rt}(p) = \frac{K_{rt} e^{-p\tau_{rt}}}{T_{rt}p + 1}, \quad (12.2)$$

где $\tau_{rt} = 3-5$ с; $T_{rt} = 10-15$ с; $K_{rt} = 0,5-0,8$.

Участок дренажный клапан–уровень конденсата в подогревателе:

$$W_{rn}(p) = \frac{K_{rn} e^{-p\tau_{rn}}}{T_{rn}p + 1}, \quad (12.3)$$

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

12.3. Структурная схема регулирования подогревателей сетевой воды

Регулирование температуры сетевой воды осуществляется двумя связанными одноконтурными системами см. рис. 12.1.

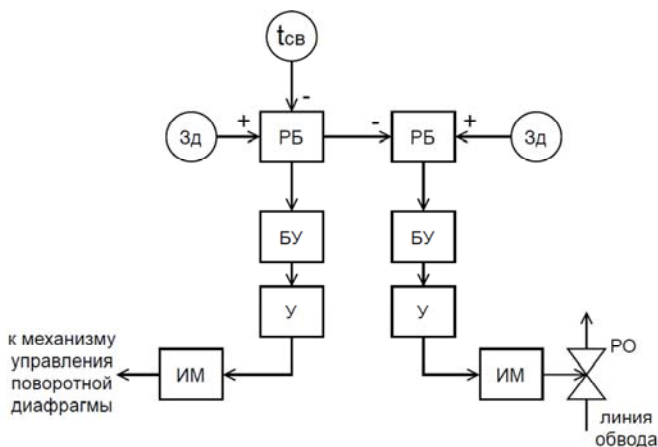


Рис. 12.1. Структурная схема регулирования температуры прямой сетевой воды:

$t_{св}$ – сигнал по температуре прямой сетевой воды;
остальные обозначения см. предыдущие структурные схемы

Регулирование уровня конденсата в подогревателе осуществляется одноконтурной стабилизирующей системой (см. рис. 12.2).

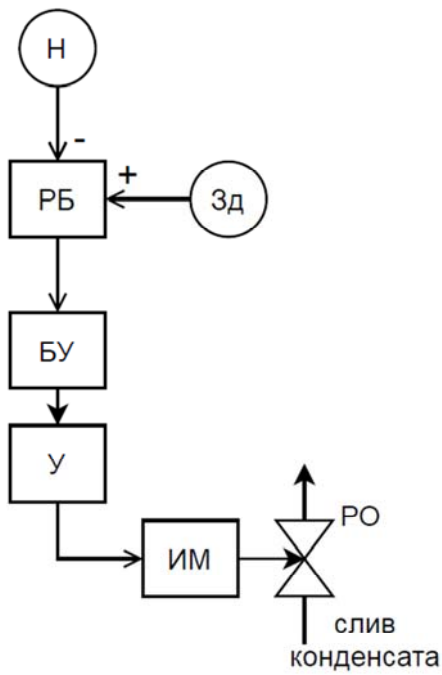


Рис. 12.2. Структурная схема регулирования уровня конденсата в подогревателе:
Н – сигнал по уровню конденсата;
остальные обозначения см. предыдущие структурные схемы

13. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА ТЭС ПРИ ПЕРВИЧНОМ УПРАВЛЕНИИ ТУРБИНОЙ

13.1. Общие сведения об системе

На практике находят применение различные способы управления энергоблоками ТЭС. Для блоков с барабанными котлами наиболее распространен способ первичного управления турбиной. Для блоков с прямоточными котлами, наряду с указанным способом, широко применяется способ первичного управления котлом. Находят применение и комбинированные многосвязные схемы. В схемах, реализующих этот способ управления блоком, регулятор мощности, поддерживающий ее заданное значение, воздействует на регулирующие клапаны турбины через ее механизм управления турбиной.

Функции регулятора давления свежего пара выполняет главный регулятор котла, выходной сигнал которого передается в качестве задания регулятору топлива. Корректор частоты, подключаемый к регулятору мощности, в соответствии с заданной статической характеристикой изменяет мощность при отключениях частоты, обеспечивает тем участие блока в регулировании частоты в энергосистеме.

Быстродействующее управление мощностью по сигналу противоаварийной автоматики энергосистемы производится через электрогидравлический преобразователь. Для того чтобы регулятор мощности не препятствовал противоаварийному управлению мощностью, сигнал противоаварийной автоматики поступает и на вход.

Способ первичного управления турбиной обеспечивает максимальную из возможных при воздействии через механизм управления турбиной приемистость блока.

13.2. Динамические характеристики объекта регулирования

Математическая модель котла как объекта регулирования давления (инерционного участка) структурно может быть представлена апериодическим звеном второго порядка с запаздыванием:

$$W_{3_d P_O}(P) = \frac{K_{3_d P_O} e^{-P\tau_{3_d P_O}}}{(T_{3_d P_O} P + 1)(\sigma_{3_d P_O} P + 1)}, \quad (13.1)$$

где $\tau_{3_d P_O} = 10-15$ с; $T_{3_d P_O} = 60-80$ с; $\sigma_{3_d P_O} = 25-40$ с; $K_{3_d P_O} = 0,5-0,8$.

Опережающий участок, включающий топливопроводы и измерительный преобразователь расходомера, может быть представлен в виде апериодического звена с запаздыванием:

$$W_{3_d B_T}(P) = \frac{K_{3_d B_T} e^{-P\tau_{3_d B_T}}}{T_{3_d B_T} P + 1}, \quad (13.2)$$

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

Турбина как объект регулирования мощности может быть представлена передаточной функцией вида

$$W_{3_d N}(P) = \frac{K_{3_d N} T_{3_d N} P}{T_{3_d N} P + 1}, \quad (13.3)$$

где $T_{3_d N} = 5-10$ с; $K_{r_H} = 1,5-1,7$.

13.3. Структурная схема регулирования мощности энергоблока

Структурная схема регулирования энергоблока при первичном управлении турбиной представлена на рис. 13.1.

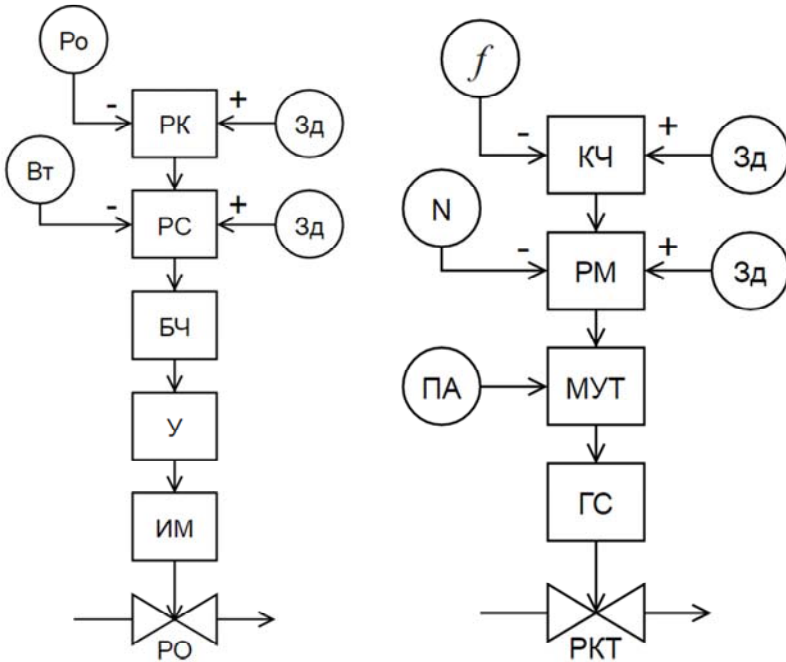


Рис. 13.1. Структурная схема регулирования мощности энергоблока при первичном управлении турбиной:

f – частота; КЧ – корректор частоты; РМ – регулятор мощности;
 МУТ – механизм управления турбиной; ГС – главный сервомотор;
 РКТ – регулирующий клапан турбины;
 ПА – противоаварийная автоматика.

Остальные обозначения см. предыдущие структурные схемы

14. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА ТЭС ПРИ ПЕРВИЧНОМ УПРАВЛЕНИИ КОТЛОМ

14.1. Общие сведения о системе

В схемах, реализующих принцип первичного управления котлом, внешнее задание на поддержание заданной мощности передается на регулятор нагрузки котла, который переводит котел к новому режиму работы. Заданное давление свежего пара поддерживает регулятор давления (регулятор «до себя»), воздействующий через механизм управления турбиной на ее регулирующие клапаны. При первичном управлении котлом сначала изменяется режим его работы, и лишь после изменения паропроизводительности и давления свежего пара воспринимающий это давление регулятор давления переставляет регулирующий клапан турбины, изменяя ее мощность.

Регулирование давления свежего пара в схемах с первичным управлением турбиной встречает определенные трудности, связанные с большими отклонениями давления при быстром перемещении клапанов турбины. Еще более это усложняется в случае применения регулятора мощности, по существу, ликвидирующих саморегулирование котла.

Быстрое изменение давления по тракту котла, в котором отсутствует четко фиксированная граница фазового перехода, может приводить к существенному смещению этих границ и, вследствие, изменению условий теплообмена, что отрицательно сказывается на надежности котла. В связи с отмеченным, иногда выражают сомнение в возможности успешной реализации на блоках прямоточными котлами первичного управления турбиной. Именно это обстоятельство явилось причиной разработки и применения схем с первичным управлением котлом.

14.2. Динамические характеристики объекта регулирования

Динамические характеристики объекта регулирования при первичном управлении котлом такие же, как и при первичном управлении турбиной.

14.3. Структурная схема регулирования мощности энергоблока

Структурная схема регулирования энергоблока при первичном управлении котлом представлена на рис. 14.1.

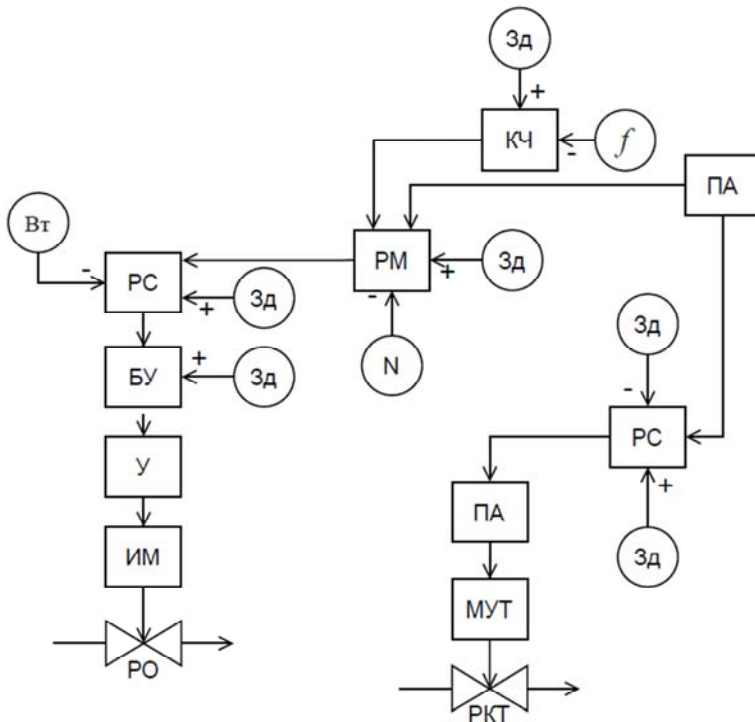


Рис. 14.1. Структурная схема регулирования мощности энергоблока при первичном регулировании котлом.
Обозначения см. рис. 13.1

15. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ВОДО-ВОДЯНЫХ РЕАКТОРОВ АЭС

15.1. Общие сведения о системе

Поддержание средней температуры теплоносителя в первом контуре обеспечивает наименьшее отклонение параметров теплоносителя в нем при изменениях мощности, а также эффективное использование температурного эффекта реактивности для регулирования реактора. Все это очень хорошо сочетается со способом первичного управления турбиной. Если воздействием на АСР турбины, работавшей при частичной нагрузке, открыть ее регулирующие клапаны, то из-за понижения давления и температуры насыщения во втором контуре возрастает количество теплоты, отводимой из первого контура, что снижает среднюю температуру теплоносителя в нем.

Так как температурный коэффициент реактивности водородного реактора отрицателен, снижение температуры теплоносителя выводит реактор в надкритическое состояние. Мощность реактора возрастает, и увеличение отвода теплоты от ТВЭЛов повышает температуру теплоносителя в первом контуре, возвращая реактор в критическое состояние. На новом установившемся режиме средняя температура теплоносителя в первом контуре при этом несколько ниже, чем на исходном, поскольку с ростом мощности реактивность реактора снижается под влиянием не только температуры, но и отрицательного мощностного коэффициента реактивности. Этот пример показывает, что принципиально возможен перевод реактора к новому режиму работы исключительно за счет свойств саморегулирования. Поскольку отказ от регулирования нейтронной мощности реактора невозможен, среднюю температуру теплоносителя поддерживают с помощью каскадной схемы регулирования тепловой мощности реактора, в которой в роли регулятора тепловой мощности реактора используют регулятор

средней температуры t_I теплоносителя, изменяющий задание регулятору нейтронной мощности. Недостатки способа регулирования $t_I = \text{const}$ определяются повышением давления пара во втором контуре при снижении мощности энергоблока.

Наиболее распространен способ регулирования энергоблока с постоянным давлением пара P_{II} во втором контуре. Для его реализации используют как первичное управление турбиной, так и первичное управление реактором. Применение способа регулирования $P_{II} = \text{const}$ позволяет при том же оборудовании второго контура, что применимо для способа $t_I = \text{const}$, использовать на номинальном режиме более высокие параметры пара, чем при $t_I = \text{const}$, что повышает тепловую экономичность блока на номинальном режиме. Однако при этом необходимо повысить давление теплоносителя в первом контуре для предотвращения его вскипания. Для компенсации отклонений реактивности, вызванных изменением средней температуры t_I теплоносителя в первом контуре, необходимо значительное перемещение стержней СУЗ. Необходимо также увеличение размера компенсаторов объема. Изменение средней температуры теплоносителя в первом контуре вызывает температурные напряжения в контуре реактора, ухудшает его маневренные качества. Поэтому в некоторых случаях используют компромиссные способы регулирования. В диапазоне нагрузок около номинальной поддерживают постоянной среднюю температуру теплоносителя в первом контуре, а, начиная от некоторой частичной нагрузки, дальнейшее ее снижения производят при постоянном снижении давления пара во втором контуре. Такой способ применим для блока ВВЭР-1000.

15.2. Динамические характеристики объекта регулирования

Объектами регулирования здесь являются собственно турбинная и реакторные установки. Модель турбинной установки может быть представлена апериодическим звеном первого порядка с запаздыванием:

$$W_T(p) = \frac{K_T e^{-p\tau_T}}{T_T p + 1}, \quad (15.1)$$

где $\tau_T = 2-3$ с; $T_T = 8-12$ с; $K_T = 0,8-1,2$.

Модель реакторной установки может быть представлена апериодическим звеном второго порядка с запаздыванием:

$$W_P(p) = \frac{K_P e^{-p\tau_P}}{(T_P p + 1)(\sigma_P p + 1)}, \quad (15.2)$$

где $\tau_P = 40-60$ с; $T_P = 100-140$ с; $\sigma_P = 30-50$ с; $K_P = 2,5-3$.

15.3. Структурная схема регулирования мощности водо-водяного реактора

Структурная схема регулирования мощности водо-водяных реакторов представлена на рис. 15.1.

При работе в регулирующем режиме АСР блока имеет структуру (рис. 15.1, а), реализующую принцип первичного управления турбиной. Участие блока в регулировании частоты и мощности обеспечивается воздействием соответствующих регуляторов на регулирующие клапаны турбины РКТ. Давление пара во втором контуре поддерживает регулятор давления РД, воздействующий на регулятор нейтронной мощности РНМ.

Последний управляет сервоприводом регулирующих стержней ССУЗ реактора. Применяют также схемы регулирования давления и нейтронной мощности, в которых сервоприводом стержней СУЗ управляет регулятор давления РД, получающий дополнительный исчезающий импульс по нейтронной мощности. Когда же необходимо ограничить возможные изменения нагрузки блока и режимов работы его оборудования, структуру АСР изменяют для реализации принципа первичного управления реактором (рис. 15.1, б). При этом регулятор нейтронной мощности реактора поддерживает с помощью стержней СУЗ предписанное значение мощности блока, а давление пара во втором контуре поддерживает регулятор давления «до себя», управляющий регулируемыми клапанами турбины.

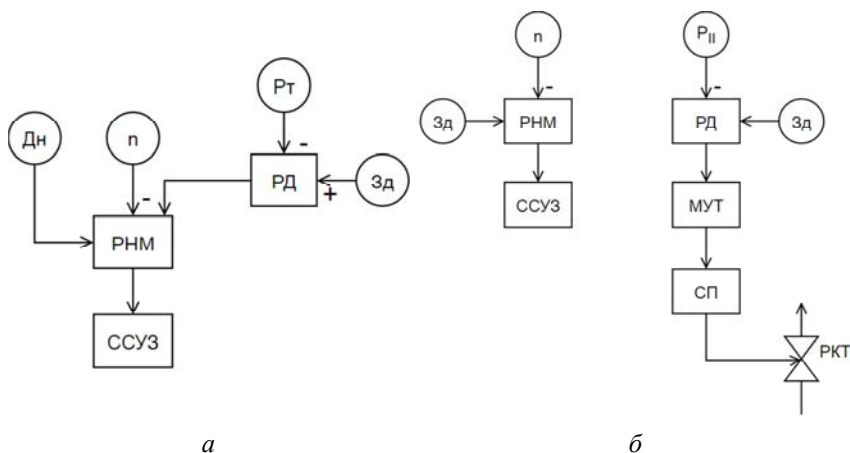


Рис. 15.1. Структурная схема регулирования мощности водо-водяного реактора:

- a* – первичное управление турбиной; *б* – первичное управление реактора;
 n – датчик нейтронной мощности; РНМ – регулятор нейтронной мощности; РД – регулятор давления пара во втором контуре; ССУЗ – сервопривод ССУЗ; СУЗ – стержни системы управления и защиты; D_n – расход пара во втором контуре; P_{II} – давление пара во втором контуре; МУТ – механизм управления турбиной; СМ – сервомотор; РКТ – регулирующие клапаны турбины

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, В. А. Регулирование энергоблоков / В. А. Иванов. – Л.: Машиностроение, 1982. – 311 с.
2. Плетнев, Г. П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике / Г. П. Плетнев. – М.: МЭИ, 2016. – 352 с.
3. Демченко, В. А. Автоматизация и модернизация технологических процессов АЭС и ТЭС / В. А. Демченко. – М.: МЭИ, 2001. – 245 с.
4. Гузеев, М. С. Автоматическое регулирование объектов теплоэнергетики / М. С. Гузеев. – М.: МЭИ, 2007. – 198 с.

Учебное издание

НАЗАРОВ Владимир Иванович

**СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ НА ТЭС И АЭС**

Учебно-методическое пособие
для студентов специальностей

1-43 01 04 «Тепловые электрические станции»;
1-43 01 08 «Проектирование и эксплуатация атомных
электрических станций»; 1-53 01 04 «Автоматизация
и управление теплоэнергетическими процессами»

Редактор *Е. О. Германович*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 25.11.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 3,20. Уч.-изд. л. 2,50. Тираж 100. Заказ 584.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.